

Рекомендовано Министерством образования и науки
Республики Казахстан

Н. А. Закирова
Р. Р. Аширов

ФИЗИКА

Учебник для 10 класса
естественно-математического направления
общеобразовательной школы

10



УДК 373.167.1
ББК 22.3я72
3-16

Закирова Н.А, Аширов Р.Р.
3-16 **Физика:** учеб. для 10 кл. естественно-математического направления общеобразоват. шк. / Н.А. Закирова, Р.Р. Аширов. – Нур-Султан: Издательство «Арман-ПВ», 2019. – 336 с.

ISBN 978-601-318-247-6

Учебник по физике для 10 класса разработан в соответствии с Типовой учебной программой по предмету «Физика» для 10 класса уровня общего среднего образования по обновленному содержанию.

В изложении материала учтены возрастные особенности учащихся, соблюдены принципы научности и доступности, раскрытия учебного материала.

УДК 373.167.1
ББК 22.3я72

ISBN 978-601-318-247-6

© Закирова Н.А.,
Аширов Р.Р., 2019

© Издательство «Арман-ПВ», 2019

Репродуцирование (воспроизведение) любым способом данного издания без договора с издательством запрещается.

Условные обозначения



Определения, которые нужно запомнить.

Контрольные вопросы

Вопросы для самоконтроля теоретического материала



Упражнение

Задания для выполнения в классе

Экспериментальное задание

Задания для исследовательской работы

Творческое задание

Задания на реализацию творческих способностей



Ответьте на вопросы

Вопросы, требующие пояснения сущности физического явления



Задание

Задания для выполнения в классе



Эксперимент

Экспериментальные задания для выполнения в классе



Запомните!

Памятка для учащихся



Возьмите на заметку

Памятка для учащихся



Интересно знать!

Дополнительная информация, относящаяся к содержанию темы
Научно-познавательные факты



Кусочки науки

Информация из естественных и точных наук



Вспомните!

Сведения для повторения изученного материала



Обратите внимание!

Учебный материал, вызывающий затруднения при выполнении упражнений



Внимание

При необходимости вы всегда сможете найти содержание CD с электронным приложением на сайте *arman-pv.kz* и загрузить его на свой компьютер для дальнейшей работы

Предисловие

Ребята! Изучая физику, вы познакомились с механическими, тепловыми, электромагнитными явлениями, со строением атома и его ядра. Курс физики основной школы завершил знакомство с базовыми ее разделами. Листая страницы учебника физики для 10 класса, вы обнаружите, что в старших классах изучают ту же механику, молекулярную физику, электродинамику. Продолжая обучение в высших учебных заведениях, вы вновь вернетесь к тем же разделам физики. Такова особенность обучения науке «Физика».

Каждое явление, которое изучает физика, бесконечными связями объединено с другими явлениями природы. В окружающем мире нет чисто механических, тепловых или электромагнитных явлений, мир един. Но невозможно объяснить сразу все многообразие мира. Для удобства мы рассматриваем отдельные его проявления для формирования в дальнейшем единой целостной картины – научного мировоззрения.

Исследования природных явлений показали, что тепловые и оптические явления, упругое взаимодействие тел, обусловлены взаимодействием заряженных частиц, из которых состоит тело. Не изучив законы электромагнитных взаимодействий, невозможно до конца понять механические, тепловые и оптические явления. Кажется невероятным, что многие законы и уравнения механики применимы для микромира. Ускорение заряженных частиц в электрическом и магнитном полях определяют с использованием второго закона Ньютона. Уравнение движения кинематики используют для определения их скорости и перемещения.

Итак, знакомство с физическими явлениями в курсе физики основной школы происходит на грубых моделях реальных явлений, которые в дальнейшем требуют уточнения. В курсе физики старшей школы и высшего учебного заведения происходит повторное углубленное изучение тех же разделов физики.

Практически все законы физики формулируются на языке математики, который достаточно сложен. Усложнение и обогащение языка математики позволяют приблизить модели природных явлений к реальным. Это еще одна из причин для повторного изучения физических явлений. Материал, отмеченный***, предназначен для классов с углубленным изучением математики.

После каждого параграфа включены контрольные вопросы, вопросы-почемучки и расчетные задачи. Для более глубокого познания физических явлений необходимо использовать дополнительные сборники задач. В учебник также включены домашние, экспериментальные и творческие задания.

Лабораторные работы, табличные величины, ответы к упражнениям вы найдете в конце учебника.

Желаем успехов в изучении физики – науки, которая поможет понять мир, в котором мы живем!

Авторы.

Механика (в переводе с древнегреч. μηχανική) – означает, «искусство построения машин». Механика как раздел физики имеет более широкое значение.

Механика – это наука о механическом движении материальных тел и взаимодействиях, происходящих между ними.

В данном разделе учебника будет рассмотрен ряд вопросов из таких разделов механики, как кинематика, динамика, статика, аэродинамика и гидродинамика, а также законы сохранения.

ГЛАВА 1

КИНЕМАТИКА

Кинематика (от древнегреч. κίνησις) – раздел механики, посвященный изучению движения тел без учета их масс и действующих на них сил. В зависимости от свойств тела, кинематику разделяют на кинематику точки, кинематику твердого тела и кинематику непрерывно изменяемой среды: деформируемого твердого тела, жидкости, газа. В кинематике производится классификация движений, деление их на виды по определенным признакам.

Изучив подраздел, вы сможете:

- высказывать суждения о роли физики в современном мире и аргументировать собственное мнение;
- различать систематические и случайные ошибки;
- определять зависимые, независимые и контролируемые физические величины;
- записывать конечный результат экспериментальных исследований, исходя из точности измерений физических величин;
- выводить формулу перемещения при равноускоренном движении тела, используя графическую зависимость скорости от времени;
- применять кинематические уравнения при решении расчетных и графических задач;
- различать инвариантные и относительные физические величины;
- применять классический закон сложения скоростей и перемещений при решении задач;
- определять радиус кривизны траектории, тангенциальное, центростремительное и полное ускорения тела при криволинейном движении;
- определять кинематические величины при движении тела, брошенного под углом к горизонту;
- исследовать траекторию движения тела, брошенного под углом к горизонту.

§ 1. Роль физики в современном мире

Ожидаемый результат

Прочитав параграф, вы сможете:

- высказывать суждения о роли физики в современном мире и аргументировать собственное мнение.

Цель науки – сохранять и приумножать знания для общества и последующих поколений.

Андре Мишель Львов

I. Физика в современном мире

Физика стала играть исключительно важную роль в современном мире. Она является важнейшим источником знаний об окружающем нас мире. Исследование явлений природы привело к открытию физических законов и развитию техники, а также всех наук, изучающих природу. На стыке физики и других естественных наук возникли новые направления исследований: химическая физика, геофизика, агрофизика, психофизика, биофизика (рис. 1).



Рис. 1. Электродиаграмма сердца

Ответьте на вопросы

1. Почему на современном этапе происходит интеграция естественных наук?
2. Почему наука стала непосредственной производительной силой?



Рис. 2. Вертолет-лаборатория для геофизических исследований казахстанской компании «КАЗЦИНК»

Наука стала непосредственной производительной силой. На Рудном Алтае сегодня работает казахстанская компания «КАЗЦИНК». Для аэрогеофизических исследований применяется легкий пятиместный вертолет AS-350B, который после небольшого переоборудования превратился в летающую лабораторию (рис. 2).

Развитие физики принесло не только фундаментальные изменения в представления об окружающем нас мире, с применением современных технологий произошли прогрессивные изменения в обществе. Благодаря современным средствам связи, все население Земли находится в едином информационном пространстве, происходит быстрый обмен новыми технологиями. Главной ценностью становится информация (рис. 3). Достижения науки могут нести как пользу, так и вред окружающей среде и животному миру. Необдуманные действия человека приводят к необратимым и часто разрушительным последствиям

для природы. Использование ядерной энергии и производство веществ, не разлагающихся микроорганизмами, являются яркими примерами человеческой деятельности, приводящей к экологическим проблемам. Дальнейшая судьба человечества зависит от совместного решения глобальных проблем. Наша планета оказалась не такой большой, чтобы принимать решения на местном уровне. Необходимы изменения и в сознании человека: человек – не «царь природы», он – часть природы.

II. Физика – источник знаний об окружающем мире

В процессе исследования природных явлений в XVIII–XIX вв. физики сформировали механическую картину мира, ко второй половине XIX – началу XX в. – электромагнитную картину мира. Теория относительности Эйнштейна, зародившаяся в начале XX в., разрешила противоречия между законами механики и электродинамики. Она стала завершающим этапом в формировании классической физики. Квантовая теория, созданная в то же время, напротив, открыла новый этап исследования материи, она стала началом зарождения совершенно новой современной физики. С середины XX в. формируется современная физическая картина мира.

III. Физика и научно-технический прогресс (НТП)

Научно-технический прогресс (НТП) взаимосвязан с развитием физики. Достижения физики лежат в основе развития техники, а повышение уровня техники создает условия для проведения принципиально новых исследований. В качестве примера можно указать на важнейшие исследования, выполняемые на ядерных реакторах или на ускорителях заряженных частиц. Усиливается техническая оснащенность, создаются новые технологии. НТП выдвинул на передний план проблему применения техники нового типа: электронно-вычислительных машин, автоматизированных систем управления, которые проникли в разнообразные области общественной жизнедеятельности и науки. От эффекта ее практического применения стали непосредственно зависеть успехи в развитии этих важнейших областей. Роль техники и технического знания в жизни современного общества возросла.



Рис. 3. Единое информационное поле Земли



Ответьте на вопросы

1. Почему механическая картина мира была сформирована раньше, чем электромагнитная?
2. Как вы представляете механическую картину мира? Электромагнитную?
3. Почему современная картина мира требует дальнейших исследований?



Задание 2

1. Дополните таблицу 1 известными вам примерами разделов физики и связанных с ними разделов техники и техническими устройствами.
2. На основе ваших примеров выскажите мнение о роли физики и техники в жизни современного общества.



Ответьте на вопрос

Почему научно-технический прогресс невозможно остановить?

Таблица 1. Связь физики с техникой

Раздел физики	Раздел техники. Технические устройства
Динамика	Космонавтика: космические искусственные спутники, орбитальные станции; космические корабли
Аэродинамика	Авиация: аэропланы, самолеты, вертолеты
Тепловые явления	Теплотехника: тепловые двигатели
Электромагнетизм	Электротехника: телеграф, электрические осветители, электродвигатели, электрогенераторы, телефон, линии метрополитена, ускорители заряженных частиц Микроэлектроника: радиосвязь, радиуправление, радиолокация, телевидение, ЭВМ, промышленные роботы. Лазерная техника
Оптика	Оптические приборы: фотоаппараты, телескопы, микроскопы
Радиофизика	Лазерная техника
Ядерная физика	Ядерная энергетика: ядерные реакторы, АЭС

IV. Физика и культура человека

В XXI в. человечество столкнулось с глобальными проблемами, имеющими большое значение для всех стран и народов. Такими проблемами являются загрязнение Мирового океана и земной атмосферы, появление озоновых дыр, усиление воздействия солнечных излучений на биосферу Земли. Современная физика формирует планетарное мышление. Воздействуя на характер и стиль мышления, физика способствует активной жизненной позиции человека, осознанию того, что познавать мир необходимо на протяжении всей жизни. Вчерашние знания зачастую не позволяют решить современные проблемы. Наука физика отличается тем, что в ней есть «опорные точки» – фундаментальные законы. Например, что бы ни менялось в нашем мире, закон сохранения энергии выполняется. Новые знания современной физики базируются на ее фундаментальных законах.

По мере углубления наших знаний происходит постепенное стирание граней между рядом физических

Обратите внимание!

XX в. – век НТР,
XXI в. – век информации.

Задание 3

1. Приведите примеры глобальных проблем, с которыми столкнулось человечество на современном этапе развития.
2. Укажите причины возникновения этих проблем.
3. Предложите ваши пути решения названных проблем.

Ответьте на вопросы

1. Почему позиция «человек – царь природы» приносит вред окружающей среде?
2. Почему человек должен стать частью природы? Что он должен изменить в своей деятельности?
3. Почему, изучая явления природы, мы используем упрощенные модели (материальная точка, свободное падение), вносим ряд условий (отсутствие силы трения, силы сопротивления воздуха)?
4. Почему знание физических законов важно для каждого человека?

понятий. Так стирается грань между понятиями корпускулярного и волнового движения, между веществом и полем. Естественными процессами для элементарных частиц являются взаимопревращения. Все грани в природе условны, относительны, подвижны, они выражают наши умственные возможности восприятия мира. Изучая явления природы, мы создаем упрощенные модели природных явлений. Процесс познания – это процесс постепенного приближения к абсолютной истине. Это не механическое добавление новых фактов к уже известным, а процесс последовательного обобщения, когда новое отрицает старое, но при этом сохраняет все достоверное и фундаментальное, что было накоплено в прошлом. Наши представления о мире непрерывно углубляются и расширяются, процесс познания материального мира бесконечен.

Каждый культурный человек должен представлять, как устроен мир, в котором он живет. Мы имеем множество поучительных примеров, когда природа наказывала нас за наше невежество; пора научиться извлекать из них уроки.

Знания законов природы позволяют человеку находить наиболее оптимальные решения проблем. В этом и есть суть необходимости знаний.

Контрольные вопросы

1. Какую роль играет физика в современном мире?
2. Какие картины мира сформированы в физике?
3. В чем отличие современной и классической физики?
4. Как физика влияет на технику?
5. В чем заключается процесс познания?

★ Упражнение

1

1. Приведите примеры технических устройств, действие которых основано на открытии радиоактивности, электромагнитных волн, ультразвука, реактивного движения.
2. Объясните, каким способом астрофизики узнали состав далеких планет.
3. Установите соответствие между открытием и его применением.

Открытие	Применение
Спектроскопия	Автоматические системы управления
Ультразвук	Расшифровка структур ДНК
Усиление проводимости полупроводников при освещении	Обнаружение подводных объектов

Творческое задание

Подготовьте сообщения об ученых (на выбор): Леонардо да Винчи, М.В. Ломоносов, Ж.Л. Бюффон, В.И. Вернадский.

§ 2. Погрешности физических величин. Обработка результатов измерений

Ожидаемый результат

Прочитав параграф, вы сможете:

- различать систематические и случайные ошибки;
- определять зависимые, независимые и контролируемые (постоянные) физические величины;
- записывать конечный результат экспериментальных исследований, исходя из точности измерений физических величин.

I. Виды измерений.

Причины погрешности измерений

Измерения физических величин по виду могут быть прямыми и косвенными. При прямых измерениях числовое значение величины определяется непосредственно в процессе считывания со шкалы измерительного прибора. Измерения называют косвенными, если искомая величина рассчитывается по формуле связи с величинами, которые определяются прямым измерением. Результат любого измерения является приближенным. Точность измерения характеризуется погрешностью.

Погрешность измерения – это отклонение измеренного значения величины от ее истинного значения.

Задание 1

1. Приведите примеры прямых и косвенных измерений физических величин.
2. Укажите основные причины погрешности измерений в приведенных вами примерах.
3. Назовите причины, которые приводят к случайным погрешностям.

Причины погрешности измерений: ограниченная точность измерительного прибора; отклонение от нормальных условий использования измерительного прибора; приближенный характер законов, используемых для нахождения измеряемых величин; несовершенство метода постановки опыта.

Перечисленные причины приводят к случайным или систематическим погрешностям.

II. Случайные и систематические погрешности

Случайная погрешность – это погрешность, изменяющаяся случайным образом в серии повторных измерений одной и той же величины, проведенных в одних и тех же условиях.

Она вызвана большим числом неконтролируемых причин, влияющих на процесс измерения, например, дуновением ветра или скачком напряжения. Влияние случайных погрешностей может быть уменьшено многократным повторением опыта.

Систематическая погрешность – это погрешность, которая остается постоянной или закономерно изменяется со временем при повторных измерениях одной и той же величины.

Возьмите на заметку

Если при измерении получена относительная погрешность более 10 %, то говорят, что произведена лишь оценка измеряемой величины. В лабораториях физического практикума рекомендуется проводить измерения с относительной погрешностью до 10 %.

Примером систематической погрешности, закономерно изменяющейся во времени, может служить смещение настройки прибора. Систематическая ошибка повторными измерениями не устраняется. Ее устраняют с помощью поправок или меняют постановку эксперимента.

III. Абсолютная и относительная погрешности при прямом многократном измерении величины

Для определения абсолютной погрешности проводятся повторные измерения физической величины A при одних и тех же условиях. В этом случае *приближенное значение* измеряемой величины A_{np} находят как среднее арифметическое значение всех измерений:

$$A_{np} = \frac{A_1 + A_2 + \dots + A_n}{n}.$$

Случайную погрешность в каждом измерении ΔA_n определяют, используя формулу:

$$\Delta A_n = |A_{np} - A_n|,$$

где n – порядковый номер измерения.

Абсолютную погрешность определяют как среднее арифметическое значение случайных погрешностей всех измерений:

$$\Delta A = \frac{\Delta A_1 + \Delta A_2 + \dots + \Delta A_n}{n}.$$

Модуль абсолютной погрешности измерения позволяет указать интервал, внутри которого находится истинное значение измеряемой величины. Длина этого интервала равна $2\Delta A$. Все значения, входящие в интервал, считаются достоверными.

Относительная погрешность характеризует качество измерения. Она определяется по формуле:

$$\varepsilon = \frac{\Delta A}{A_{np}} \cdot 100\%.$$

IV. Прямые однократные измерения и их погрешности

Для большинства измерительных приборов инструментальная погрешность задается классом



Задание 2

На тренировочных забегах на дистанции 100 м легкоатлет показал следующие результаты: 11,5 с; 11,7 с; 12,0 с; 11,8 с; 11,2 с. Определите приближенное значение времени и абсолютную погрешность.



Задание 3

Определите инструментальную погрешность вольтметра, изображенного на рисунке 4.



Рис. 4. Шкала вольтметра с классом точности 2



Возьмите на заметку

Абсолютная погрешность отсчета $\Delta_{отсч}$ равна половине цены деления шкалы прибора:

$$\Delta_{отсч} = \frac{c}{2},$$

где c – цена деления шкалы прибора.

точности, который указывается на шкале или в паспорте прибора. Зная класс точности γ и предел измерения прибора, можно определить абсолютную инструментальную погрешность:

$$\Delta_u = \frac{\text{предел измерения} \cdot \gamma}{100}.$$

Абсолютная погрешность измерений не превышает инструментальную, если указатель совпадает со штрихом шкалы:

$$\Delta = \Delta_u.$$

Абсолютная погрешность возрастает на значение погрешности отсчета, если указатель не совпадает со штрихом шкалы:

$$\Delta = \Delta_u + \Delta_{\text{отсч}}.$$

V. Косвенные измерения и их погрешности

При проведении косвенных измерений оценку достоверности результата измерений необходимо проводить в следующем порядке:

1. Выполнить прямые измерения величин, входящих в формулу расчета заданной величины.
2. Рассчитать абсолютные и относительные погрешности этих измерений.
3. Вычислить по формуле расчета искомую величину $A_{\text{пр}}$.
4. По виду формулы определить относительную погрешность ε результата косвенных измерений (таблица 2).
5. Найти абсолютную погрешность по формуле: $\Delta A = A_{\text{пр}} \cdot \varepsilon$.
6. Указать интервал достоверных значений искомой величины.

$$A_{\text{пр}} - \Delta A \leq A \leq A_{\text{пр}} + \Delta A.$$

Таблица 2. Соответствие формул абсолютной и относительной погрешности формуле искомой величины

Вид функции	Абсолютная погрешность	Относительная погрешность
$f = x + y$	$\Delta f = \Delta x + \Delta y$	$\varepsilon_f = \frac{\Delta x + \Delta y}{x + y}$
$f = x - y$	$\Delta f = \Delta x + \Delta y$	$\varepsilon_f = \frac{\Delta x + \Delta y}{x - y}$
$f = x \cdot y$	$\Delta f = x\Delta y + y\Delta x$	$\varepsilon_f = \varepsilon_x + \varepsilon_y$
$f = \frac{x}{y}$	$\Delta f = \frac{x\Delta y + y\Delta x}{y^2}$	$\varepsilon_f = \varepsilon_x + \varepsilon_y$
$f = x^n$	$\Delta f = n \cdot x^{n-1} \cdot \Delta x$	$\varepsilon_f = n \cdot \varepsilon_x$
$f = \sqrt[n]{x}$	$\Delta f = \frac{\Delta x}{n \cdot \sqrt[n]{x^{n-1}}}$	$\varepsilon_f = \frac{1}{n} \cdot \varepsilon_x$

Если $f = x \pm y$, то сразу вычисляется абсолютная погрешность.

VI. Оценка погрешности измерений при определении табличных величин

При измерении табличной или постоянной физической величины оценка погрешности производится в результате сравнения полученного значения с известной (табличной) величиной:

$$\Delta A = |A_{\text{пр}} - A_{\text{табл}}|.$$

Относительная погрешность определяется отношением:

$$\varepsilon_A = \frac{|A_{\text{пр}} - A_{\text{табл}}|}{A_{\text{табл}}} \cdot 100\%.$$

Она служит оценкой качества измерений.

VII. Графическое представление результатов эксперимента при совместном измерении величин

Результаты эксперимента представляют графически, когда устанавливают вид функциональной связи между величинами. В результате измерений величин A и B получают не точку, а область со сторонами $2\Delta A$ и $2\Delta B$ (ΔA и ΔB – абсолютные погрешности измеряемых величин). Каждая точка этой области является достоверной, поэтому проводить линию графика нужно через эти области так, чтобы она соответствовала функциональной зависимости величин (рис. 5).

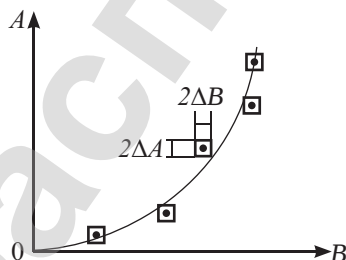


Рис. 5. График зависимости A от B с указанием достоверных интервалов этих величин

VII. Запись результатов измерений с учетом погрешностей

Запись результата измерений с учетом погрешности выполняется по следующему правилу:

Погрешность округляется до одной значащей цифры с завышением, а результат измерения – до числа знаков, не превышающих того, с которым записана погрешность.

Например, если в результате вычислений абсолютная погрешность получилась равной $\Delta A = 0,0769$, то это число нужно округлить до одной значащей цифры с завышением: $\Delta A = 0,08$. Тогда приближенное значение величины $A_{\text{пр}} = 0,928514$ нужно записать с точностью, не превышающей точности абсолютной погрешности. При этом все последующие цифры отбрасываются независимо от их значения $A_{\text{пр}} \approx 0,92$. Интервал, которому принадлежит истинное значение величины, запишется в виде:

$$A = 0,92 \pm 0,08 \text{ при } \varepsilon = \frac{0,08}{0,92} \cdot 100\% \approx 9\%.$$



Задание 4

Запишите результат измерений напряжения вольтметром с классом точности 2,5 (рис. 6) и пределом измерений 15 В, если его показание будет равным 3 В.



Рис. 6. Лабораторный вольтметр класса точности 2,5

Контрольные вопросы

1. В чем различия прямых и косвенных измерений?
2. Какие основные причины погрешности измерений вам известны?
3. Какие погрешности называют случайными? Какие систематическими?
4. Каким способом устраняют систематические погрешности?
5. Каким способом уменьшают случайные погрешности измерений?
6. Как определяют абсолютную и относительную погрешности при многократном прямом измерении?
7. Чему равна инструментальная погрешность?
8. Как определяют погрешности при косвенном измерении?
9. Как записывают результаты измерений с учетом погрешности?



Упражнение

2

1. Напряжение на участке цепи определили дважды, подключив вольтметр (рис. 4), затем другой (рис. 6). Вольтметр показал 2,8 В в обоих случаях. Определите достоверный интервал значений напряжения для двух измерений. В каком случае измерение было более точным?
2. Сопротивление участка цепи определили косвенным измерением с использованием амперметра и вольтметра. Класс точности вольтметра 4, амперметра 2,5. Укажите достоверный диапазон значений сопротивления участка цепи, если показания приборов были следующими: 4,2 В; 0,3 А. Максимальные значения напряжения и силы тока, которые можно измерить приборами равны 6 В и 2 А соответственно.

Экспериментальное задание

Определите температуру комнаты прямым, а плотность картофеля – косвенным измерением. Рекомендуемые измерительные приборы: термометр, весы и мензурка. Результаты запишите с учетом погрешности.

Творческое задание

Подготовьте сообщение по темам (на выбор):

1. «Метрология, стандартизация и сертификация».
2. «Метрологическая служба Республики Казахстан».

§ 3. Основные понятия и уравнения кинематики равноускоренного движения тела

Ожидаемый результат

Прочитав параграф, вы сможете:

- выводить формулу перемещения при равноускоренном движении тела, используя графическую зависимость скорости от времени;
- применять кинематические уравнения при решении расчетных и графических задач.



Ответьте на вопрос

Почему при изучении движения тела в кинематике используют как скорость перемещения, так и путевую скорость?

I. Основная задача кинематики

Для описания движения тел в кинематике используют следующие величины: ускорение, скорость перемещения, скорость путевая, перемещение, пройденный путь, координата тела, время; а также физические понятия: система отсчета, тело отсчета, система координат, траектория, относительность движения, механическое движение. Движения тел отличаются друг от друга: траектория может быть прямолинейной и криволинейной, скорость движения одних тел постоянная, других – переменная.

Основная задача кинематики – установление способов задания движения материальных точек или тел и определение соответствующих кинематических характеристик этих движений.

II. Координатный метод решения задач

Решение задач кинематики координатным методом предполагает переход от действий с векторами к действиям со скалярными величинами. Из курса физики 9 класса нам известно, что соотношения векторных

величин и их проекций не отличаются друг от друга. Например, формулу расчета ускорения в векторном виде $\vec{a} = \frac{\vec{v} - \vec{v}_0}{\Delta t}$ можно записать через проекции векторов $a_x = \frac{v_x - v_{0x}}{\Delta t}$, равенство при этом не нарушится. Проекции векторов являются скалярными величинами, следовательно, сложение, вычитание, умножение и деление производятся с ними как с обычными числами.

Последовательность действий при координатном методе решения задач следующая: выбирают оси координат, находят проекции заданных векторов; выполняя действия над ними, определяют проекции неизвестной векторной величины на выбранные оси.

При известном значении проекций вектора на координатные оси можно определить его модуль. Например, если вектор ускорения параллелен оси Ox , то его модуль равен проекции на эту ось (рис. 7, а):

$$a = a_x.$$

В случае, когда рассматриваемый вектор имеет проекции на оси Ox и Oy (рис. 7, б), его модуль определяют по теореме Пифагора:

$$a = \sqrt{a_x^2 + a_y^2}.$$

При использовании трех осей координат для описания движения тела (рис. 7, в) модуль ускорения будет равен:

$$a = \sqrt{a_x^2 + a_y^2 + a_z^2}.$$

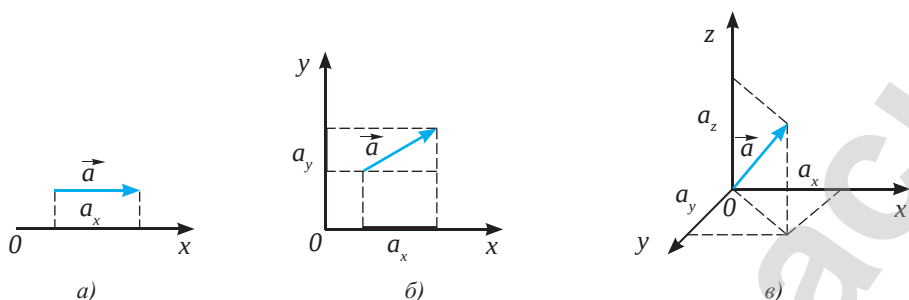


Рис. 7. Проекция вектора на выбранные оси координат

III. Формулы кинематики для прямолинейного равнопеременного движения

В таблице 3 представлены формулы расчета величин, характеризующих прямолинейное равнопеременное движение тела: ускорения a_x , скорости перемещения v_x , перемещения s_x и координаты тела x . Свободное падение тел является частным случаем прямолинейного равнопеременного движения, в этом случае тело движется с ускорением, равным $g = 9,8 \frac{M}{c^2}$.

Таблица 3. Формулы кинематики

Физические величины	Вид движения	
	Прямолинейное равнопеременное	Свободное падение
Ускорение	$a_x = \frac{v_x - v_{0x}}{\Delta t}$	$g = 9,8 \frac{M}{c^2}$
Средняя скорость	$v_{cp.x} = \frac{v_0 + v_x}{2}$	$v_{cp.y} = \frac{v_0 + v_y}{2}$
Мгновенная скорость	$v_x = v_{0x} + a_x t$	$v_y = v_{0y} + g_y t$
Перемещение	$s_x = v_{0x} t + \frac{a_x t^2}{2}$	$h_y = v_{0y} t + \frac{g_y t^2}{2}$
	$s_x = \frac{v_x^2 - v_{0x}^2}{2a_x}$	$h_y = \frac{v_y^2 - v_{0y}^2}{2g_y}$
	$s_x = \frac{v_0 + v}{2} t$	$h_y = \frac{v_0 + v}{2} t$
Координата тела	$x(t) = x_0 + v_{0x} t + \frac{a_x t^2}{2}$	$y(t) = y_0 + v_{0y} t + \frac{g_y t^2}{2}$

Уравнение зависимости координаты тела от времени движения называют законом движения. Формулы равномерного прямолинейного движения можно получить из формул равнопеременного, учитывая, что $a = 0$.

IV. Отношение перемещений при равнопеременном движении за равные последующие промежутки времени

Пусть начальная скорость тела равна $v_0 = 0$, перемещение тела за время t определим по формуле: $s_1 = \frac{at^2}{2}$. Перемещение за время равное $2t$ равно $s_2 = \frac{a(2t)^2}{2} = 4 \frac{at^2}{2}$. Следовательно, за второй промежуток времени t тело переместилось на расстояние:

$$s_{12} = s_2 - s_1 = 4 \frac{at^2}{2} - \frac{at^2}{2} = 3 \frac{at^2}{2}.$$

Аналогично определим перемещение тела за третий промежуток времени t :

$$s_{23} = s_3 - s_2 = 9 \frac{at^2}{2} - 4 \frac{at^2}{2} = 5 \frac{at^2}{2}.$$

Из полученных результатов следует, что *перемещения, пройденные телом за равные последующие промежутки времени, относятся как ряд нечетных чисел*:

$$s_1 : s_{12} : s_{23} \dots = 1 : 3 : 5 \dots$$

V. Графики зависимости величин, характеризующих прямолинейное равнопеременное движение тел, от времени

При построении графиков зависимости физических величин используются математические методы. Для построения графика величин с линейной зависимостью достаточно двух точек. График квадратичной зависимости величин представляет собой параболу, он требует расчета и построения большего числа точек (таблица 4).

График зависимости модуля величины от времени располагается над осью времени, так как модуль числа имеет только положительные значения.

Несложно доказать, что площадь фигуры под графиком зависимости скорости от времени численно равна перемещению тела.



Ответьте на вопрос

Почему значение средней скорости справедливо только для определенного участка пути?

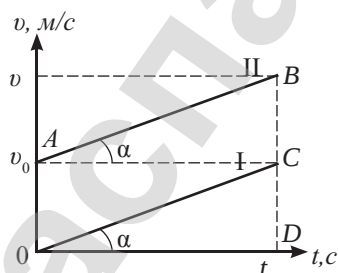


Рис. 8. Графики зависимости скорости от времени при равнопеременном движении



Задание

Используя графики рис. 8, докажите, что:

- 1) тангенс угла α численно равен ускорению движущихся тел I и II;
- 2) площадь треугольника OCD численно равна перемещению первого тела $s_1 = \frac{at^2}{2}$;
- 3) площадь трапеции OABD численно равна перемещению второго тела $s_2 = v_0 t + \frac{at^2}{2}$.



Ответьте на вопрос

Почему ускорение движущегося тела можно определить, как тангенс угла наклона на графике зависимости скорости тела от времени?

Таблица 4. Графики зависимости кинематических величин от времени

Физическая величина	Уравнение зависимости величины от времени, вид зависимости	График зависимости проекции величины от времени	График зависимости модуля величины от времени
Ускорение	$a_x = const$ ускорение не зависит от времени		
Мгновенная скорость	$v_x = v_{0x} + a_x t$ скорость зависит от времени прямо пропорционально		
Перемещение	$s_x = v_{0x} t + \frac{a_x t^2}{2}$ Зависимость перемещения от времени представляет собой квадратичную функцию		
Координата	$x(t) = x_0 + v_{0x} t + \frac{a_x t^2}{2}$ координата тела – квадратичная функция времени		I: $x_{01} < 0, v_{0x} > 0, a_x > 0$ II: $x_{02} > 0, v_{0x} > 0, a_x < 0$

ПРИМЕР РЕШЕНИЯ ЗАДАЧИ

Определите высоту, с которой упало тело, если время его падения составило 5 с. Какое расстояние оно проходит за каждую очередную секунду?

Дано:

$$t = 5 \text{ с}$$

$$g = 9,8 \text{ м/с}^2$$

$$v_0 = 0$$

$$H = ?$$

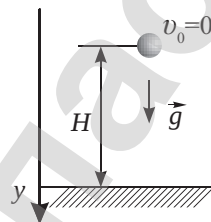
$$h_1 = ? \quad h_2 = ?$$

$$h_3 = ? \quad h_4 = ? \quad h_5 = ?$$

Решение:

Изобразим на рисунке тело, направление вектора ускорения свободного падения $\vec{g}$, ось Oy . Совместим начальное положение тела с нулевым уровнем высоты. Обозначим высоту полета буквой H .

Координата тела при свободном падении меняется по закону:



$$y = y_0 + v_{0y}t + \frac{g_y t^2}{2}. \quad (1)$$

Формула (1) в проекции на ось Oy примет вид: $H = \frac{gt^2}{2}$.

$$H = \frac{9,8 \text{ м/с}^2 \cdot 25 \text{ с}^2}{2} \approx 125 \text{ м}.$$

За первую секунду тело переместилось на расстояние $h_1 = \frac{gt_1^2}{2}$

$$h_1 = \frac{9,8 \text{ м/с}^2 \cdot 1 \text{ с}^2}{2} \approx 5 \text{ м}.$$

Отношение перемещений за каждую очередную секунду определяется отношением ряда нечетных чисел:

$$h_1 : h_2 : h_3 : h_4 : h_5 = 1 : 3 : 5 : 7 : 9. \quad (2)$$

Следовательно, $\frac{h_1}{h_2} = \frac{1}{3}$ или $h_2 = 3h_1$, таким образом: $h_2 = 15 \text{ м}$.

Аналогично определим: $h_3 = 25 \text{ м}$, $h_4 = 35 \text{ м}$, $h_5 = 45 \text{ м}$.

Ответ: $H = 125 \text{ м}$; $h_1 = 5 \text{ м}$; $h_2 = 15 \text{ м}$; $h_3 = 25 \text{ м}$; $h_4 = 35 \text{ м}$; $h_5 = 45 \text{ м}$.

Контрольные вопросы

1. В чем заключается основная задача кинематики?
2. Назовите величины, характеризующие движение тел, дайте им определения.
3. Какое соотношение выполняется для перемещений тела за равные последующие промежутки времени?

1. Двигаясь равноускоренно, тело проходит путь $s_1 = 2$ м за первые $t_1 = 4$ с, а следующий участок длиной $s_2 = 4$ м за $t_2 = 5$ с. Определите ускорение тела.
2. С высоты 10 м над землей падает камень. Одновременно с высоты 8 м вертикально вверх бросают другой камень. С какой начальной скоростью был брошен второй камень, если камни столкнулись на высоте 5 м над землей? Сопротивление воздуха не учитывать, ускорение свободного падения принять равным 10 м/с^2 .

3. Тело имело начальную скорость 5 м/с и прошло за пятую секунду путь, равный $4,5$ м. Определите ускорение тела.

4. На рисунке 9 изображен график зависимости скорости движения тела от времени на прямолинейном участке пути.



Рис. 9. К упражнению 3.4

- 1) Определите ускорение, с которым тело двигалось на каждом участке пути. Какой путь пройден телом? Каково его перемещение?
- 2) Напишите закон движения тела для первых двух участков пути.
- 3) Изобразите графики зависимости перемещения и координаты тела от времени для этих участков, если начальная координата тела равна $x_0 = 5$ м.

5. Нырняя в воду за рыбой, пеликаны совершают свободное падение (рис. 10). На какой высоте рыба должна заметить пеликана, чтобы сманеврировать и уклониться от нападения, если для этого необходимо $0,15$ с? Предположим, что падение пеликана происходит с высоты 5 м, а рыба находится у поверхности воды. Ускорение свободного падения примите равным 10 м/с^2 , ответ запишите с точностью до сотых.



Рис. 10. К упражнению 3.5

Экспериментальное задание

Определите тормозной путь вашего велосипеда (автомобиля) и ускорение, с которым вы двигались. Продумайте, как вы определите начальную скорость.

Творческое задание

Подготовьте сообщение по темам (на выбор):

1. «Способы уменьшения тормозного пути различных видов транспорта».
2. «Как рассчитывают взлетно-посадочную полосу для летательных аппаратов?»

§ 4. Инвариантные и относительные физические величины. Принцип относительности Галилея

Ожидаемый результат

Прочитав параграф, вы сможете:

- различать инвариантные и относительные физические величины;
- применять классический закон сложения скоростей и перемещений при решении задач.

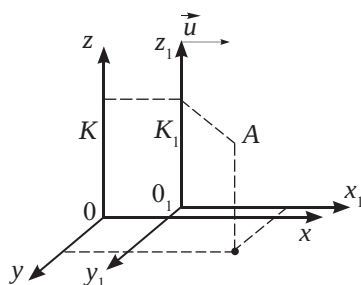


Рис. 11. K – неподвижная система отсчета относительно наблюдателя, K_1 – подвижная система отсчета

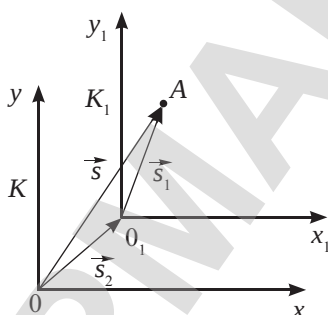


Рис. 12. Перемещение точки A для наблюдателей, находящихся в различных системах отсчета

I. Относительность механического движения. Инвариантные и относительные величины

Кинематические понятия, характеризующие механическое движение – траектория, координата, перемещение, скорость, – при переходе из одной инерциальной системы отсчета в другую могут изменяться. В этом состоит относительность механического движения. Если при переходе из одной системы отсчета в другую величина меняется, то ее называют относительной. Если величина остается неизменной, то она является инвариантной.

Важным вопросом кинематики является установление связи между кинематическими величинами, характеризующими механическое движение в различных системах координат, движущихся относительно друг друга.

II. Преобразования Галилея

Определим положение материальной точки в декартовых системах координат, принятых в системах отсчета K и K_1 , движущихся относительно друг друга со скоростью $\vec{u}$ (рис. 11). В системе отсчета K_1 координаты точки A имеют значения x_1, y_1, z_1 . В неподвижной системе отсчета координата x точки A отличается от координаты x_1 на значение $u_x t$, так как за время t подвижная система отсчета переместилась вдоль оси Ox относительно неподвижной системы на расстояние $OO_1 = u_x t$. Координаты y, z и y_1, z_1 одинаковы в обеих системах отсчета. Время в рассматриваемых системах отсчета течет одинаково. Преобразования координат при переходе из системы K_1 в систему K , установленные Галилеем, имеют вид:

$$\begin{aligned} x &= x_1 + ut \\ y &= y_1 \\ z &= z_1 \\ t &= t_1 \end{aligned} \quad (1)$$

При одновременном смещении подвижной системы отсчета относительно неподвижной вдоль осей Ox, Oy и Oz преобразования Галилея примут вид:

$$\begin{aligned} x &= x_1 + u_x t \\ y &= y_1 + u_y t \\ z &= z_1 + u_z t \\ t &= t_1 \end{aligned}$$

В этом случае модуль скорости перемещения подвижной системы отсчета относительно неподвижной равен:

$$u = \sqrt{u_x^2 + u_y^2 + u_z^2}. \quad (2)$$

Координаты тела являются относительными величинами, время для тел, движущихся с малыми скоростями, инвариантно.

III. Правило сложения перемещений

Рассмотрим движение тела по плоскости, в этом случае его местоположение определяется двумя координатами. Выберем системы координат, одна из которых связана с покоящимся телом, другая – с движущимся телом. Пусть в начальный момент времени точки O_1 и O совпадают с положением рассматриваемого тела. Через некоторое время t тело переместится в точку A . Точка O_1 подвижной системы отсчета (ПСО), двигаясь со скоростью $\vec{u}$ относительно точки O , переместится на $\vec{s}_2 = \vec{u}t$ (рис. 12).

Перемещение рассматриваемого тела относительно неподвижной системы отсчета (НСО) обозначим $\vec{s}$, относительно подвижной системы отсчета (ПСО) – $\vec{s}_1$.

Из правила сложения векторов следует:

$$\vec{s} = \vec{s}_1 + \vec{s}_2. \quad (3)$$

Перемещение тела относительно НСО равно геометрической сумме перемещений тела относительно ПСО и перемещения ПСО относительно НСО. Перемещение – относительная величина.

В проекциях на оси Ox и Oy формула сложения перемещений примет вид:

$$\begin{aligned} s_x &= s_{1x} + s_{2x} \\ s_y &= s_{1y} + s_{2y}. \end{aligned}$$

Поскольку $s_x = x$, $s_{1x} = x_1$, $s_y = y$, $s_{1y} = y_1$ (рис. 12), формулы в проекциях на выбранные оси можно записать в виде:

$$\begin{aligned} x &= x_1 + s_{2x} \\ y &= y_1 + s_{2y}. \end{aligned} \quad (4)$$

Если ПСО движется со скоростью u_x по оси Ox и u_y по оси Oy относительно НСО, то записанные выше уравнения примут вид:

$$\begin{aligned} x &= x_1 + u_x t \\ y &= y_1 + u_y t. \end{aligned} \quad (5)$$

В результате сложения перемещений мы получили преобразования Галилея для тела, движущегося по плоскости.



Эксперимент в классе

Определите перемещение двух учащихся по двум взаимно перпендикулярным направлениям относительно точки начала движения и относительно друг друга. Назовите НСО, ПСО и движущееся тело в поставленном эксперименте.



Ответьте на вопрос

Как влияет выбор точки отсчета на перемещение учащихся относительно друг друга?



Ответьте на вопрос

Почему мы принимаем Землю за НСО и не учитываем ни ее суточное вращение, ни вращение вокруг Солнца?

IV. Правило сложения скоростей

Учтем, что $\vec{s}_1 = \vec{v}_1 t$, $\vec{s}_2 = \vec{u} t$, $\vec{s} = \vec{v} t$, тогда выражение (1) примет вид $\vec{v} t = \vec{v}_1 t + \vec{u} t$, или:

$$\vec{v} = \vec{v}_1 + \vec{u}. \quad (6)$$

Скорость тела относительно НСО равна геометрической сумме скорости тела относительно ПСО и скорости ПСО относительно НСО.

Для большей наглядности и удобства расчета скоростей используют понятия относительной и переносной скорости.

Относительная скорость – это скорость тела относительно подвижной системы отсчета.

Переносная скорость – это скорость подвижной системы отсчета относительно неподвижной.

Например, пловец движется относительно воды с относительной скоростью $\vec{v}_{отн} = \vec{v}_1$ (рис. 13), течение относит его с переносной скоростью $\vec{v}_n = \vec{u}$ относительно берега. Пловец движется относительно берега со скоростью $\vec{v}$. Таким образом, формула сложения скоростей примет вид:

$$\vec{v} = \vec{v}_{отн} + \vec{v}_n.$$

Скорость тела – относительная величина.

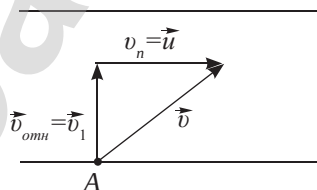


Рис. 13. Направление скорости пловца относительно воды $\vec{v}_1$ и наблюдателя А – $\vec{v}$.

V. Относительная скорость двух тел

Пусть два тела А и В движутся со скоростями $\vec{v}_A$ и $\vec{v}_B$ относительно земли (рис. 14, а). Определим скорость тела В относительно тела А. Для этого необходимо тело А принять за НСО, т.е. мысленно переместившись на это тело, рассмотреть движение окружающих тел. Все тела вместе с землей будут перемещаться в пространстве со скоростью равной по модулю скорости точки А, но направленной в противоположную сторону (рис. 14, б). Таким образом, для определения скорости движения точки В относительно А необходимо воспользоваться формулой сложения векторов:

$$\vec{v} = \vec{v}_B + \vec{v}_n$$

или с учетом соотношения $\vec{v}_n = -\vec{v}_A$ получим:

$$\vec{v} = \vec{v}_B - \vec{v}_A.$$



Ответьте на вопросы

1. Почему в системах отсчета, движущихся относительно друг друга с постоянной скоростью, ускорение тела имеет одно и то же значение?
2. Почему, выбрав движущееся относительно земли тело за НСО, мы должны мысленно перебраться на это тело и рассмотреть движение окружающих тел относительно него?

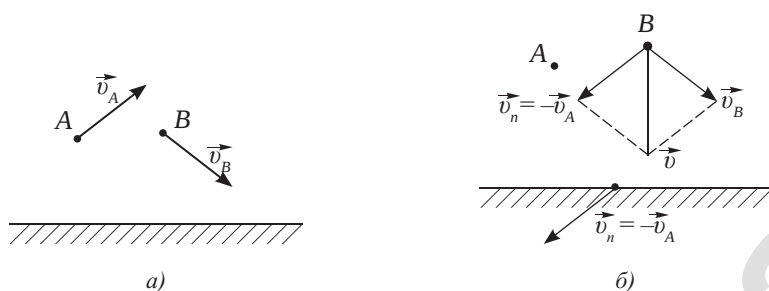


Рис. 14. Нахождение направления скорости точки B относительно точки A

Относительная скорость двух тел определяется как разность векторов их скоростей. Если в результате вычитания скоростей образуется треугольник с произвольными углами, то числовое значение неизвестной скорости определяют по теореме косинусов:

$$v = \sqrt{v_B^2 + v_A^2 - 2v_B v_A \cos \alpha},$$

или по теореме синусов:

$$\frac{v}{\sin \alpha} = \frac{v_B}{\sin \beta} = \frac{v_A}{\sin \gamma}.$$

Контрольные вопросы

1. В чем заключается относительность движения тел?
2. Какие величины связывают преобразования Галилея?
3. Какие следствия преобразований Галилея вам известны?
4. Как определяется относительная скорость двух тел?

★ Упражнение

4

1. Два автобуса движутся в одном направлении. Модули их скоростей равны соответственно 90 км/ч и 60 км/ч. Чему равна скорость первого автобуса относительно второго и второго относительно первого?
2. По двум параллельным железнодорожным путям навстречу друг другу движутся два поезда со скоростями 72 км/ч и 108 км/ч. Длина первого поезда 800 м, а второго – 200 м. В течение какого времени один поезд проходит мимо другого?
3. Какую скорость относительно воды должен сообщить мотор катеру, чтобы при скорости течения реки равной 2 м/с, катер двигался перпендикулярно берегу со скоростью 3,5 м/с относительно берега?
4. Эскалатор метро спускает идущего по нему вниз человека за 1 мин. Если человек будет идти вдвое быстрее, то он спустится за 45 с. Сколько времени будет спускаться человек, стоящий на эскалаторе? Какова длина

эскалатора, если скорость эскалатора $0,9$ м/с. Сколько времени спускает пассажиров эскалатор на станции «Жибек Жолы» (рис. 15), если ее длина составляет 104 м?



Рис. 15. Станция «Жибек Жолы» Алматинского метрополитена

Экспериментальное задание

Используя секундомер и измерительную ленту, определите относительные скорости перемещения двух учащихся при движении в одну сторону и в противоположные стороны. Проведите анализ полученных результатов.

Творческое задание

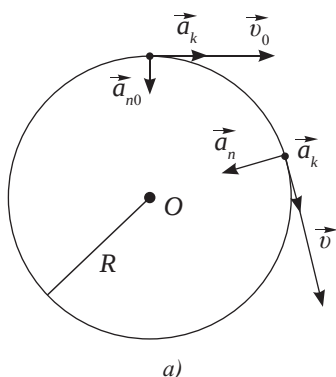
Подготовьте сообщение на тему: «Использование относительности движения в различных сферах деятельности: в промышленности, сельском хозяйстве, цирковых аттракционах, авиации, различных видах спорта и т.п.».

§ 5. Кинематика криволинейного движения

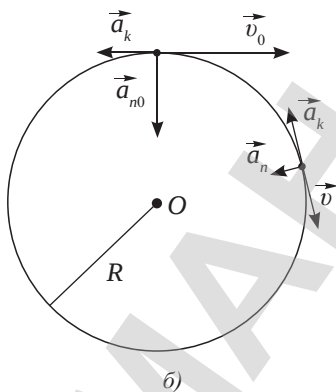
Ожидаемый результат

Прочитав параграф, вы сможете:

- определить тангенциальное, центростремительное и полное ускорения тела при криволинейном движении.



а)



б)

Рис. 16. Равнопеременное движение материальной точки по окружности

При изучении движения тела, движущегося по любой кривой линии, траекторию можно представить как сочетание прямолинейных участков и дуг окружностей соответствующего радиуса. Рассмотрим движение тела по окружности.

I. Линейные величины, характеризующие равнопеременное движение тела по окружности

При равнопеременном движении тела по окружности его линейная скорость изменяется на одно и то же значение за любые равные промежутки времени. При равноускоренном движении (рис. 16, а):

$$v = v_0 + a_k t, \quad (1)$$

при равнозамедленном (рис. 16, б):

$$v = v_0 - a_k t. \quad (2)$$

В формулах (1) и (2) ускорение $a_k = \frac{\Delta v}{\Delta t}$ называют *касательным*, или *тангенциальным*. Оно направлено вдоль касательной к траектории по направлению линейной скорости или в сторону, противоположную ей. Если радиус окружности R остается постоянной величиной, то в результате изменения линейной скорости центростремительное ускорение становится переменной величиной. Выше сказано, что линейная скорость изменяется на одну и ту же величину за любые равные промежутки времени. Значит, ускорение должно быть постоянным по модулю.

$$a_n = \frac{v^2}{R}.$$

Центростремительное ускорение называют *нормальным*, так как оно направлено под углом 90° к скорости, его обозначают буквой a_n .

Определим полное ускорение тела, движущегося равнопеременно по окружности (рис. 17):

$$\vec{a} = \vec{a}_k + \vec{a}_n.$$

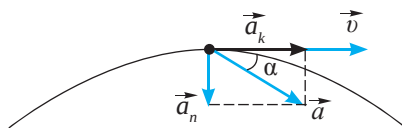


Рис. 17. Полное ускорение и его составляющие: касательное и нормальное ускорения

Составляющие полного ускорения $\vec{a}_k$ и $\vec{a}_n$ взаимно перпендикулярны, так как касательная к окружности перпендикулярна радиусу. Согласно теореме Пифагора полное ускорение равно:

$$a = \sqrt{a_n^2 + a_k^2}. \quad (3)$$

При известном значении угла между скоростью и полным ускорением нормальное и касательное ускорение можно связать формулой: $\operatorname{tg} \alpha = \frac{a_n}{a_k}$, или

$$a_k = \frac{a_n}{\operatorname{tg} \alpha}.$$

При равнопеременном движении по окружности вектор ускорения направлен внутрь окружности. Тангенциальная (касательная) составляющая этого вектора характеризует изменение скорости по модулю, а нормальная (центростремительная) составляющая – по направлению.

II. Угловые величины, характеризующие движение тела по окружности

При равнопеременном движении, кроме угловой скорости ω и углового перемещения φ , необходимо ввести понятие углового ускорения ε .

Угловое ускорение – это физическая величина, характеризующая быстроту изменения угловой скорости.

$$\varepsilon = \frac{\omega - \omega_0}{\Delta t} \text{ – для равноускоренного движения, } (4)$$

$$\varepsilon = \frac{\omega_0 - \omega}{\Delta t} \text{ – для равнозамедленного движения. } (5)$$

Единица измерения углового ускорения $[\varepsilon]$ – 1 рад/с^2 , угловой скорости $[\omega]$ – 1 рад/с .

Из формул (4), (5) выразим мгновенное значение угловой скорости:

$$\omega = \omega_0 \pm \varepsilon t.$$

Полученная формула аналогична формулам для расчета линейной скорости при равнопеременном движении. Следовательно, формулы углового перемещения будут иметь такой же вид, как и формулы для расчета линейного перемещения.



Ответьте на вопросы

1. Почему касательное ускорение называют тангенциальным?
2. Почему полное ускорение равнопеременного движения по окружности постоянного радиуса определяют по теореме Пифагора?



Задание 1

Укажите сходства и различия формул расчета линейных и угловых величин.



Ответьте на вопрос

Почему угловые величины более удобны для описания движения тела по окружности?



Вспомните!

Соотношение линейных величин с угловыми:

$$\begin{aligned} l &= \varphi R; \\ v &= \omega R; \\ a_n &= \omega^2 R. \end{aligned}$$



Запомните!

$$\begin{aligned} a_k &= \varepsilon R; \\ a &= R\sqrt{\omega^4 + \varepsilon^2}. \end{aligned}$$

Для равноускоренного движения по окружности:

$$\varphi = \omega_0 t + \frac{\varepsilon t^2}{2}, \quad \varphi = \frac{\omega^2 - \omega_0^2}{2\varepsilon},$$

для равнозамедленного движения по окружности:

$$\varphi = \omega_0 t - \frac{\varepsilon t^2}{2}, \quad \varphi = \frac{\omega_0^2 - \omega^2}{2\varepsilon}.$$

Введем среднее значение угловой скорости

$$\omega_{cp} = \frac{\omega_0 + \omega}{2},$$

тогда угловое перемещение можно определить по формуле:

$$\varphi = \frac{\omega_0 + \omega}{2} t.$$

III. Связь линейных и угловых величин

Установим связь между ускорениями. В формуле

(4) заменим угловую скорость на линейную

$\varepsilon = \frac{\frac{v}{R} - \frac{v_0}{R}}{t} = \frac{v - v_0}{tR} = \frac{a_k}{R}$. Таким образом угловое ускорение связано с касательным, или тангенциальным, ускорением соотношением:

$$a_k = \varepsilon R. \quad (6)$$

Получим соотношение полного ускорения с угловыми величинами, используя формулы (3) и (6):

$$a = \sqrt{a_n^2 + a_k^2} = \sqrt{\omega^4 R^2 + \varepsilon^2 R^2} = R\sqrt{\omega^4 + \varepsilon^2},$$

$$a = R\sqrt{\omega^4 + \varepsilon^2}. \quad (7)$$



Ответьте на вопрос

По каким величинам, характеризующим движение по окружности, можно рассчитать радиус кривизны?



Задание 2

Запишите все возможные формулы расчета радиуса кривизны. Укажите сходство и различие формул расчета линейных и угловых величин.



Вспомните!

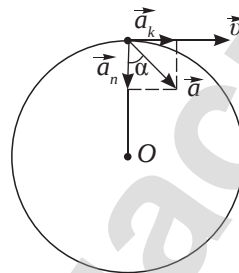
Какие способы расчета радиуса окружности вы знаете из курса математики?

Таблица 5. Сравнительная таблица линейных и угловых кинематических величин

Угловые величины	Линейные величины
$\omega = \omega_0 + \varepsilon t; \omega = \omega_0 - \varepsilon t$	$v = v_0 + at; v = v_0 - at$
$\varphi = \omega_0 t + \frac{\varepsilon t^2}{2}; \varphi = \omega_0 t - \frac{\varepsilon t^2}{2}$	$s = v_0 t + \frac{at^2}{2}; s = v_0 t - \frac{at^2}{2}$
$\varphi = \frac{\omega^2 - \omega_0^2}{2\varepsilon}$, при $\omega > \omega_0$	$s = \frac{v^2 - v_0^2}{2a}$, при $a_x > 0$
$\varphi = \frac{\omega_0^2 - \omega^2}{2\varepsilon}$, при $\omega_0 > \omega$	$s = \frac{v_0^2 - v^2}{2a}$, при $a_x < 0$
$\omega_{cp} = \frac{\omega_0 + \omega}{2}$	$v_{cp} = \frac{v_0 + v}{2}$

ПРИМЕР РЕШЕНИЯ ЗАДАЧИ

Колесо радиусом 10 см вращается с постоянным угловым ускорением $3,14 \text{ рад/с}^2$ (см. рис.). Определите к концу первой секунды после начала движения: 1) угловую скорость; 2) линейную скорость; 3) тангенциальное ускорение; 4) нормальное ускорение; 5) полное ускорение; 6) угол между направлением полного ускорения и радиусом колеса для точек на ободе колеса.



Дано:

$$R = 10 \text{ см} = 0,1 \text{ м}$$

$$\varepsilon = 3,14 \text{ рад/с}^2$$

$$v_0 = 0, \omega_0 = 0$$

$$t = 1 \text{ с}$$

$$\omega = ? \quad v = ? \quad a_k = ? \quad a_n = ?$$

$$a = ? \quad \alpha = ?$$

Решение:

При равноускоренном движении тела по окружности его угловая скорость равна $\omega = \omega_0 + \varepsilon t$. По условию задачи $\omega_0 = 0$, тогда

$$\omega = \varepsilon t. \text{ К концу первой секунды } \omega = 3,14 \text{ рад/с.}$$

Линейная скорость связана с угловой скоростью, формула связи: $v = \omega R$. К концу первой секунды $v = 3,14 \text{ м/с}$.

Тангенциальное ускорение не зависит от времени, оно постоянно и равно

$$a_k = \varepsilon R = 0,314 \text{ м/с}^2.$$

Нормальное ускорение возрастает пропорционально квадрату времени $a_n = \omega^2 R = \varepsilon^2 t^2 R$, к концу первой секунды оно равно: $a_n = 0,986 \text{ м/с}^2$.

Полное ускорение определим по теореме Пифагора: $a = \sqrt{a_n^2 + a_k^2}$, при $t = 1 \text{ с}$, $a = 1,03 \text{ м/с}^2$.

К концу первой секунды (см. рис.) $\sin \alpha = \frac{a_k}{a} = \frac{0,314}{1,03} = 0,305$, т. е. $\alpha = 17^\circ 46'$.

Ответ: $\omega = 3,14 \text{ рад/с}$; $v = 3,14 \text{ м/с}$; $a_k = 0,314 \text{ м/с}^2$;
 $a_n = 0,986 \text{ м/с}^2$; $a = 1,03 \text{ м/с}^2$; $\alpha = 17^\circ 46'$.

Контрольные вопросы

1. Какая составляющая полного ускорения характеризует быстроту изменения модуля линейной скорости? Направления скорости?
2. При каком условии траектория тела, движущегося криволинейно, станет прямолинейной?
3. Какую величину называют угловым ускорением? Как она связана с касательным ускорением? С полным ускорением?



Упражнение

5

1. Точка, начиная двигаться равноускоренно по окружности радиусом 1 м, проходит путь 50 м за 10 с. Чему равно нормальное ускорение точки через 5 с после начала движения?

2. Поезд въезжает на закругленный участок пути с начальной скоростью 54 км/ч и проходит путь 600 м за 30 с. Радиус закругления равен 1 км. Определите модуль скорости и полное ускорение поезда в конце этого пути, считая тангенциальное ускорение постоянным по модулю.
3. Маховик приобрел начальную угловую скорость $\omega_0 = 2\pi$ рад/с. Сделав 10 оборотов, он остановился вследствие трения в подшипниках. Найдите угловое ускорение маховика, считая его постоянным.
4. Точка начинает вращаться по окружности с постоянным ускорением $0,04$ рад/с². Через какой промежуток времени вектор ускорения будет составлять угол 45° с вектором скорости?
5. Высота нового колеса обозрения, находящегося возле развлекательного центра «Думан» в г. Нур-Султан, составляет 65 метров (рис. 18). Определите линейную и угловую скорости, нормальное и угловое ускорение точек крепления кабинок колеса в рабочем состоянии, если период вращения составляет около 7 минут.



Рис. 18. Второе по высоте в странах СНГ колесо обозрения

Экспериментальное задание

Определите линейные и угловые величины, характеризующие движение колеса велосипеда при торможении по асфальту и по грунту. Какие измерительные приборы вам необходимы для исследования вращения колеса в этих случаях?

Творческое задание

Подготовьте сообщение на тему: «Кинематические характеристики экстремальных аттракционов в парках мира. Техника безопасности при их эксплуатации».

§ 6. Движение тела, брошенного под углом к горизонту

Ожидаемый результат

Прочитав параграф, вы сможете:

- определять кинематические величины при движении тела, брошенного под углом к горизонту;
- исследовать траекторию движения тела, брошенного под углом к горизонту;
- определять радиус кривизны траектории.

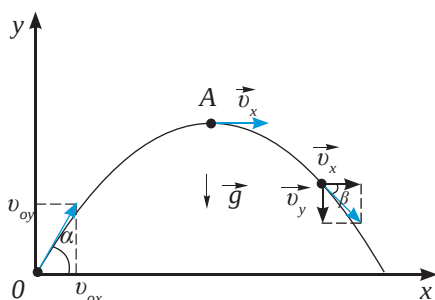


Рис. 19. Разложение вектора скорости на составляющие в различных точках траектории полета тела

I. Мгновенная скорость тела, брошенного под углом к горизонту

Модуль мгновенной скорости определяют по модулям ее составляющих или проекциям на оси Ox и Oy (рис. 19):

$$v = \sqrt{v_x^2 + v_y^2}.$$

В точке O мгновенная скорость равна:

$$v_0 = \sqrt{v_{0x}^2 + v_{0y}^2},$$

где

$$v_{0x} = v_0 \cos \alpha,$$

$$v_{0y} = v_0 \sin \alpha.$$

Если не учитывать сопротивление среды то по оси Ox тело движется равномерно, во всех точках траектории модуль составляющей вектора скорости по оси Ox остается постоянным и равным проекции начальной скорости: $v_x = v_{0x}$.

Вдоль оси Oy тело движется равнопеременно: модуль составляющей вектора скорости по оси Oy при подъеме тела уменьшается до нулевого значения, при спуске возрастает. На уровне броска его значение становится равным проекции начальной скорости $v_y = v_{0y}$. Мгновенное значение составляющей скорости по оси Oy равно:

$$v_y = v_{0y} - gt.$$

Значение мгновенной скорости в любой точке траектории с учетом зависимости составляющих скорости от времени определяют по формуле:

$$v = \sqrt{v_{0x}^2 + (v_{0y} - gt)^2}.$$

В точке максимального подъема A мгновенная скорость тела равна проекции скорости на ось Ox :

$$v_A = v_0 \cos \alpha.$$

При известном значении угла наклона вектора скорости к горизонтали β значение скорости в любой точке траектории можно определить по формуле:

$$v = v_0 \frac{\cos \alpha}{\cos \beta}.$$

II. Координаты тела, брошенного под углом к горизонту

Тело движется равномерно по оси Ox , следовательно, закон движения имеет вид:

$$x(t) = x_0 + s_x.$$

Учитывая, что $x_0 = 0$, $s_x = v_{0x}t$, $v_{0x} = v_0 \cos \alpha$, получим:

$$x(t) = (v_0 \cos \alpha)t. \quad (1)$$

Вдоль оси Oy тело движется равнопеременно с ускорением свободного падения g , закон для данного вида движения имеет вид:

$$y(t) = y_0 + v_{0y}t + \frac{g_y t^2}{2}.$$

Учтем, что для рассматриваемого тела $y_0 = 0$, $v_{0y} = v_0 \sin \alpha$, $g_y = -g$, тогда:

$$y(t) = (v_0 \sin \alpha)t - \frac{gt^2}{2}. \quad (2)$$

Полученные уравнения (1) и (2) являются законами движения для тела, брошенного под углом к горизонту.



Задание 1

1. Определите составляющие начальной скорости стрелы (рис. 20), выпущенной из лука со скоростью 60 м/с под углом 20° к горизонту ($\sin 20^\circ \approx 0,34$; $\cos 20^\circ \approx 0,94$).
2. Определите скорость стрелы в момент (рис. 20), когда угол наклона с горизонтом станет равным 10° ($\cos 10^\circ \approx 0,98$).
3. Определите скорость стрелы в верхней точке траектории (рис. 20).



Рис. 20. Тренировка к республиканским соревнованиям по стрельбе из лука. Жамбылская область

III. Уравнение траектории

Решив систему из двух уравнений (1) и (2), получим зависимость $y(x)$. Выразив время из уравнения (1) $t = \frac{x}{v_0 \cos \alpha}$, подставим в уравнение (2), получим:

$$y(x) = (v_0 \sin \alpha) \frac{x}{v_0 \cos \alpha} - \frac{gx^2}{2v_0^2 \cos^2 \alpha}$$

или

$$y(x) = -\frac{g}{2v_0^2 \cos^2 \alpha} x^2 + (tg \alpha) x. \quad (3)$$

Уравнение траектории тела, брошенного под углом к горизонту (3), представляет собой уравнение параболы, ветви которой направлены вниз.



Задание 2

1. Используя уравнение траектории (3), постройте траекторию полета стрелы. Примите начальные координаты стрелы равными 0.
2. На каком расстоянии находилась мишень, если ее центр совпадал с уровнем совершенного выстрела? Для ответа используйте построенный вами график.

IV. Величины, характеризующие движение тела, брошенного под углом к горизонту

Основными величинами, характеризующими движение тела, брошенного под углом к горизонту, являются высота, дальность полета, время подъема, время спуска и продолжительность полета. Получим формулы расчета указанных величин, используя формулы свободного падения тел, составляющих скорости по оси $0x$ и $0y$, и координат тела, брошенного под углом к горизонту.

В формулу расчета высоты полета $h_y = \frac{v_y^2 - v_{0y}^2}{2g_y}$

подставим проекции скоростей на ось $0y$ в начальный момент времени $v_{0y} = v_0 \sin \alpha$ и в произвольный момент времени t : $v_y = v_0 \sin \beta$. С учетом знака проекции ускорения свободного падения $g_y = -g$ получим:

$$h = \frac{v_0^2 \sin^2 \alpha - v^2 \sin^2 \beta}{2g} \quad (4)$$

В точке максимального подъема составляющая скорости по оси $0y$ равна нулю $v_y = 0$, $\beta = 0$, выражение (4) примет вид:

$$h_{\max} = \frac{v_0^2 \sin^2 \alpha}{2g} \quad (5)$$

Время подъема на максимальную высоту выразим из формулы расчета мгновенной скорости:

$$v_y = v_{0y} - gt = v_0 \sin \alpha - gt.$$

При $v_y = 0$ из записанного уравнения получим формулу расчета времени подъема:

$$t_n = \frac{v_0 \sin \alpha}{g} \quad (6)$$

Время полета определяется временем падения тела, когда его координата по оси $0y$ равна нулю $y = 0$. Из формулы расчета координаты тела при указанном условии получим:

$$y(t) = (v_0 \sin \alpha)t - \frac{gt^2}{2} = 0, \text{ откуда } t = \frac{2v_0 \sin \alpha}{g} \quad (7)$$

Сравнив формулы 6 и 7 для времени спуска, получим: $t_c = \frac{v_0 \sin \alpha}{g}$. Время подъема и спуска до уровня броска имеют равные значения.

Дальность полета определяется координатой тела по оси $0x$:

$$l = x(t) = (v_0 \cos \alpha)t = \frac{(v_0 \cos \alpha) \cdot 2v_0 \sin \alpha}{g}, \text{ откуда } l = \frac{v_0^2 \sin 2\alpha}{g} \quad (8)$$



Ответьте на вопрос

Почему время подъема на максимальную высоту и время спуска на начальный уровень полета имеют одинаковые значения только в случае отсутствия силы трения?

V. Радиус кривизны траектории

Радиусы малых дуг окружностей, из которых состоит траектория движения тела, брошенного под углом к горизонту, называют радиусами кривизны.

Из формулы $a_n = \frac{v^2}{R}$ следует, что радиус кривизны равен: $R = \frac{v^2}{a_n}$.

Определим радиусы кривизны в точках A и O параболы (рис. 21).

- 1) В точке A (рис. 21, а) $v = v_{0x} = v_0 \cos \alpha$, $a_n = g$ следовательно:

$$R_A = \frac{v_0^2 \cos^2 \alpha}{g}.$$

- 2) В точке O (рис. 21, б) $v = v_0$ центростремительным ускорением является проекция ускорения свободного падения на ось O_1 $a_n = g \cos \alpha$, тогда

$$R_0 = \frac{v_0^2}{g \cos \alpha}.$$

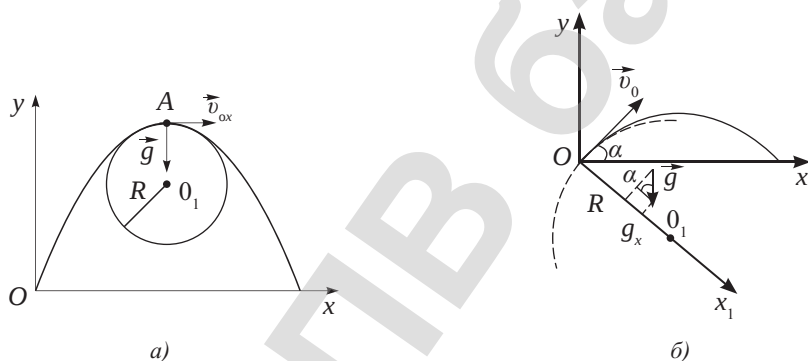


Рис. 21. Построение радиуса кривизны для точек параболы

VI. Движение тела, брошенного горизонтально

Если угол между направлением скорости и линией горизонта равен нулю $\alpha = 0$, то тело движется по ветви параболы с вершиной в точке бросания (рис. 22). Для описания движения применимы все формулы, рассмотренные выше. Вдоль оси Oy тело движется равноускоренно, с ускорением свободного падения g высота полета равна:

$$h_y = \frac{g_y t^2}{2},$$

по оси Ox равномерно с начальной скоростью v_0 , дальность полета определяется формулой $l = v_0 t$.

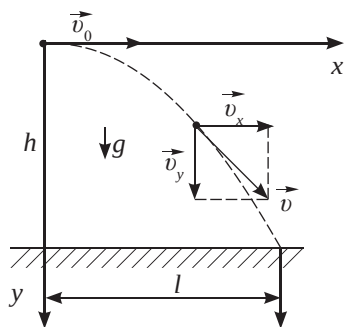


Рис. 22. Скорость тела, брошенного горизонтально, направлена по касательной к траектории

Мгновенная скорость в любой точке траектории равна:

$$v = \sqrt{v_0^2 + g^2 t^2}.$$



Ответьте на вопросы

1. Почему только одна точка параболы имеет наименьший радиус кривизны?
2. Почему одинаковые значения радиуса кривизны имеют только по две точки параболы?

Контрольные вопросы

1. Как определяют мгновенную скорость тела, брошенного под углом к горизонту?
2. Назовите основные величины, характеризующие движение тела, брошенного под углом к горизонту. Дайте им определение.
3. В чем основное отличие закона движения от уравнения траектории?



Упражнение

6

1. Тело брошено со скоростью 10 м/с под углом 45° к горизонту. Определите высоту подъема тела в момент, когда его координата x станет равной 3 м.
2. Дальность полета тела, брошенного горизонтально со скоростью 10 м/с, равна высоте бросания. С какой высоты брошено тело?
3. Под каким углом к горизонту брошено тело, если в точке максимального подъема радиус кривизны превышает высоту полета в 2 раза.
4. Из миномета, расположенного у основания горы, ведется обстрел объектов противника, расположенных на плоском склоне горы. Склон составляет с горизонтом угол 30° . Ствол миномета установлен под углом 60° к горизонту, мины вылетают со скоростью 90 м/с. Определите минимальное расстояние между минометом и местом падения мины.
5. Ветер, не встречающий преград в степи, способен достичь силы урагана. Особенно этот ветер опасен в Джунгарской и Гашунской Гоби, где он срывает крыши с домов, опрокидывает и уносит юрты на 3–5 км. Считая действие ветра кратковременным, определите начальную скорость ветра, направленного под углом 45° к горизонту.

Экспериментальное задание

Исследуйте зависимость дальности полета пули игрушечного пистолета от угла выстрела. Какие приборы вам необходимы? Сравните полученные результаты с теоретическими, укажите причины случайных и систематических погрешностей ваших измерений.

Итоги главы 1

Вид движения	Закон движения	Уравнение траектории	Радиус кривизны
Движение тела, брошенного под углом к горизонту	$x(t) = (v_0 \cos \alpha) t$ $y(t) = (v_0 \sin \alpha) t - \frac{gt^2}{2}$	$y(x) = -\frac{g}{2v_0^2 \cos^2 \alpha} x^2 + (\tan \alpha) x$	$R = \frac{v^2}{a_n}$
Равнопеременное движение по окружности	Ускорение	Угловое ускорение	Связь ускорений
	$a = \sqrt{a_n^2 + a_k^2}$	$\varepsilon = \frac{\omega - \omega_0}{\Delta t}$ $\varepsilon = \frac{\omega_0 - \omega}{\Delta t}$	$a_k = \varepsilon R$
	Угловая скорость	Угловое перемещение	Связь ускорений и угловой скорости
	$\omega = \omega_0 \pm \varepsilon t$ $\omega_{cp} = \frac{\omega_0 + \omega}{2}$	$\varphi = \omega_0 t \pm \frac{\varepsilon t^2}{2}$ $\varphi = \frac{\omega^2 - \omega_0^2}{2\varepsilon}$ $\varphi = \frac{\omega_0^2 - \omega^2}{2\varepsilon}$	$a_n = \omega^2 R$ $a = R\sqrt{\omega^4 + \varepsilon^2}$
Преобразования Галилея		Следствия из преобразований Галилея	
$x = x_1 + ut$ $y = y_1$ $z = z_1$ $t = t_1$		$\vec{s} = \vec{s}_1 + \vec{s}_2$ $\vec{v} = \vec{v}_{отн} + \vec{v}_n$	

Глоссарий

Закон движения – зависимость координаты тела x от времени t .

Касательное ускорение – физическая величина, характеризующая быстроту изменения линейной скорости.

Кинематика – раздел механики, посвященный изучению движения тел, без учета их масс и действующих на них сил.

Механика – наука о механическом движении материальных тел и взаимодействиях, происходящих между ними.

Угловое ускорение – физическая величина, характеризующая быстроту изменения угловой скорости.

Уравнение движения – зависимость координаты тела y от x .

ГЛАВА 2

ДИНАМИКА

Причины возникновения определенных видов движения тел рассматривают в разделе механики – динамика.

Динамика (от древнегреч. δύναμις – сила, мощь) – это раздел механики, посвященный изучению движения тел под действием приложенных к ним сил.

В основе раздела лежат три закона Ньютона, следствием которых являются все уравнения и теоремы, необходимые для решения задач динамики.

Изучив подраздел, вы сможете:

- составлять возможные алгоритмы решения задач при движении тел под действием нескольких сил;
- объяснять физический смысл инертной и гравитационной массы;
- объяснять графическую зависимость напряженности и потенциала гравитационного поля материальной точки от расстояния;
- применять закон всемирного тяготения при решении задач;
- использовать теорему Штейнера для расчета момента инерции материальных тел;
- применять основное уравнение динамики вращательного движения в различных его формах при решении задач;
- проводить аналогии между физическими величинами, характеризующими поступательное и вращательное движения;
- определять момент инерции тела экспериментальным методом.

§ 7. Силы. Сложение сил. Законы Ньютона

Ожидаемый результат

Прочитав параграф, вы сможете:

- изображать силы графически;
- определять равнодействующую сил;
- составлять возможные алгоритмы решения задач при движении тел под действием нескольких сил.



Задание 1

1. Изобразите в выбранном вами масштабе силу тяжести, действующую на токарный станок массой 2500 кг, и его вес.
2. Составьте алгоритм графического изображения вектора силы.

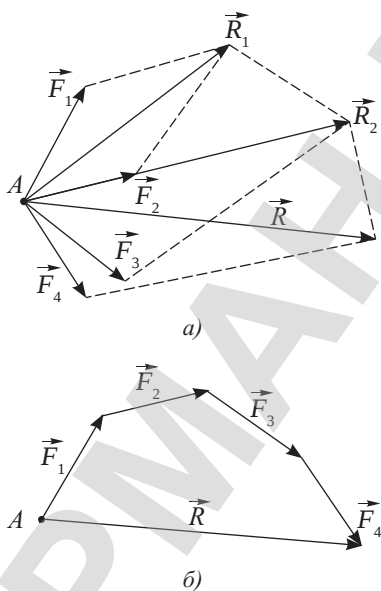


Рис. 23. Геометрический способ определения равнодействующей силы

I. Силы в природе

Окружающие нас тела меняют свое положение в пространстве или деформируются в результате взаимодействия. *Мерой воздействия на тело других тел или полей является сила – физическая величина, имеющая направление.* Результат действия силы зависит от ее числового значения, точки приложения и направления. Сила является причиной изменения движения тела.

По природе происхождения различают четыре вида сил: гравитационные, электромагнитные, сильные, или ядерные, и слабые.

В механике рассматривают движение тел под действием гравитационных и электромагнитных сил молекулярного происхождения.

II. Сложение сил

Существуют два способа определения равнодействующей всех сил, действующих на тело: *геометрический* и *аналитический*. Геометрический способ основан на сложении векторов по правилам параллелограмма или треугольника. Равнодействующую определяют путем последовательного сложения сил с построением промежуточных равнодействующих сил (рис. 23, а) или построением силового многоугольника (рис. 23, б). При графическом способе векторы сил можно вычерчивать в любом порядке, величина и направление равнодействующей силы при этом не изменятся. Вектор равнодействующей направляют от начала первого вектора к концу последнего вектора.

Аналитический метод заключается в определении суммы проекций всех действующих сил на две взаимно перпендикулярные оси Ox и Oy :

$$\begin{aligned} F_{Rx} &= F_{1x} + F_{2x} + \dots + F_{nx} \\ F_{Ry} &= F_{1y} + F_{2y} + \dots + F_{ny} \end{aligned}$$

Полученные результаты используют для определения модуля равнодействующей силы по теореме Пифагора:

$$F_R = \sqrt{F_{Rx}^2 + F_{Ry}^2}$$

Этот метод принято называть *координатным*.

III. Основные законы динамики

Обобщив знания о видах движения тел и причин, их вызывающих, И. Ньютон сформулировал три закона.

I закон Ньютона:

Существуют инерциальные системы отсчета, относительно которых тело движется прямолинейно и равномерно или находится в покое, если на тело не действуют силы или действие сил скомпенсировано.

Если действие сил, приложенных к телу, скомпенсировано, то первый закон Ньютона примет вид:

$$\vec{F}_1 + \vec{F} + \dots + \vec{F}_n = 0, \quad a = 0, \quad v = \text{const}$$

$$\text{или } \sum_{i=1}^n \vec{F}_i = 0.$$

Первый закон Ньютона определяет условие, при котором тело движется прямолинейно и равномерно. Системы отсчета, для которых выполняется первый закон Ньютона, называют инерциальными системами отсчета (ИСО), а сам закон – законом инерции. Для описания механических явлений на нашей планете за ИСО принимают Землю, покоящиеся тела и тела, движущиеся с постоянной скоростью относительно Земли.

Относительно тел, движущихся с ускорением, первый закон Ньютона не выполняется. Системы, связанные с телами, движущимися с ускорением, называют неинерциальными (НСО).

II закон Ньютона:

Ускорение, с которым движется тело, прямо пропорционально равнодействующей сил, действующих на него, и обратно пропорционально его массе.

$$\vec{a} = \frac{\vec{F}_1 + \vec{F}_2 + \dots + \vec{F}_n}{m}.$$

Направление ускорения совпадает с направлением равнодействующей всех сил, приложенных к телу $\vec{a} \uparrow \vec{F}_R$. Второй закон Ньютона определяет условие, при котором тело движется неравномерно или равнопеременно. Второй закон Ньютона справедлив для ИСО.

Запишем второй закон Ньютона в импульсном виде, учитывая, что ускорение – это быстрота изменения скорости движения тела $\vec{a} = \frac{\vec{v} - \vec{v}_0}{\Delta t}$:

$$\vec{F} \Delta t = m\vec{v} - m\vec{v}_0,$$

где $\vec{F}$ – равнодействующая сил, действующих на тело.



Задание 2

1. Запишите формулы расчета электромагнитных сил молекулярного происхождения.
2. Изобразите перечисленные силы графически, указав точку приложения и направление.

Алгоритм построения силового многоугольника

1. Выбираем точку А на плоскости или центр масс тела.
2. Помещаем в выбранную точку начало первого вектора $\vec{F}_1$, перемещая его параллельно самому себе и сохраняя его длину.
3. Помещаем в конец первого вектора начало второго $\vec{F}_2$. Аналогично вычерчиваем поочередно все вектора, совмещая начало последующего вектора с концом предыдущего.
4. Вектор равнодействующей замыкает полузамкнутую ломаную линию. Он соединяет начало первого вектора с концом последнего, и направлен к концу последнего вектора.



Задание 3

1. Определите равнодействующую сил, приложенных к точке А на рисунке 23, аналитическим методом.
2. Составьте алгоритм нахождения равнодействующей силы аналитическим методом.

III закон Ньютона:

Тела взаимодействуют силами, равными по модулю и противоположными по направлению. Они являются силами одной природы, приложены к разным телам, действуют вдоль одной прямой.

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

В решении задач динамики используют алгоритм, знание которого позволяет справиться со стандартными задачами.

Алгоритм решения задач динамики

1. На рисунке показать силы, действующие на тело, и направление ускорения (рис. 24).
2. Записать основной закон движения в векторном виде:

$$m\vec{a} = \vec{F} + m\vec{g} + \vec{F}_{mp} + \vec{N}.$$

3. Выбрать удобные для решения оси Ox и Oy , направив одну из них по направлению движения тела.
4. Записать основной закон в проекции на выбранные оси:

$$ma_x = F_x + mg_x + F_{mpx} + N_x$$

$$ma_y = F_y + mg_y + F_{mry} + N_y.$$

5. Выразить проекции векторов через модули с учетом знаков:

$$ma = F - mg \cdot \cos \alpha - F_{mp}$$

$$0 = -mg \cdot \sin \alpha + N.$$

6. При необходимости записать формулы расчета сил и кинематических величин:

$$F_{mp} = \mu N$$

$$a = \frac{v^2 - v_0^2}{2s}.$$

7. Решить систему уравнений относительно неизвестной величины, например, конечной скорости.

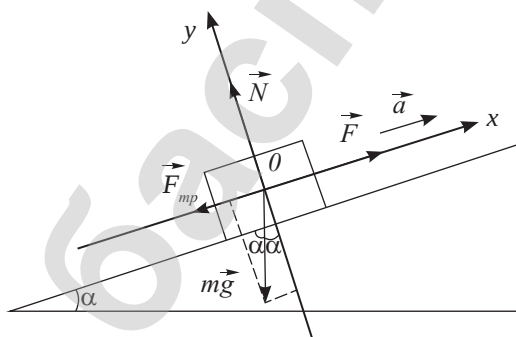


Рис. 24. Тело под действием четырех сил движется с ускорением вверх по наклонной плоскости

IV. Второй закон Ньютона для неинерциальных систем отсчета. Сила инерции

Второй закон Ньютона можно использовать в неинерциальной системе отсчета, если наряду с обычными силами, действующими на тело, ввести силу инерции.

Сила инерции – это сила, появление которой не обусловлено действием на тело другого тела. Необходимость введения силы инерции вызвана выбором неинерциальной системы отсчета.

Сила инерции равна произведению массы тела на ускорение системы отсчета, приложена к телу и направлена в сторону, противоположную ускорению системы:

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

На рисунке 25, а указана сила тяжести, действующая на тело, и ускорение кабины лифта относительно Земли. На рисунке 25, б введена сила инерции, тело движется с ускорением $\vec{g} + \vec{a}$ относительно кабины лифта.

V. Движение связанных тел

На рисунке 26 изображена система связанных тел, движущихся с ускорением $\vec{a}$. При расчете величин, характеризующих движение системы тел, необходимо указать все силы, действующие на тела. Записать второй закон Ньютона для каждого тела:

$$m_1 \vec{a} = \vec{F}_{T1} + \vec{F}_{H12}$$

$$m_2 \vec{a} = \vec{F}_{H21} + \vec{N}_2 + \vec{F}_{H23} + \vec{F}_{T2}$$

$$m_3 \vec{a} = \vec{F}_{H32} + \vec{N}_3 + \vec{F}_{T3}.$$

Выбрать удобные для решения оси, записать уравнения через проекции, затем – модули величин. Решить систему относительно неизвестной величины. В решении необходимо учесть, что на основании третьего закона Ньютона силы взаимодействия тел равны:

$$F_{12} = F_{21}; F_{23} = F_{32}.$$

Задачу можно решить намного проще, если учесть, что силы взаимодействия между связанными телами системы не могут привести ее в движение, так как они равны на основе третьего закона Ньютона.

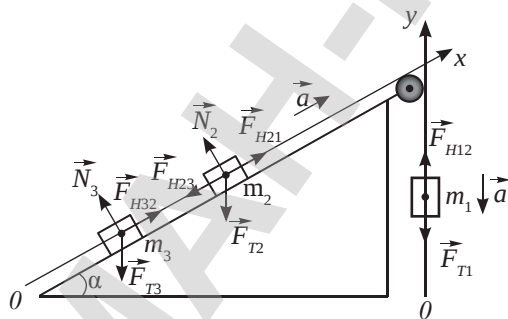


Рис. 26. Движение связанных тел по наклонной плоскости

Силы взаимодействия между телами системы называют внутренними силами.

Систему приводят в движение внешние силы. Для системы тел, изображенных на рисунке 26, внешними силами, приводящими тело в движение, являются

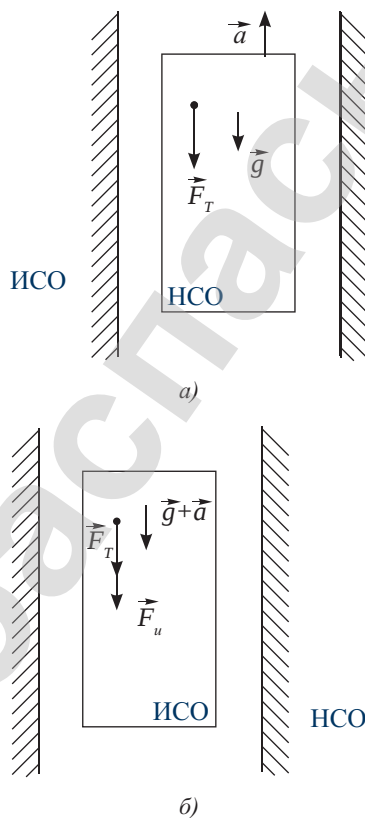


Рис. 25. Изображение сил и ускорения в ИСО и НСО



Запомните!

Для определения ускорения системы тел необходимо от внешних сил, приводящих систему в движение, отнять внешние силы, противодействующие движению, результат разделить на массу системы.

силы тяжести F_{T1} , F_{T2} , F_{T3} . Ускорение системы прямо пропорционально равнодействующей составляющих этих сил вдоль нити, связывающей тела, и обратно пропорционально массе системы:

$$a = \frac{F_{T1} - F_{T2} \sin \alpha - F_{T3} \sin \alpha}{m_1 + m_2 + m_3}.$$

Контрольные вопросы

1. Сформулируйте законы Ньютона.
2. Какие виды сил по природе своего происхождения вам известны?
3. Какую силу принято называть силой инерции?
4. Какие силы приводят в движение систему связанных тел?

★ Упражнение

7

1. Какую силу нужно приложить, чтобы магнит массой 50 г, прилипший к стальной вертикальной плите, равномерно переместить вертикально вверх? Для равномерного движения магнита вертикально вниз прикладывают силу 1,5 Н.
2. На гладкой наклонной плоскости с углом наклона 30° находится тело массой 50 кг, на которое действует сила 294 Н горизонтально направленная. Определите ускорение тела в случае, если указанная сила действует: а) слева направо; б) справа налево; $g = 10 \text{ м/с}^2$.
3. К потолку лифта, движущегося вертикально вверх с ускорением $1,2 \text{ м/с}^2$, прикреплен динамометр, к которому подвешен блок, свободно вращающийся вокруг горизонтальной оси. Через блок перекинута нить, к концам которой привязаны грузы массами 0,2 кг и 0,3 кг. Определите показания динамометра, считая блок и нити невесомыми, $g = 10 \text{ м/с}^2$.
4. Скорость меч-рыбы при нападении достигает 140 км/ч. Она, не пострадав, может пробить обшивку судна. У основания ее меча есть гидравлический амортизатор – небольшие полости, заполненные жиром, которые смягчают удар. Определите силу сопротивления обшивки судна толщиной 20 см, если рыба массой 10 кг пробивает ее за 0,5 с.

Творческое задание

Составьте кластер «Силы в природе», указав их основные характеристики и взаимосвязи.

§ 8. Закон всемирного тяготения

Ожидаемый результат

Прочитав параграф, вы сможете:

- объяснять физический смысл инертной и гравитационной массы;
- объяснять графическую зависимость напряженности и потенциала гравитационного поля материальной точки от расстояния;
- применять закон всемирного тяготения при решении задач.

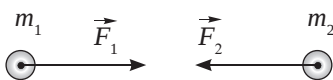


Рис. 27. Силы всемирного тяготения действуют вдоль одной прямой в противоположных направлениях

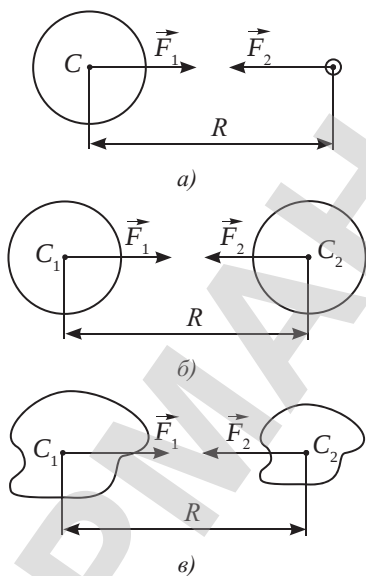


Рис. 28. Силы всемирного тяготения центральные. C_1, C_2 – центры тяжести

I. Закон всемирного тяготения в применении к материальным точкам

Закон всемирного тяготения был сформулирован И. Ньютоном в 1667 г.

Две любые материальные частицы с массами m_1 и m_2 притягиваются по направлению друг к другу с силой F , прямо пропорциональной произведению масс и обратно пропорциональной квадрату расстояния R между ними.

$$F = \frac{Gm_1m_2}{R^2}, \quad (1)$$

где $G = 6,67 \cdot 10^{-11} \frac{\text{Н} \cdot \text{м}^2}{\text{кг}^2}$ – гравитационная постоянная.

Закон всемирного тяготения справедлив для тел, размеры которых пренебрежимо малы в сравнении с расстоянием между ними, он справедлив для материальных точек (рис. 27).

Сила тяготения для тел малой массы ничтожно мала. Она значительна для небесных тел, которые имеют в основном шарообразную форму (рис. 28). Силы гравитационного взаимодействия направлены вдоль прямой, соединяющей центры тяжести тел, они являются *центральными*. Для расчета силы гравитации необходимо определить расстояние между центрами тяжести тел.

II. Масса – мера гравитации

Сила взаимного притяжения тел, или гравитационного взаимодействия, зависит от массы тел, это следует из закона всемирного тяготения. Следовательно, *масса является мерой гравитационных свойств тела*. Рассматривая движение тел под действием силы тяготения, используют второй закон Ньютона, в котором масса является мерой инертности тела:

$$m_{\text{ин}} a = \frac{GMm_{\text{сп}}}{R^2}.$$

Ньютон пришел к выводу, что инерционная масса равна гравитационной и все тела, независимо от их массы, падают в поле тяготения небесных тел с одним и тем же ускорением $a = g = \frac{GM}{R^2}$.

III. Силовая характеристика гравитационного поля

Из курса 9 класса вам известно, что силовой характеристикой гравитационного поля является напряженность $\vec{E} = \frac{\vec{F}}{m}$. Она равна ускорению свободного падения. Напряженность $\vec{E}$ и ускорение свободного падения $\vec{g}$ вблизи поверхности небесного тела остаются величинами постоянными, равными:

$$g = \frac{GM_T}{R_T^2}, \quad (2)$$

где M_T – масса небесного тела; R_T – радиус небесного тела.

Вектор напряженности направлен к центру Земли и перпендикулярен ее поверхности. Если кривизной Земли можно пренебречь, силовые линии гравитационного поля становятся параллельными относительно друг друга. Поле в этом случае можно считать однородным.

При удалении от небесного тела гравитационное поле становится слабее:

$$g = \frac{GM_T}{(R_T + h)^2}, \quad (3)$$

его силовые линии становятся разреженнее.

При удалении от Земли пренебречь ее кривизной невозможно. Гравитационное поле Земли неоднородное, силовые линии не параллельны. Сила притяжения возрастает при приближении к небесному телу $\vec{F}_2 > \vec{F}_1$ (рис. 29). График зависимости напряженности поля (ускорения свободного падения) от расстояния представлен на рисунке 30.

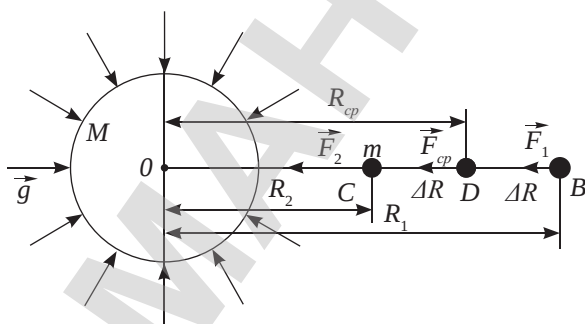


Рис. 29. Силовые линии неоднородного гравитационного поля

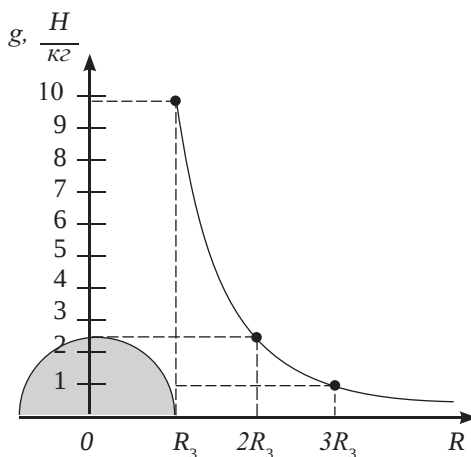


Рис. 30. График зависимости напряженности гравитационного поля от расстояния



Ответьте на вопрос

Почему при определении силы тяготения между телами больших объемов необходимо знать расположение их центров тяжести?



Задание 1

Изобразите в тетради силовые линии однородного гравитационного поля.



Задание 2

Используя формулу зависимости потенциала точек гравитационного поля от расстояния до небесного тела, постройте график зависимости $\varphi(R)$.

IV. Энергетическая характеристика гравитационного поля

Энергетическую характеристику поля называют потенциалом, она определяется отношением потенциальной энергии к массе тела:

$$\varphi = \frac{W_p}{m}. \quad (4)$$

Потенциальная энергия тела в однородном гравитационном поле равна $W_p = mgh$, следовательно, потенциал точек гравитационного поля вблизи Земли определяется высотой подъема тела над ее поверхностью:

$$\varphi = gh, \quad (5)$$

где h – высота точки поля относительно уровня с нулевым потенциалом, который выбирается произвольно.

Потенциал неоднородного поля зависит от двух переменных величин: напряженности и расстояния точки пространства до небесного тела $R = R_T + h$. На основе формул (3) и (5) с учетом расстояния R до исследуемой точки пространства, получим:

$$\varphi = -gR = -\frac{GM_T}{R_T + h} \quad \text{или} \quad \varphi = -\frac{GM_T}{R}. \quad (6)$$

Все точки гравитационного поля принято считать точками отрицательного потенциала, так как для преодоления притяжения небесного тела необходимы затраты энергии.

Энергия взаимодействия тел, удаленных друг от друга на бесконечно большие расстояния, равна нулю. Потенциал некоторой точки гравитационного поля небесного тела – это потенциальная энергия его взаимодействия с телом единичной массы, внесенным в эту точку пространства. Поэтому потенциал точки пространства, бесконечно удаленной от небесного тела, принято также считать равным нулю. При сближении с небесным телом малое космическое тело попадает в поле гравитации, в «потенциальную яму». Малое тело падает на поверхность небесного тела.

Потенциальная энергия тела в некоторой точке пространства неоднородного гравитационного поля равна:

$$W_p = \varphi \cdot m \quad \text{или} \quad W = -\frac{GM_T m}{R}. \quad (7)$$

V. Применение закона всемирного тяготения для тел, имеющих полость

Для определения силы взаимодействия тел, в одном из которых есть полость (рис. 31, а), используют метод отрицательных масс. Метод справедлив в том случае, если тела по всему объему имеют одну и ту же плотность, он заключается в следующем:

1. Используя закон всемирного тяготения, определяют силу взаимодействия двух тел, предполагая, что они сплошные:

$$F_1 = \frac{GM_1 m}{L^2},$$

где M_1 – масса тела без учета полости в нем:

$$M_1 = \rho V = \frac{4}{3} \pi R^3 \rho,$$



Ответьте на вопросы

1. Почему при движении тела к Земле работа силы тяготения положительная, при удалении от Земли – отрицательная?
2. Почему формула расчета потенциала гравитационного поля имеет знак минус?
3. Почему результат расчета работы силы тяготения не зависит от выбора точек с нулевым потенциалом?

где L_1 – расстояние между телом массой m и центром тяжести шара радиусом R .

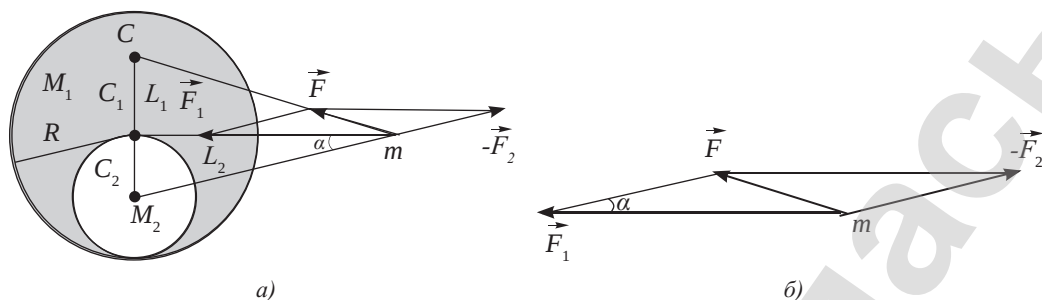


Рис. 31. Использование метода отрицательных масс при определении силы тяготения тела с полостью

- Мысленно заполнив полость веществом, из которого состоит тело, определяют силу взаимодействия его с телом массой m :

$$F_2 = \frac{GM_2 m}{L_2^2},$$

где M_2 – масса вещества, заполняющего полость радиусом r , $M_2 = \rho \frac{4}{3} \pi r^3$,

L_2 – расстояние между телом массой m и центром тяжести вещества, заполняющего полость.

- Найти разность векторов $\vec{F}_1$ и $\vec{F}_2$:
$$\vec{F} = \vec{F}_1 - \vec{F}_2.$$

В рассматриваемом случае модуль результирующей силы определяют по теореме косинусов (рис. 31, б):

$$F = \sqrt{F_1^2 + F_2^2 - 2 F_1 F_2 \cos \alpha}.$$



Ответьте на вопрос

Почему метод отрицательных масс можно использовать только для однородных тел?

Контрольные вопросы

- Сформулируйте закон всемирного тяготения.
- К какой точке тела приложена сила тяготения?
- Как взаимосвязаны между собой гравитационная и инерционная массы тела?
- Какие величины характеризуют гравитационное поле небесных тел?
- В чем различие однородного поля от неоднородного?



Упражнение

8

- Ракета-носитель массой 33 т приближается к Международной космической станции массой 410 т. Определите силу притяжения в момент, когда расстояние между их центрами масс уменьшилось до 100 м.

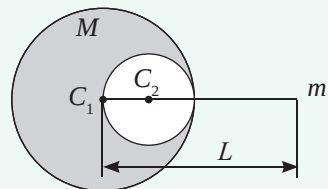


Рис. 32. К упражнению 8.4

2. На каком расстоянии от поверхности Марса сила взаимодействия межпланетной станции Маринер-9 массой 1000 кг с планетой была равна 1,78 кН? Масса Марса равна $6,4 \cdot 10^{23}$ кг, радиус 3400 км.
3. Среднее расстояние между центрами Земли и Луны равно 60 земным радиусам, а масса Луны в 81 раз меньше массы Земли. В какой точке прямой, соединяющей их центры, следует поместить тело, чтобы оно притягивалось к Земле и Луне с одинаковыми силами?
4. Определите силу притяжения шарика массой m и однородного шара, внутри которого есть сферическая полость радиусом $R/2$ (рис. 32). Радиус шара R , масса M , расстояние между центрами тяжести L .
5. С космодрома Байконур 12 сентября 1959 г. стартовала ракета «Восток-Л». Она вывела на траекторию полета к естественному спутнику Земли Луне автоматическую межпланетную станцию (АМС) «Луна-2», которая на следующий день впервые в мире достигла поверхности Луны и совершила жесткую посадку на ее поверхность (рис. 33). Во сколько раз уменьшилась сила тяготения Земли, действующая на АМС в моменты, когда она удалилась от поверхности планеты на расстояние равное R_3 , $2R_2$, $3R_3$?
6. Определите потенциал гравитационного поля на геостационарной орбите Земли. Какой потенциальной энергией обладает космический аппарат спутниковой связи РК KazSat-3 массой 1,3 тонны на этой орбите (рис. 34). Расстояние от поверхности Земли до орбиты 36000 км. Масса Земли $6 \cdot 10^{24}$ кг, радиус Земли 6400 км.



Рис. 33. К упражнению 8.5



Рис. 34. Космический аппарат спутниковой связи РК KazSat-3

7. Спутник движется вокруг Земли на расстоянии H от ее поверхности. Радиус Земли $R_3 \gg H$. Определите период обращения спутника. Орбиту считайте круговой.

Творческое задание

Определите силы притяжения между Солнцем и планетами Солнечной системы. Проанализируйте полученные результаты.

§ 9. Момент инерции абсолютно твердого тела

Ожидаемый результат

Прочитав параграф, вы сможете:

- использовать теорему Штейнера для расчета момента инерции материальных тел.

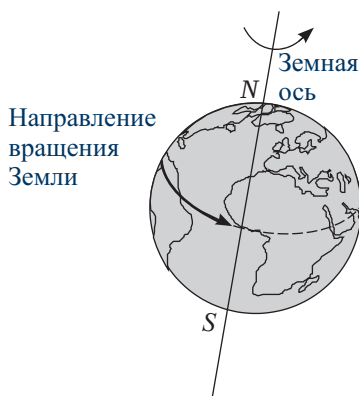


Рис. 35. Абсолютно твердое тело, вращающееся вокруг своей оси

I. Абсолютно твердое тело

Абсолютно твердое тело – это тело, расстояние между частями которого не меняется при действии на него любых сил.

Планеты Солнечной системы можно принять за абсолютно твердые тела при грубых расчетах величин, характеризующих их вращательное движение (рис. 35).

Вращательное движение абсолютно твердого тела в целом и каждой его точки по отдельности характеризуют кинематическими угловыми величинами: угловым ускорением, угловой скоростью, угловым перемещением, а также динамическими: моментом силы, моментом инерции и моментом импульса.



Вспомните!

Момент силы – это произведение силы на ее плечо:

$$M = F \cdot d$$

Плечо силы – это кратчайшее расстояние от точки вращения (точки опоры) до линии действия силы.

II. Момент инерции материальной точки. Второй закон Ньютона для вращательного движения

Инерционные свойства материальной точки, совершающей вращательное движение вокруг точки O зависят не только от массы, но и от радиуса вращения (рис. 36).

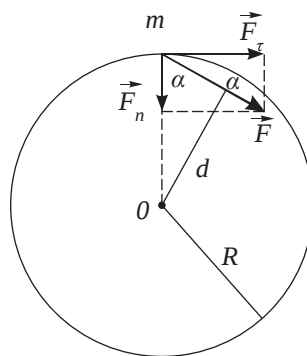


Рис. 36. Инерционные свойства вращающегося тела зависят от массы и радиуса вращения



Ответьте на вопрос

Почему нормальная составляющая силы не создает вращательный момент?



Задание 1

Докажите, что плечом силы, действующей на каждую точку вращающегося абсолютно твердого тела, является радиус $d = R$.

действием силы $\vec{F}$, тангенциальное ускорение будет создавать касательная к траектории составляющая F_τ :

$$ma_\tau = F_\tau. \quad (1)$$

Тангенциальное ускорение связано с угловым ускорением ε формулой

$$a_\tau = \varepsilon R. \quad (2)$$

Уравнение (1) с учетом (2) примет вид:

$$m\varepsilon R = F_\tau. \quad (3)$$

Умножим обе части уравнения (3) на радиус окружности, по которой двигалась рассматриваемая точка, получим:

$$m\varepsilon R^2 = M, \quad (4)$$

где M – момент силы.

Единица измерения момента силы $[M] = 1 \text{ Н} \cdot \text{м}$, mR^2 – момент инерции.



Ответьте на вопрос

Почему тело на длинной нити сложнее раскрутить, чем на короткой?



Эксперимент

Убедитесь в своих предположениях на опыте. Приведите во вращение шарик на нити разной длины в горизонтальной плоскости.

Величину, равную произведению массы на квадрат радиуса окружности, по которой движется тело, называют моментом инерции.

$$I = mR^2, \quad (5)$$

где I – обозначение момента инерции, ее единица измерения: $[I] = 1 \text{ кг} \cdot \text{м}^2$.

Подставим (5) в (4) и получим запись второго закона Ньютона для вращающегося тела:

$$M = I\varepsilon. \quad (6)$$

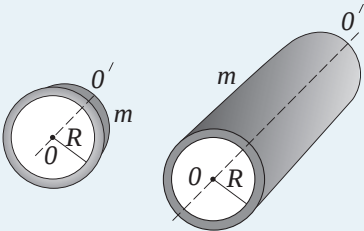
III. Момент инерции абсолютно твердого тела

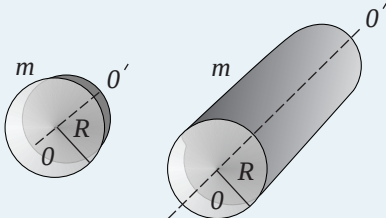
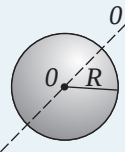
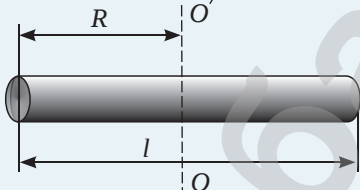
Момент инерции твердого тела равен сумме моментов инерций материальных точек, из которых состоит это тело:

$$I = \sum_{i=1}^n m_i \cdot R_i^2.$$

Инертные свойства вращающихся тел зависят не только от массы, но и от ее распределения по объему тела и радиуса вращения. Формулы расчета момента инерции для ряда геометрических фигур, вращающихся вокруг оси, проходящей через центр масс, даны в таблице 6.

Таблица 6. Моменты инерции тел, вращающихся вокруг оси, проходящей через центр масс

Форма тела	Формула расчета момента инерции
Тонкое кольцо, тонкий цилиндр 	$I = mR^2$

Форма тела		Формула расчета момента инерции
Сплошной диск, сплошной цилиндр		$I = \frac{mR^2}{2}$
Сплошной шар		$I = \frac{2}{5}mR^2$
Тонкий стержень		$I = \frac{1}{12}ml^2 = \frac{1}{3}mR^2$



Ответьте на вопросы

1. Можно ли утверждать, что момент инерции тела относительно оси, проходящей через центр масс тела, является наименьшим среди всех моментов инерции тела относительно осей, имеющих данное направление?
2. Почему момент инерции стержня при смещении оси вращения относительно центра масс возрастает?



Задание 2

Используя формулы таблицы 6, сравните моменты инерции равных по массе тел разной формы. Объясните, почему при равной массе момент инерции полого цилиндра больше, чем сплошного? Обруча больше, чем диска?

IV. Теорема Штейнера

Если для тела известен момент инерции I_1 относительно оси, проходящей через центр масс, то момент инерции относительно любой оси, параллельной центральной, можно найти по формуле, полученной швейцарским ученым-математиком Штейнером:

$$I_2 = I_1 + md^2,$$

где d – расстояние от центра масс до оси вращения.

Сместим ось вращения стержня на расстояние $d = \frac{1}{4}l$ от первоначального положения, тогда:

$$I_2 = \frac{1}{12}ml^2 + m\frac{1}{16}l^2 = \frac{7}{48}ml^2.$$



Задание 3

Определите момент инерции стержня, вращающегося вокруг своего конца. Во сколько раз увеличился момент инерции в сравнении с моментом инерции стержня, вращающегося вокруг центра масс?



Задание 4

Приведите примеры использования инерционных свойств абсолютно твердого тела.

V. Энергия вращающегося тела

Определим кинетическую энергию вращающегося абсолютно твердого тела, учтем $v = \omega R$:

$$W_{\text{вр}} = \sum_{i=1}^n \frac{m_i v_i^2}{2} = \sum_{i=1}^n \frac{m_i \omega_i^2 R_i^2}{2},$$

Сумма моментов инерции всех точек, из которых состоит тело, равна:

$$I = \sum_{i=1}^n m_i R_i^2.$$

Таким образом, энергию вращающегося тела определяют по формуле:

$$W_{\text{вр}} = \frac{I \omega^2}{2}.$$

Тело, которое одновременно участвует и в поступательном, и во вращательном движении, обладает кинетической энергией, равной:

$$W = W_n + W_{\text{вр}} = \frac{m v^2}{2} + \frac{I \omega^2}{2}.$$

Например, для катящегося обруча или колеса полная энергия равна:

$$W = W_n + W_{\text{вр}} = \frac{m v^2}{2} + \frac{I \omega^2}{2} = \frac{m v^2}{2} + \frac{m R^2 v^2}{2 R^2} = m v^2.$$

Полученное значение вдвое превышает кинетическую энергию тела такой же массы, движущегося поступательно.



Ответьте на вопросы

1. Почему вместо обычных колес на велосипедах гонщиков устанавливают диски (рис. 37)?
2. Почему в расчете кинетической энергии вращательного движения для всех точек абсолютно твердого тела используют одно и то же значение угловой скорости?
3. Какие точки абсолютно твердого тела движутся с одинаковой линейной скоростью?



Рис. 37. Соревнования, прошедшие на велотреке «Сарыарка»



Ответьте на вопросы

1. Почему при подаче мяча в волейболе спортсмен придает ему, кроме поступательного движения, еще вращательное?
2. Почему метатель диска совершает до броска вращательное движение (рис. 38)?



Рис. 38. Вращение метателя диска до броска

Контрольные вопросы

1. Какое тело называют абсолютно твердым?
2. Назовите величины, характеризующие вращательное движение тела.
3. Какую величину называют моментом силы? Моментом инерции?
4. В чем заключается теорема Штейнера?
5. Как связаны между собой энергия вращательного движения и момент инерции?

★ Упражнение

9

1. Чему равен момент инерции для тела массой 200 г, вращающегося по окружности радиусом 10 см, в момент, когда его скорость от нулевого значения изменилась до значения 1,4 м/с? Определите среднее значение угловой скорости.
2. Определите момент силы, приводящей автомобиль массой 2 т к ускоренному движению по закругленному участку пути радиусом 20 м. Угловое ускорение автомобиля 0,05 рад/с².
3. Определите момент инерции и кинетическую энергию Луны без учета энергии вращения вокруг своей оси. Радиус орбиты примите равным 384000 км, массу Луны $7 \cdot 10^{22}$ кг, период обращения вокруг Земли 27,3 суток.
4. Диск массой 2 кг катится без проскальзывания по горизонтальной плоскости со скоростью 4 м/с. Определите его кинетическую энергию.
5. Определите момент инерции сплошного стального шара массой 4,08 кг при вращении вокруг оси, проходящей через центр масс. Чему станет равен момент инерции шара при параллельном смещении оси на 2 см? Плотность стали 7800 кг/м³ (рис. 39).

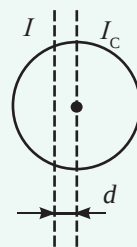


Рис. 39

Экспериментальное задание

Сравните тормозной путь двух велосипедов с разными по радиусу колесами. Какие колеса обладают большей инерционностью?

Творческое задание

Подготовьте сообщение на тему «Из истории использования маховиков».

§ 10. Момент импульса. Закон сохранения момента импульса и его связь со свойствами пространства. Основное уравнение динамики вращательного движения

Ожидаемый результат

Прочитав параграф, вы сможете:

- применять основное уравнение динамики вращательного движения в различных его формах при решении задач;
- проводить аналогии между физическими величинами, характеризующими поступательное и вращательное движения.

I. Второй закон Ньютона для вращательного движения материальной точки. Связь момента инерции и момента импульса

Запишем второй закон Ньютона в импульсном виде:

$$\vec{F} = \frac{\Delta \vec{p}}{\Delta t} = \frac{\Delta (m \vec{v})}{\Delta t}. \quad (1)$$

Умножим обе части уравнения на радиус окружности, получим:

$$\vec{F}R = \frac{\Delta (m \vec{v})}{\Delta t} R \text{ или } M = \frac{\Delta m v R}{\Delta t}. \quad (2)$$

Выражение $m \vec{v} R$ называют *моментом импульса* и обозначают буквой L :

$$L = m v R. \quad (3)$$

Величину, равную произведению импульса тела на радиус окружности, по которой движется тело, называют моментом импульса.

Второй закон в импульсном виде (2) примет вид:

$$M = \frac{\Delta L}{\Delta t}.$$

Определим соотношение момента импульса с моментом инерции. Для этого используем связь линейной скорости с угловой $v = \omega R$, из (3) получим:

$$L = m v R = m \omega R^2 = I \omega$$

или

$$L = I \omega. \quad (4)$$

Момент импульса прямо пропорционален моменту инерции.



Задание

Постройте на одной координатной плоскости графики зависимости момента инерции и момента импульса от радиуса вращения тела массой 200 г с частотой 2 Гц.
Какова зависимость момента инерции и момента импульса от радиуса вращения?

II. Второй закон Ньютона для абсолютно твердого вращающегося тела или основное уравнение динамики вращательного движения

Вращающееся абсолютно твердое тело можно представить как множество материальных точек, которые обладают массой m и вращаются вокруг оси $00'$ (рис. 40). Угловые скорости и ускорения всех точек абсолютно твердого тела одинаковы. Запишем второй закон Ньютона для рассматриваемого случая:

$$\sum_{i=1}^n M_i = \sum_{i=1}^n \frac{I_i \Delta\omega}{\Delta t}. \quad (5)$$

Левая часть выражения представляет собой сумму моментов внешних сил, приложенных к телу:

$$M = \sum_{i=1}^n M_i. \quad (6)$$

Заменим в правой части уравнения (5) сумму моментов инерции точек $\sum_{i=1}^n I_i$ на момент инерции тела I .

С учетом уравнения (6) второй закон Ньютона для вращающегося абсолютно твердого тела примет вид:

$$M = I \frac{\Delta\omega}{\Delta t} \quad \text{или} \quad M = I\varepsilon.$$

Сформулируем второй закон Ньютона для вращательного движения абсолютно твердого тела:

Сумма моментов внешних сил, приложенных к телу, равна произведению момента инерции тела на угловое ускорение.



Ответьте на вопрос

Почему скорость вращения фигуриста возрастает в момент, когда он прижимает руки к телу (рис. 41)?

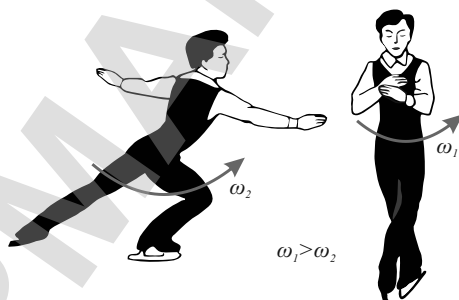


Рис. 41. Техника вращения

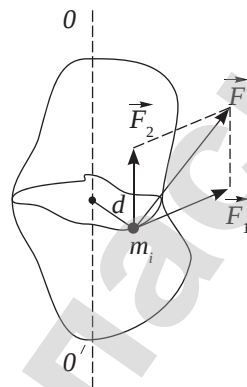


Рис. 40. Вращающееся вокруг оси $00'$ абсолютно твердое тело



Ответьте на вопросы

1. Почему для объемного тела, вращающегося вокруг своей оси, второй закон Ньютона записывают через угловые величины?
2. Какое действие оказывает на абсолютно твердое тело составляющая силы F_2 (рис. 40)?



Интересно знать!

До появления воды на Земле сутки длились около 5–6 часов. Приливные волны в океанах, вызванные притяжением Луны, замедляют суточное вращение нашей планеты.

III. Закон сохранения момента импульса и его связь со свойствами пространства

Пусть на тело как систему материальных точек не действуют внешние силы, тогда такую систему можно рассматривать как замкнутую. В этом случае момент сил равен нулю:

$$M = \frac{\Delta L}{\Delta t} = 0. \quad (7)$$

Из (7) следует, что момент импульса – величина постоянная, изменение момента импульса равно нулю $\Delta L = 0$:

$$L = I\omega = \text{const} \quad (8)$$

или

$$I_1\omega_1 = I_2\omega_2. \quad (9)$$

Полученные уравнения (8) и (9) выражают закон сохранения момента импульса.

В замкнутой системе момент импульса вращающихся тел остается величиной постоянной.

Закон сохранения момента импульса является следствием изотропности и однородности окружающего нас пространства.

Однородность означает, что в каждой точке пространства законы природы выполняются одинаковым образом, они имеют один и тот же вид. Изотропность пространства означает, что его свойства не зависят от направления. В какую бы сторону не вращалось твердое тело, его момент импульса будет определяться только моментом инерции и угловой скоростью. Изменение момента инерции в результате деформации тела приводит к изменению угловой скорости. Момент импульса при этом остается величиной постоянной.

IV. Гироскоп

Гироскопический эффект вращающихся тел, который заключается в сохранении ориентации оси вращения тела в пространстве, – это проявление инертных свойств материи.

Гироскопический эффект используют в транспортных средствах для ориентации в пространстве. *Навигационный прибор, основным элементом которого является быстро вращающийся ротор, получил название гироскоп (рис. 42).*

Гироскоп (от древнегреч. *gyreuo* – «вращаюсь» и *skopeo* – «наблюдаю») имеет три степени свободы ротора, которые обеспечиваются специальным креплением. Если на такое устройство действуют внешние силы, то ось собственного вращения ротора сохраняет постоянное направление в пространстве, так как крепление не оказывает заметного действия на его ось вращения.



Обратите внимание!

При вращательном движении работа внутренних сил приводит к изменению энергии и скорости вращения системы, что невозможно при поступательном движении тела. Если тела системы или части одного и того же тела приближаются к оси вращения, то кинетическая энергия системы возрастает. В этом случае внутренние силы совершают положительную работу против центробежной силы, стремящейся удалить тела от центра вращения. При удалении тел от центра вращения энергия системы уменьшается, скорость вращения снижается.

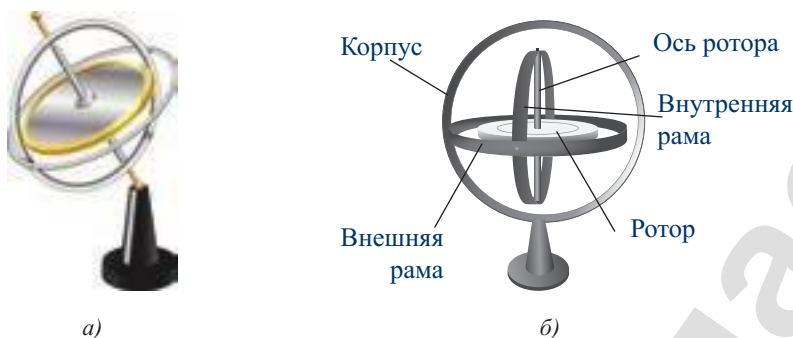


Рис. 42. Устройство гироскопа

Планеты Солнечной системы представляют собой гигантские гироскопы. Оси вращения Земли и других планет Солнечной системы тысячелетиями сохраняют ориентацию в пространстве.

ПРИМЕР РЕШЕНИЯ ЗАДАЧИ

На блок в виде сплошного диска массой m и радиусом R намотана нить, к концу которой подвешен груз массой m_0 . Найдите линейное ускорение, с которым движется груз m_0 . Трение в оси отсутствует, нить невесома.

Дано:

m, R, m_0

$a - ?$

Решение:

По условию задачи груз массой m_0 совершает поступательное движение с ускорением a , блок массой m – вращательное движение с угловым ускорением ε (см. рис.).

Запишем второй закон Ньютона для указанных тел с учетом направлений векторов: $m_0 g - F_{\text{н}} = m_0 a$ (1)

$$F_{\text{н}} R = I \varepsilon. \quad (2)$$

Учитывая связь тангенциального ускорения с угловым ускорением $a = \varepsilon R$, получим: $m_0 g - F_{\text{н}} = m_0 a$

$$F_{\text{н}} R = I \frac{a}{R}.$$

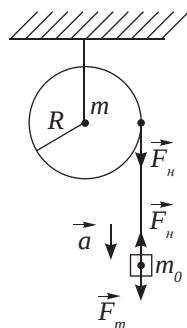
Выразим силу натяжения из второго уравнения $F_{\text{н}} = I \frac{a}{R^2}$ и подставим в первое

$$m_0 g - I \frac{a}{R^2} = m_0 a, \text{ получим формулу для расчета ускорения груза: } a = \frac{m_0 g}{\frac{I}{R^2} + m_0}.$$

Блок представляет собой сплошной диск, момент инерции которого равен:

$$I = \frac{m R^2}{2}, \text{ следовательно: } a = \frac{2 m_0}{m + 2 m_0} g.$$

Ответ: $a = \frac{2 m_0}{m + 2 m_0} g.$



Контрольные вопросы

1. Какую величину называют моментом импульса?
2. Сформулируйте второй закон Ньютона для абсолютно твердого вращающегося тела.
3. В чем заключается закон сохранения момента импульса? При каком условии он выполняется?
4. Что такое гироскоп? Где он получил применение?



Упражнение

10

1. Определите момент импульса тела массой 0,1 кг, вращающегося по окружности радиусом 2 м в горизонтальной плоскости с угловой скоростью 2π рад/с.
2. Определите момент силы, способной увеличить момент импульса тела массой 0,1 кг, вращающегося по окружности радиусом 2 м в горизонтальной плоскости с угловой скоростью 2π рад/с, вдвое в течение одного оборота.
3. Определите момент силы, совершившей работу 3,14 Дж при перемещении тела по окружности на $\varphi = 30^\circ$.
4. Две гири массой 0,2 кг и 0,1 кг соединены нитью и перекинута через блок массой 0,1 кг. Определите ускорение, с которым движутся гири, и натяжения нитей. Блок считать однородным диском. Трением пренебречь.
5. На барабан массой 9 кг намотан шнур, к концу которого привязан груз массой 2 кг. Определите ускорение, с которым движется груз. Барабан считать однородным цилиндром, трением пренебречь.

Экспериментальное задание

Используя диск вращения для здоровья, проверьте выполнение закона сохранения момента импульса (рис. 43).

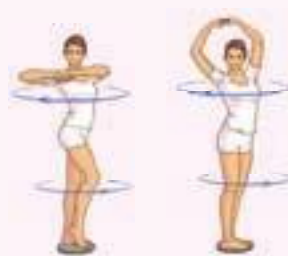


Рис. 43. Диск здоровья

Творческое задание

1. Составьте таблицу аналогии уравнений поступательного и вращательного движений.
2. Подготовьте сообщение по теме «Применение гироскопов в судоходстве, авиации и космонавтике».

Итоги главы 2

I закон Ньютона	II закон Ньютона	III закон Ньютона
$\sum_{i=1}^n \vec{F}_i = 0$ $\vec{F}_1 + \vec{F}_2 + \dots + \vec{F}_n = 0,$ $a = 0, v = \text{const}$	Для поступательного движения $\vec{F} = m\vec{a}, \vec{F} = \frac{\Delta \vec{p}}{\Delta t}$ Для вращательного движения $M = I\varepsilon, M = \frac{\Delta L}{\Delta t}$	$\vec{F}_1 = -\vec{F}_2$
Закон всемирного тяготения		
Для тел, удаленных друг от друга $F = \frac{Gm_1m_2}{R^2}$	Для тела, находящегося на поверхности другого $F = mg$	Для тела, находящегося внутри другого $F = \frac{4}{3}\pi G\rho mR$

Законы динамики

I закон Ньютона

Существуют инерциальные системы отсчета, относительно которых тело движется прямолинейно и равномерно, если на тело не действуют силы или действие сил скомпенсировано.

II закон Ньютона

Ускорение, с которым движется тело, прямо пропорционально равнодействующей сил, действующих на него, и обратно пропорционально его массе.

III закон Ньютона для вращательного движения абсолютно твердого тела

Сумма моментов внешних сил, приложенных к телу, равна произведению момента инерции тела на угловое ускорение.

III закон Ньютона

Тела взаимодействуют силами, равными по модулю и противоположными по направлению. Они являются силами одной природы, приложены к разным телам, действуют вдоль одной прямой.

Закон сохранения момента импульса

В замкнутой системе момент импульса вращающихся тел остается постоянной величиной.

Глоссарий

Абсолютно твердое тело – тело, деформацией которого при взаимодействии с другими телами можно пренебречь.

Динамика – раздел механики, посвященный изучению движения тел под действием приложенных к ним сил.

Момент импульса – величина, равная произведению импульса тела на радиус окружности, по которой движется тело.

Момент инерции – величина, характеризующая инерционные свойства вращающегося тела, зависящая от массы тела и радиуса вращения.

Моментом силы называют произведение силы на плечо силы.

Силы внутренние – силы взаимодействия между телами замкнутой системы.

Сила инерции – сила, равная произведению массы тела на ускорение системы отсчета. Она приложена к телу и направлена в сторону, противоположную ускорению системы.

ГЛАВА 3

СТАТИКА

Статика (от греч. $\sigma\tau\alpha\tau\acute{o}\varsigma$ – учение о равновесии) – раздел механики, посвященный изучению условий равновесия материальных тел под действием сил.

Изучив подраздел, вы сможете:

- находить центр масс абсолютно твердого тела и системы материальных тел;
- устанавливать причинно-следственные связи при объяснении различных видов равновесия;
- определить величины сил опытным путем;
- экспериментально проверить закон сложения сил.

§ 11. Центр масс

Ожидаемый результат

Прочитав параграф, вы сможете:

- находить центр масс абсолютно твердого тела и системы материальных тел.



Задание 1

Поясните по рис. 44 метод определения центра тяжести тела.

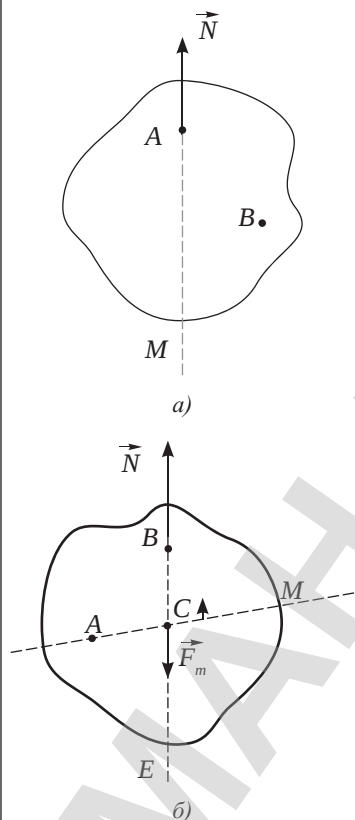


Рис. 44. Нахождение центра тяжести тела по отвесной линии

I. Центр тяжести и центр масс тела

Из курса 7 класса физики вам известны понятия центр масс и центр тяжести.

Центр тяжести – это точка приложения силы тяжести, действующей на тело в любом положении.

Центр масс – это точка пересечения линий действия сил, приводящих тело в поступательное движение.

Центр тяжести совпадает с центром масс во всех взаимодействиях, происходящих на Земле, так как размеры всех тел значительно меньше Земли.

Под действием силы тяжести тело движется поступательно, все точки тела совершают одинаковое перемещение.



Эксперимент

1. Определите центр тяжести тела неправильной формы в соответствии с рассмотренным методом.
2. Изменив постановку опыта (рис. 45), определите центр масс того же предмета.

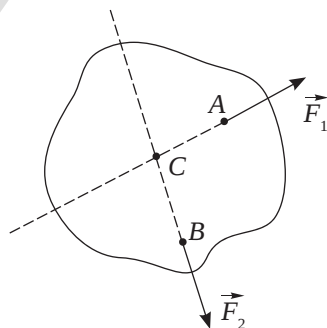


Рис. 45. Определение центра масс тела



Ответьте на вопросы

1. Что нужно было изменить в постановке опыта для определения центра масс тела?
2. Почему центр масс совпал с центром тяжести?

Вспомним, что центр тяжести тела правильной формы совпадает с его центром симметрии. Для шара, кольца, диска – это их геометрический центр

(рис. 46, а), для цилиндра и трубы – это середина оси (рис. 46, б), для куба, прямоугольного параллелепипеда – это точка пересечения диагоналей (рис. 46, в).

Изучая поступательное движение тел под действием нескольких сил, мы заменяли их материальной точкой, в которой сосредоточена вся масса тела, этой точкой является *центр масс*.

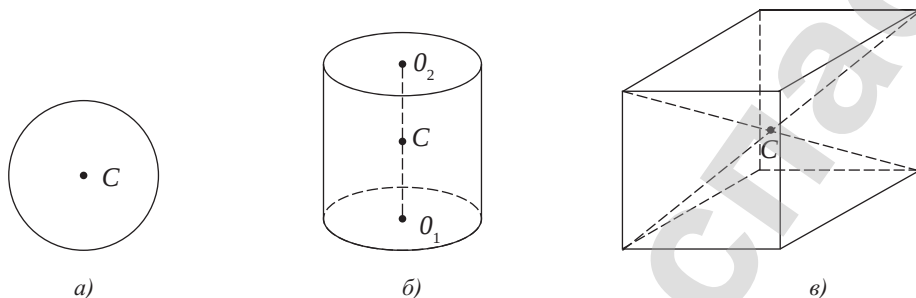


Рис. 46. Центр масс расположен в геометрическом центре фигуры правильной формы

II. Условие вращательного движения абсолютно твердого тела

Окружающие нас тела совершают как поступательные движения, так и вращательные. Нам известно, что движение тела поступательное в том случае, если линия действия приложенной к телу силы или равнодействующей всех сил проходит через центр масс тела. *Под действием сил, линия действия которых не проходит через центр масс, тело совершает вращательное движение.*



Запомните!

Тело совершает вращательное движение под действием сил, линия действия которых не проходит через центр масс тела.

Здания, мосты, разнообразные сооружения испытывают действие различных сил: как природных, так и технических, при этом они должны оставаться в покое. О покоящихся телах говорят, что они находятся в равновесии. *Раздел механики, в котором изучают равновесие абсолютно твердых тел, называют статикой.*

III. Условия равновесия абсолютно твердого тела

Тело находится в равновесии при соблюдении двух условий:

1) Сумма внешних сил, приложенных к телу, равна нулю:

$$\sum_{i=1}^n \vec{F}_i \text{ или } \vec{F}_1 + \vec{F}_2 + \dots + \vec{F}_n = 0. \quad (1)$$

В проекциях на выбранные оси выражение (1) примет вид:

$$\begin{aligned} F_{1x} + F_{2x} + \dots + F_{nx} &= 0, \\ F_{1y} + F_{2y} + \dots + F_{ny} &= 0, \\ F_{1z} + F_{2z} + \dots + F_{nz} &= 0. \end{aligned}$$



Ответьте на вопросы

1. Почему сила, линия действия которой не проходит через центр тяжести, приводит тело во вращение?
2. Почему длинный стержень легче держать в горизонтальном положении за его середину, чем за один из его концов?

- 2) Сумма моментов всех внешних сил, действующих на него относительно любой оси вращения, равна нулю:

$$\sum_{i=1}^n M_i = 0 \text{ или } M_1 + M_2 + \dots + M_n = 0, \quad (2)$$

$$M = Fd,$$

где M – момент силы, d – плечо силы (рис. 47).

Момент силы положительный, если сила вращает тело против часовой стрелки, отрицательный – если по часовой стрелке.

При выполнении второго условия исключается равномерное вращение тела, если в начальный момент времени его угловая скорость была равна нулю.

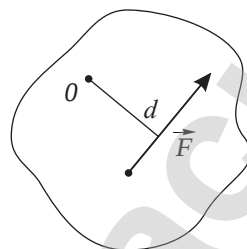


Рис. 47. Плечо образует прямой угол с линией действия силы

IV. Координаты центра масс

Определим координаты центра масс для тела более сложной конфигурации.

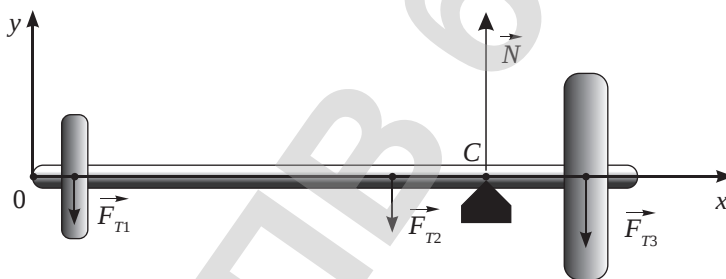


Рис. 48. Определение координаты центра масс C штанги

Рассмотрим равновесие штанги, на конце которой подвешены диски разной массы (рис. 48). Определим координату центра масс C , выбрав за точку вращения крайнюю левую точку O на оси штанги. Запишем условия равновесия:

$$\vec{F}_{T1} + \vec{F}_{T2} + \vec{F}_{T3} + \vec{N} = 0, \quad (3)$$

$$M_1 + M_2 + M_3 + M_4 = 0. \quad (4)$$

Выразим плечи сил через координаты, тогда плечи сил тяжести, действующих на диски штанги и стержень, будут равны x_1, x_2, x_3 . Координату центра тяжести обозначим x_c . Уравнение (4) примет вид:

$$-m_1gx_1 - m_2gx_2 - m_3gx_3 + Nx_c = 0. \quad (5)$$

Из первого условия равновесия (3) в проекции на ось Oy определим силу реакции опоры:

$$-m_1g - m_2g - m_3g + N = 0, \quad \text{следовательно: } N = (m_1 + m_2 + m_3)g. \quad (6)$$



Эксперимент

1. Определите координаты центра масс ходового винта с двумя гайками (рис. 49).
2. Проверьте верность расчетов, подставив под центр масс опору.



Рис. 49. Ходовой винт с гайками

Полученное выражение подставим в (5) и решим относительно координаты центра тяжести:

$$x_c = \frac{m_1 x_1 + m_2 x_2 + m_3 x_3}{m_1 + m_2 + m_3}. \quad (7)$$

Обобщим результат для случая, когда число тел равно n :

$$x_c = \frac{m_1 x_1 + m_2 x_2 + \dots + m_n x_n}{m_1 + m_2 + \dots + m_n}$$

$$\text{или } x_{cx} = \frac{\sum_{i=1}^n m_i x_i}{\sum_{i=1}^n m_i}. \quad (8)$$

Аналогично определяют координату центра тяжести по оси Ox и Oz :

$$y_c = \frac{\sum_{i=1}^n m_i y_i}{\sum_{i=1}^n m_i} \quad z_c = \frac{\sum_{i=1}^n m_i z_i}{\sum_{i=1}^n m_i}.$$



Задание 2

Составьте алгоритм решения задач на нахождение координат центра масс тела (системы тел).

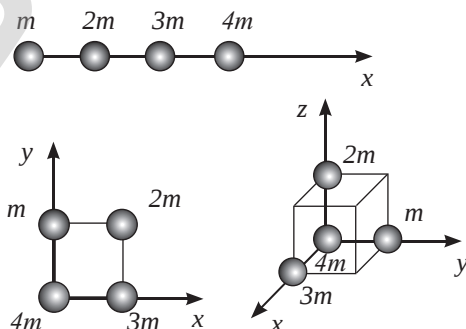


Обратите внимание!

Положение центра масс системы тел можно определять по тем же формулам. Пространственное движение системы тел, например, двойных звезд, связанных гравитационными силами, рассматривают относительно их центра масс.

ПРИМЕР РЕШЕНИЯ ЗАДАЧИ

Определите положение центра масс системы (см. рис.), состоящей из четырех шаров, массы которых равны соответственно m , $2m$, $3m$ и $4m$, в следующих случаях: а) шары расположены на одной прямой; б) шары расположены на вершинах квадрата; в) шары расположены на четырех смежных вершинах куба. Во всех случаях расстояние между соседними шарами равно 15 см. Направление координатных осей показано на рисунке.



Дано:

m
 $2m$
 $3m$
 $4m$

$x_c - ?$
 $y_c - ?$
 $z_c - ?$

Решение:

а) $x_c = \frac{m_1 x_1 + m_2 x_2 + m_3 x_3 + m_4 x_4}{m_1 + m_2 + m_3 + m_4}.$

Координаты шаров определим относительно первого шара, подставим в формулу расчета координаты центра масс:

$$x_c = \frac{m \cdot 0 + 2m \cdot 0,15 + 3m \cdot 0,30 + 4m \cdot 0,45}{m + 2m + 3m + 4m} = 0,3m.$$

б) $x_c = \frac{m_1 x_1 + m_2 x_2 + m_3 x_3 + m_4 x_4}{m_1 + m_2 + m_3 + m_4}, \quad y_c = \frac{m_1 y_1 + m_2 y_2 + m_3 y_3 + m_4 y_4}{m_1 + m_2 + m_3 + m_4}.$

Координаты шаров определим относительно четвертого шара, подставим в формулу расчета координат центра масс:

$$x_c = \frac{m \cdot 0 + 2m \cdot 0,15 + 3m \cdot 0,15 + 4m \cdot 0}{m + 2m + 3m + 4m} = 0,075m;$$

$$y_c = \frac{m \cdot 0,15 + 2m \cdot 0,15 + 3m \cdot 0 + 4m \cdot 0}{m + 2m + 3m + 4m} = 0,045m.$$

$$в) \quad x_c = \frac{m_1 x_1 + m_2 x_2 + m_3 x_3 + m_4 x_4}{m_1 + m_2 + m_3 + m_4}; \quad y_c = \frac{m_1 y_1 + m_2 y_2 + m_3 y_3 + m_4 y_4}{m_1 + m_2 + m_3 + m_4}.$$

$$z_c = \frac{m_1 z_1 + m_2 z_2 + m_3 z_3 + m_4 z_4}{m_1 + m_2 + m_3 + m_4};$$

координаты шаров определим относительно четвертого шара, подставим в формулу расчета координат центра масс:

$$x_c = \frac{m \cdot 0 + 2m \cdot 0 + 3m \cdot 0,15 + 4m \cdot 0}{m + 2m + 3m + 4m} = 0,045m;$$

$$y_c = \frac{m \cdot 0,15 + 2m \cdot 0 + 3m \cdot 0 + 4m \cdot 0}{m + 2m + 3m + 4m} = 0,015m;$$

$$z_c = \frac{m \cdot 0 + 2m \cdot 0,15 + 3m \cdot 0 + 4m \cdot 0}{m + 2m + 3m + 4m} = 0,030m.$$

Ответ: а) $x_c = 0,3 \text{ м}$;

б) $x_c = 0,075 \text{ м}$; $y_c = 0,045 \text{ м}$;

в) $x_c = 0,045 \text{ м}$; $y_c = 0,015 \text{ м}$; $z_c = 0,03 \text{ м}$.

Контрольные вопросы

1. При каком условии тело совершает вращательное движение?
2. Что изучает статика?
3. При каких условиях тело остается в равновесии?
4. Как определяют координаты центра масс тела? Системы тел?



Упражнение

11

1. Бревно длиной 12 м можно уравновесить в горизонтальном положении на подставке, отстоящей на 3 м от его толстого конца. Если же подставка находится в 6 м от толстого конца, и на тонкий конец сядет рабочий массой 60 кг, то бревно снова будет в равновесии. Определите массу бревна.
2. К концам стержня массой 10 кг и длиной 40 см подвешены грузы массами 40 кг и 10 кг. Где необходимо подпереть стержень, чтобы он находился в равновесии?
3. Одна половина цилиндрического стержня состоит из стали, другая — из алюминия. Определить положение центра тяжести, если длина стержня 30 см.

4. Расстояние между осями передних и задних колес автомобиля равно 2,3 м. При взвешивании автомобиля на весовой платформе выяснилось, что нагрузка на передние колеса составляет 9 кН, а на задние – 6,5 кН. На каком расстоянии от передней оси находится центр тяжести?
5. Определите координаты центра в мм масс однородных пластин, размеры которых даны на *рисунке 50*.

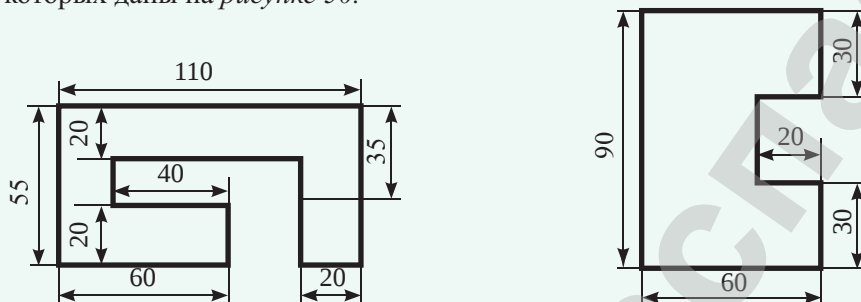


Рис. 50. Однородные пластины

6. Определите координату центра тяжести x_C однородного диска радиусом R с круглым отверстием относительно точки O . Радиус отверстия равен половине радиуса диска $r = R/2$ (*рис. 51*).

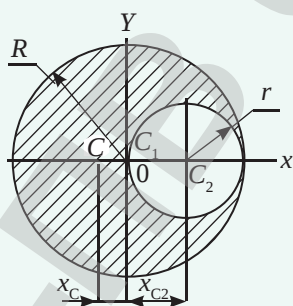


Рис. 51. К упражнению 11.6

Экспериментальное задание

Вырежьте фигуры из картона по размерам, указанным на *рисунке 50*. Убедитесь в верности ваших расчетов.

Творческое задание

Оцените координаты центра масс Солнечной системы относительно центра масс Солнца во время Большого парада, когда шесть планет оказываются по одну сторону от Солнца в небольшом секторе. К ним относятся: Венера, Земля, Марс, Юпитер, Сатурн, Уран. Выполните расчет координат, предположив, что все планеты находятся на одной прямой.

§ 12. Виды равновесия

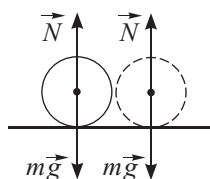
Ожидаемый результат

Прочитав параграф, вы сможете:

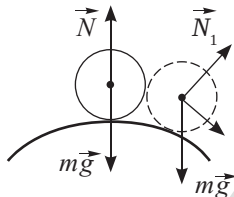
- устанавливать причинно-следственные связи при объяснении различных видов равновесия.

Задание 1

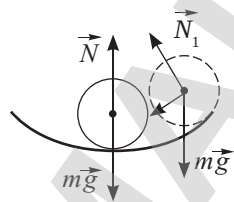
Назовите виды равновесия, изображенные на рисунке 52.



а)



б)



в)

Рис. 52. Виды равновесия

I. Виды равновесия

Равновесие – это состояние тела или системы тел, при котором под действием приложенных сил оно остается в покое.

Существует три вида равновесия: *устойчивое*, *неустойчивое* и *безразличное* (рис. 52).

Равновесие называют устойчивым, если тело, выведенное из положения равновесия и предоставленное самому себе, возвращается в прежнее положение.

При отклонении тела от положения устойчивого равновесия возникают силы, возвращающие тело в положение равновесия. В устойчивом равновесии центр тяжести тела занимает самое низкое положение из всех возможных. В положении устойчивого равновесия тело обладает минимальной потенциальной энергией. Устойчивым равновесием обладает, например, кресло-качалка.

Равновесие называют неустойчивым, если тело, выведенное из положения равновесия и предоставленное самому себе, будет еще больше отклоняться от положения равновесия.

При самом незначительном отклонении от положения неустойчивого равновесия равнодействующая сил, действующих на тело, увеличит отклонение тела от положения равновесия. В положении неустойчивого равновесия высота центра тяжести наибольшая, следовательно, потенциальная энергия тела имеет максимальное значение. В состоянии неустойчивого равновесия находится, например, канатоходец (рис. 53).

Равновесие называют безразличным, если тело, выведенное из положения равновесия и предоставленное самому себе, не меняет своего состояния.

Задание 2

Приведите примеры тел, находящихся в устойчивом, неустойчивом и безразличном равновесии.

При безразличном равновесии потенциальная энергия тела не меняется, так как высота центра тяжести остается на прежнем уровне. Безразличное равновесие характерно шарообразным телам, колесам, катящимся по горизонтальной поверхности.



Интересно знать!

Уши человека и животных нужны не только для того, чтобы слышать, во внутреннем ухе находится орган, который отвечает за равновесие тела. (рис. 54)



Рис. 54. Строение органа слуха

II. Устойчивость равновесия тела на опоре. Опрокидывание

Большинство тел вокруг нас: здания, предметы мебели и обихода, машины, качели и карусели, сам человек — покоятся на опорах. Выясним, при каких условиях устойчивость сооружений возрастает. Рассмотрим устойчивость равновесия бруска (рис. 56). Его можно наклонить до некоторого предельного угла, затем он опрокинется. Предельный угол наклона

определяют геометрически: $\operatorname{tg} \alpha_0 = \frac{L}{H}$

(рис. 56, в). Опытным путем можно убедиться в том, что тело на опоре можно наклонять до тех пор, пока вертикаль, проведенная через центр тяжести, пересекает площадь опоры (рис. 56, б). В этом случае момент силы тяжести имеет положительное значение, тело вращается против часовой стрелки и возвращается в исходное состояние. Как только вертикаль проходит за пределы площади опоры, момент силы становится отрицательным, тело опрокидывается (рис. 56, г). Следовательно, чем больше площадь опоры и ниже тело, тем оно устойчивее.

Центр масс бруска имеет наименьшую высоту в положении устойчивого равновесия, она равна $H/2$ (рис. 56, а). В положении неустойчивого равновесия высота центра масс повышается до максимального значения (рис. 56, в).

Тело, имеющее площадь опоры, находится в равновесии, если вертикальная прямая, проходящая через центр тяжести тела, не выходит за пределы площади опоры этого тела.



Рис. 53. Канатоходец в неустойчивом равновесии



Интересно знать!

Майкл Грэб — американский художник, который специализируется на создании невероятных по конструкции скульптур из камней (рис. 55). Он выстраивает каменные скульптуры без использования каких-либо подручных скрепляющих материалов.



Рис. 55. Камни в скульптуре находятся в неустойчивом равновесии

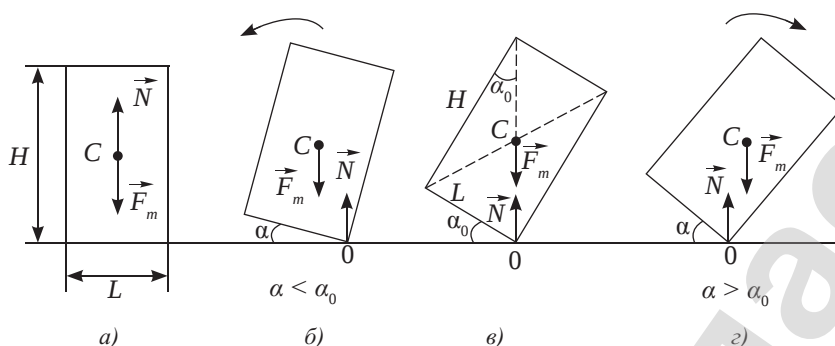


Рис. 56. Условие опрокидывания тела на опоре



Ответьте на вопросы

1. Почему небоскребы сужены в верхней части (рис. 57)?



Рис. 57. Небоскреб в Дубае, высота 828 м, 163 этажа

2. Объясните принцип действия игрушки-неваляшки (рис. 58)?

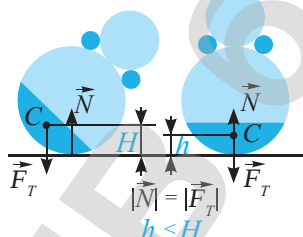


Рис. 58. Игрушка-неваляшка обладает устойчивым равновесием

3. Почему груз необходимо загружать не на палубы, а в трюмы кораблей (рис. 59)?

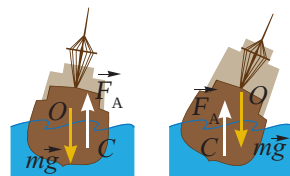


Рис. 59. Устойчивое и неустойчивое равновесие корабля

III. Устойчивость равновесия тела на подвесе

Тело, имеющее ось вращения, находится в равновесии, если вертикальная прямая, проходящая через центр тяжести тела C , проходит через ось вращения (рис. 61, а). При этом, если центр тяжести C выше оси вращения, то при любом отклонении от положения равновесия потенциальная энергия уменьшается, и момент силы тяжести относительно оси O отклоняет тело дальше от положения равновесия. Это неустойчивое положение равновесия.

Если центр тяжести находится ниже оси вращения, то равновесие устойчивое (рис. 61, б). При любом отклонении потенциальная энергия увеличивается, момент силы тяжести возвращает тело в положение равновесия.

Если центр тяжести и ось вращения совпадают (рис. 61, в), то положение равновесия безразличное.



Задание 3

Изобразите силы, действующие на порожний и груженный грузовые автомобили. Почему груженные автомобили могут опрокидываться на поворотах (рис. 60)?



Рис. 60. Опрокидывание прицепа грузовика, груженого щебнем

В положении безразличного равновесия находятся морские животные – киты, моржи, тюлени.

В устойчивом равновесии находится маятник механических часов. Для отклонения от положения равновесия необходимо приложить к маятнику силу.

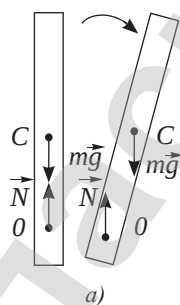
Контрольные вопросы

1. Какие виды равновесия существуют?
2. При каких условиях тело находится в устойчивом, неустойчивом и безразличном равновесии?
3. При каком условии тело на опоре опрокидывается?
4. Почему бревна не плавают вертикально?

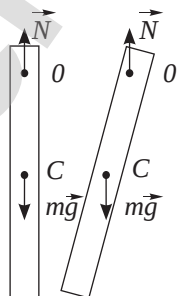
★ Упражнение

12

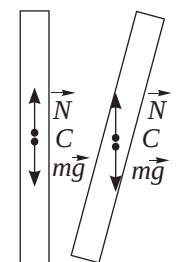
1. Определить виды равновесия в следующих случаях: 1) бильярдный шар в лузе; 2) бусина на горизонтально натянутой нити; 3) брусок на наклонной плоскости; 4) гимнаст, идущий по канату; 5) шарик в конической воронке; 6) лестница, которую прислонили к стене; 7) коробка, лежащая на полу
2. На доске стоит цилиндр высотой h и диаметром $d = h/2$. Доску начинают медленно поднимать за один конец. Что произойдет раньше: опрокинется ли цилиндр или начнет скользить? Коэффициент трения между поверхностями цилиндра и доски $\mu = 0,4$.



a)



b)



v)

Рис. 61. Равновесие тела на оси вращения

Экспериментальное задание

Используя материалы сети Интернет, проведите опыт с гвоздями (рис. 62). Объясните, почему гвозди сохраняют положение равновесия.

Творческое задание

1. Изготовьте из подручных материалов куклу-неваляшку.
2. Подготовьте сообщение по темам (на выбор):
 1. «Виды равновесия в цирковых трюках».
 2. «Роль равновесия в различных видах спорта».

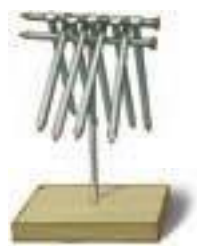


Рис. 62.
К экспериментальному заданию

Итоги главы 3

Условия равновесия	Координаты центра масс
$\sum_{i=1}^n \vec{F}_i = 0$ $\sum_{i=1}^n M_i = 0$ $M = Fd$	$x_c = \frac{\sum_{i=1}^n m_i x_i}{\sum_{i=1}^n m_i} \quad y_c = \frac{\sum_{i=1}^n m_i y_i}{\sum_{i=1}^n m_i} \quad z_c = \frac{\sum_{i=1}^n m_i z_i}{\sum_{i=1}^n m_i}$

Условия равновесия абсолютно твердого тела

- 1) Сумма внешних сил, приложенных к телу, равна нулю.
- 2) Сумма моментов всех внешних сил, действующих на тело относительно любой оси вращения, равна нулю.

Глоссарий

Плечо силы – кратчайшее расстояние от оси вращения тела до линии действия силы.

Равновесие – состояние тела или системы тел, при котором оно остается в покое под действием приложенных сил.

Статика – раздел механики, посвященный изучению условий равновесия материальных тел под действием сил.

Центр масс – точка пересечения линий действия сил, приводящих тело в поступательное движение.

Центр тяжести – точка приложения силы тяжести, действующей на тело в любом положении.

ГЛАВА 4

ЗАКОНЫ СОХРАНЕНИЯ

Законы сохранения импульса и энергии для тел замкнутой системы являются следствиями законов Ньютона.

Законы сохранения позволяют, не рассматривая силы, действующие на тела системы, и не прослеживая движение тел из одного состояния в другое, решать задачи динамики.

Законы сохранения импульса и полной механической энергии выполняются для тел замкнутой системы любых размеров: как для частиц микромира, так и космических тел. Законы справедливы и в том случае, когда на тела системы действуют внешние силы, но их равнодействующая равна нулю.

В земных условиях такими силами являются сила притяжения Земли и сила реакции опоры.

Изучив главу, вы сможете:

- применять законы сохранения при решении расчетных и экспериментальных задач.

§ 13. Законы сохранения импульса и механической энергии, их связь со свойствами пространства и времени

Ожидаемый результат

Прочитав параграф, вы сможете:

- применять законы сохранения при решении расчетных и экспериментальных задач.

I. Закон сохранения импульса для замкнутой системы

Закон сохранения импульса является следствием второго и третьего законов Ньютона.

Импульс замкнутой системы взаимодействующих тел остается величиной постоянной, если геометрическая сумма внешних сил, действующих на тела системы, равна нулю.

$$\vec{p}_c = \sum_{i=1}^n m_i \vec{v}_i = \text{const}, \quad (1)$$

где $\vec{p}_c$ – геометрическая сумма импульсов тел, входящих в систему, n – число тел в системе, i – порядковый номер тела, Σ – знак суммы.

Формула (1) при упругом взаимодействии трех тел примет вид:

$$m_1 \vec{v}_1 + m_2 \vec{v}_2 + m_3 \vec{v}_3 = m_1 \vec{u}_1 + m_2 \vec{u}_2 + m_3 \vec{u}_3, \quad (2)$$

где $\vec{v}_1, \vec{v}_2, \vec{v}_3$ – скорости тел до взаимодействия; $\vec{u}_1, \vec{u}_2, \vec{u}_3$ – скорости тел после взаимодействия.

При неупругом взаимодействии закон сохранения примет вид:

$$m_1 \vec{v}_1 + m_2 \vec{v}_2 + m_3 \vec{v}_3 = (m_1 + m_2 + m_3) \vec{u}, \quad (3)$$

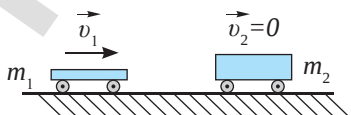
где $\vec{u}$ – скорость тел после взаимодействия.

II. Модуль суммы импульсов тел замкнутой системы

Для определения модуля суммы импульсов тел можно использовать координатный метод. Выбор данного метода позволяет выразить модуль суммы импульсов тел системы через суммы проекций импульсов тел на оси Ox, Oy, Oz :

$$p = \sqrt{p_x^2 + p_y^2 + p_z^2}, \quad (4)$$

до взаимодействия



после взаимодействия

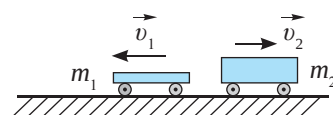


Рис. 63. Упругое столкновение с неподвижной тележкой

Задание 1

Докажите, что закон сохранения импульса является следствием второго и третьего законов Ньютона.

Ответьте на вопросы

1. Почему запись закона сохранения импульса для абсолютно упругого удара отличается от записи для неупругого удара?
2. Почему законы сохранения выполняются только для замкнутых систем?

Задание 2

Запишите закон сохранения импульса для тел, изображенных на рисунках 63–65.

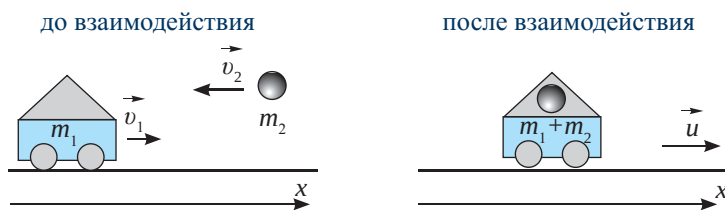


Рис. 64. Неупругое взаимодействие тел

Значение суммы проекций на выбранные оси p_x , p_y , p_z определяют по формулам:

$$\begin{aligned} p_x &= p_{1x} + p_{2x} + \dots + p_{nx}, \\ p_y &= p_{1y} + p_{2y} + \dots + p_{ny}, \\ p_z &= p_{1z} + p_{2z} + \dots + p_{nz}, \end{aligned}$$

где p_{1x} , p_{2x} , ..., p_{nx} – проекции импульсов n тел, входящих в систему на ось Ox ,

p_{1y} , p_{2y} , ..., p_{ny} – проекции импульсов тел на ось Oy ,

p_{1z} , p_{2z} , ..., p_{nz} – на ось Oz .

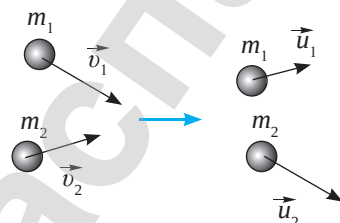


Рис. 65. Упругое столкновение движущихся шаров

III. Закон сохранения энергии

Полная механическая энергия системы, равная сумме кинетической и потенциальной энергий, сохраняется в том случае, когда в системе действуют силы, зависящие только от расстояний между телами. Их называют *консервативными силами*.

К консервативным силам относятся сила тяготения и сила упругости. *Работа консервативных сил может быть выражена как приращение потенциальной энергии, взятой с противоположным знаком:*

$$A = -(mgh_2 - mgh_1); \quad A = -\left(\frac{kx_2^2}{2} - \frac{kx_1^2}{2}\right)$$

или
$$A = -(W_{p2} - W_{p1}). \quad (5)$$

Работу любой силы можно определить по теореме об изменении кинетической энергии:

$$A = Fs = ma \frac{v_2^2 - v_1^2}{2a} = \frac{mv_2^2}{2} - \frac{mv_1^2}{2}.$$

или
$$A = W_{k2} - W_{k1}. \quad (6)$$

Из равенств (5) и (6) следует, что:

$$W_{k1} + W_{p1} = W_{k2} + W_{p2},$$

таким образом:

$$W = W_k + W_p = \text{const},$$

что является выражением закона сохранения полной механической энергии.



Ответьте на вопрос

Почему решить задачу упругого столкновения тел с использованием только закона сохранения импульса невозможно?



Задание 3

1. Напишите формулы расчета потенциальной энергии:
 - а) тела, находящегося в поле гравитации у поверхности небесного тела и вдали от него;
 - б) деформированной пружины (стержня).
2. Напишите формулу расчета кинетической энергии движущегося тела.

Энергия системы, состоящей из n тел, определяется как сумма энергий каждого тела системы. Кинетическая и потенциальная энергии для первого состояния будут равны:

$$W_{k1} = \sum_{i=1}^n W_{ki}, \quad W_{p1} = \sum_{i=1}^n W_{pi};$$

для второго состояния – аналогичные:

$$W_{k2} = \sum_{i=1}^n W_{ki}, \quad W_{p2} = \sum_{i=1}^n W_{pi};$$

где i – порядковый номер тела в системе.

В замкнутой системе тел, в которой действуют только консервативные силы, полная механическая энергия остается величиной постоянной.

IV. Связь свойств пространства и времени с законами сохранения

В §10 упоминалось об основных свойствах пространства – однородности и изотропности. Однородность пространства заключается в равноправии всех его точек, изотропность проявляется в равноправии всех направлений. Время обладает свойством однородности. Однородность времени означает, что все моменты времени равноправны, любой из них можно принимать за начальную точку отсчета. Указанные свойства пространства и времени связаны с законами сохранения импульса и энергии.

В основе закона сохранения импульса лежит однородность пространства. Многочисленные опыты и исследования показали, что параллельный перенос замкнутой системы из одного места пространства в другое без изменения взаимного расположения и скоростей частиц не изменяет механических свойств системы. Импульс системы тел остается величиной постоянной.

В основе закона сохранения энергии лежит однородность времени. Для замкнутой системы закон сохранения энергии выполняется для любого выбранного интервала времени.

Пространственно-временные интервалы инвариантны и абсолютны по отношению ко всем системам отсчета, в которых рассматриваются взаимодействия тел замкнутой системы.



Интересно знать!

Действие маятника Ньютона основано на законах сохранения импульса и энергии при упругом взаимодействии тел равной массы. Если отклонить первый шарик и отпустить, то его энергия передается без изменения через средние шарики последнему, который приобретает ту же скорость и поднимается на ту же высоту. Он в свою очередь снова передает свой импульс и энергию по цепочке первому шарiku (рис. 66).

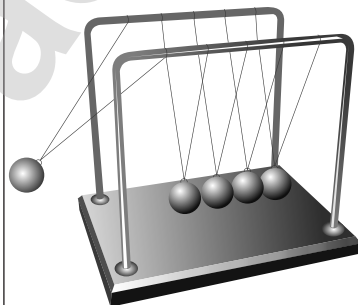


Рис. 66. Маятник Ньютона



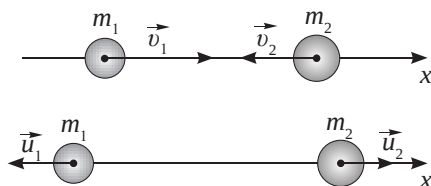
Ответьте на вопрос

Почему в маятнике Ньютона используются шарики равной массы?

ПРИМЕР РЕШЕНИЯ ЗАДАЧИ

Тела массами m_1 и m_2 движутся навстречу со скоростями $\vec{v}_1$ и $\vec{v}_2$, (см. рис.). Определите скорости тел $\vec{u}_1$ и $\vec{u}_2$ после центрального упругого удара для частных случаев:

а) $v_{2x} = 0$; б) $m_1 = m_2$.



Запомните!

Если начальные скорости шаров направлены по линии, соединяющей их центры, то удар называют центральным (см. рис.).

Дано:

m_1

m_2

v_1

v_2

$u_1 - ?$

$u_2 - ?$

Решение:

Закон сохранения импульса в проекциях на ось Ox имеет вид:

$$m_1 v_{1x} + m_2 v_{2x} = m_1 u_{1x} + m_2 u_{2x}. \quad (1)$$

Запишем для двух шаров закон сохранения кинетической энергии:

$$\frac{m_1 v_{1x}^2}{2} + \frac{m_2 v_{2x}^2}{2} = \frac{m_1 u_{1x}^2}{2} + \frac{m_2 u_{2x}^2}{2}. \quad (2)$$

Решим полученную систему уравнений с двумя неизвестными u_{1x} и u_{2x} .

В полученных уравнениях перенесем импульс и энергию первого тела в правую часть, импульс и энергию второго тела в левую часть уравнений, результат запишем, отобразив зеркально в виде:

$$m_1 (u_{1x} - v_{1x}) = m_2 (v_{2x} - u_{2x}), \quad (3)$$

$$m_1 (u_{1x}^2 - v_{1x}^2) = m_2 (v_{2x}^2 - u_{2x}^2). \quad (4)$$

Поделив второе уравнение на первое, получим:

$$u_{1x} + v_{1x} = u_{2x} + v_{2x}. \quad (5)$$

Умножим обе части уравнения (5) на m_2 и сложим полученный результат с уравнением (3), получим формулу расчета скорости после упругого удара для первого тела:

$$u_{1x} = \frac{(m_1 - m_2)v_{1x} + 2m_2 v_{2x}}{m_1 + m_2}. \quad (6)$$

Подставив (6) в (5), получим выражение для расчета проекции скорости второго тела:

$$u_{2x} = \frac{(m_1 - m_2)v_{2x} + 2m_1 v_{1x}}{m_1 + m_2}. \quad (7)$$

Рассмотрим частные случаи:

а) Пусть второй шар до удара покоился: $v_{2x} = 0$, тогда из (6) и (7) следует:

$$u_{1x} = \frac{(m_1 - m_2)v_{1x}}{m_1 + m_2}, \quad u_{2x} = \frac{2m_1 v_{1x}}{m_1 + m_2}.$$

Выводы: Если $m_1 > m_2$, первый шар продолжает двигаться в том же направлении, что и до удара, но с меньшей скоростью.

Если $m_1 < m_2$, то первый шар после удара отскакивает назад.

Второй шар в обоих случаях будет двигаться в ту же сторону, куда двигался до удара первый шар.

б) Пусть оба шара имеют одинаковую массу, тогда:

$$u_{1x} = \frac{2m v_{2x}}{2m} = v_{2x}, \quad u_{2x} = \frac{2m v_{1x}}{2m} = v_{1x}.$$

Вывод: Шары равной массы при абсолютно упругом ударе обмениваются скоростями.

Контрольные вопросы

1. Сформулируйте закон сохранения импульса.
2. Как определяют сумму импульсов тел координатным методом?
3. Какую энергию называют потенциальной?
4. Как определяют потенциальную энергию тела у поверхности небесного тела? Вдали от небесного тела?
5. Как работа консервативных сил связана с потенциальной энергией тела?
6. Сформулируйте закон сохранения полной механической энергии.
7. Следствием каких свойств пространства являются закон сохранения импульса и закон сохранения полной механической энергии?



Упражнение

13

1. Железнодорожный вагон массой 10^4 кг, движущийся со скоростью 25 м/с, сталкивается с неподвижным вагоном массой $1,5 \cdot 10^4$ кг. С какой скоростью будут двигаться вагоны, если между ними сработает сцепка?
2. В модели ракеты общей массой 600 г содержится 350 г пороха. Выход газов происходит мгновенно со скоростью 300 м/с. Сопротивление воздуха движению ракеты уменьшает высоту подъема в 6 раз. Определите высоту подъема ракеты, примите $g = 10 \text{ м/с}^2$.
3. Два одинаковых абсолютно упругих шара движутся по гладкой горизонтальной поверхности навстречу друг к другу со скоростями 10 м/с и 5 м/с. С какими скоростями и в каком направлении будут двигаться шары после столкновения?
4. Пловец массой 70 кг прыгает в воду с вышки, находящейся на высоте 10 м над поверхностью воды, и погружается на глубину 3 м. Выбрав поверхность воды за нулевой уровень, определите потенциальную энергию пловца на вышке и в момент максимального погружения.
5. Спутник массой 1000 кг движется по круговой орбите вокруг Земли на высоте 1000 км от ее поверхности. Определите потенциальную, кинетическую и полную энергии спутника.

6. Шар массой 0,02 кг, выпущенный из игрушечного пружинного пистолета, летит вертикально вверх на высоту 57,6 см. Определите сжатие пружины, жесткость которой равна 400 Н/м.
7. Определите вторую космическую скорость для нашей планеты.

Экспериментальное задание

1. Исследуйте упругое нецентральное столкновение шаров равной массы. Выясните, под каким углом разлетаются шары равной массы. Зависит ли угол разлета α от смещения центров масс шаров d (рис. 67)?

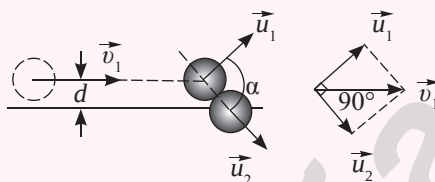


Рис. 67. К экспериментальному заданию 1

2. При упругом ударе тела массой m о неподвижную преграду его скорость и импульс меняются только по направлению. Исследуйте зависимость значений скорости и импульса от направления и величины скорости преграды. Постановку опыта продумайте самостоятельно. На рисунке 68 изображена техника нападающего удара в волейболе. Поясните действие спортсмена на основе проведенного вами исследования. В каких видах спорта используется зависимость изменения импульса тела от скорости движения преграды?

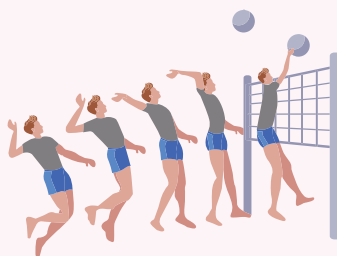


Рис. 68.
К экспериментальному заданию 2

Творческое задание

Подготовьте сообщение о роли закона сохранения энергии в расчете второй космической скорости и первых запусках межконтинентальных космических кораблей.

Итоги главы 4

Законы сохранения	Энергия	Работа
Импульс $\vec{p}_c = \sum_{i=1}^n m_i \vec{v}_i = const$ Энергии $W = W_k + W_p = const$	Кинетическая $W_k = \frac{m v^2}{2}$ Потенциальная $W_p = \frac{kx^2}{2}$ $W_p = mgh$ $W_p = \frac{GMm}{R}$	$A = \frac{m v_2^2}{2} - \frac{m v_1^2}{2}$ $A = -(W_{p2} - W_{p1})$ $A = \left(\frac{kx_2^2}{2} - \frac{kx_1^2}{2} \right)$ $A = -(mgh_2 - mgh_1)$ $A = - \left(\frac{GMm}{R_2} - \frac{GMm}{R_1} \right)$

Законы динамики

Закон сохранения импульса

Импульс замкнутой системы взаимодействующих тел остается величиной постоянной, если сумма внешних сил, действующих на тела системы, равна нулю.

Закон сохранения энергии

В замкнутой системе тел, в которых действуют только консервативные силы, полная механическая энергия остается величиной постоянной.

Глоссарий

Силы консервативные – силы, зависящие только от расстояния между взаимодействующими телами, к ним относятся силы тяготения и упругости.

Центральный удар – столкновение тел, движущихся со скоростями, направленными вдоль линии, соединяющей центры масс тел.

ГЛАВА 5

МЕХАНИКА ЖИДКОСТЕЙ И ГАЗОВ

Законам гидро- и аэродинамики подчиняются движение воды в реке или по трубам водопроводов, крови в кровеносных сосудах, огромных масс атмосферного воздуха.

Исследование движения жидкостей и газов усложняется явлениями, связанными с наличием внутреннего трения между их слоями и сжимаемостью газов. В данной главе мы рассмотрим движение твердых тел в идеальной жидкости и ее течение.

Изучив главу, вы сможете:

- описывать ламинарное и турбулентное течения жидкостей и газов;
- применять уравнение неразрывности и уравнение Бернулли при решении экспериментальных, расчетных и качественных задач;
- применять формулу Торричелли при решении экспериментальных, расчетных и качественных задач;
- определять факторы, влияющие на результат эксперимента, и предлагать пути его улучшения.

§ 14. Гидродинамика. Ламинарное и турбулентное течения жидкостей и газов

Ожидаемый результат

Прочитав параграф, вы сможете:

- описывать ламинарное и турбулентное течения жидкостей и газов.



Даниил Бернулли (1700–1782) – швейцарский физик и математик, академик Петербургской академии наук с 1725 по 1733 г., член Парижской академии наук с 1748 г., один из создателей кинетической теории газов, гидродинамики и математической физики, автор монографии «Гидродинамика».

I. Гидро- и аэродинамика

Исторически гидро- и аэродинамика возникла в связи с исследованиями движения судов с целью повышения их мореходных качеств, изучением принципов работы паруса, винта, крыла, насоса и других устройств. Основы гидродинамики были заложены в XVIII веке в трудах Даниила Бернулли, Жана Лерона Д'Аламбера, Леонарда Эйлера. Термин «гидродинамика» принадлежит Бернулли.

Гидро- и аэродинамика – это раздел механики, изучающий движение жидкостей и газов, а также взаимодействие движущихся жидкостей и газов с твердыми телами.

Гидродинамика используется в различных сферах деятельности человека. Ее используют при проектировании кораблей и летательных аппаратов, водопроводов и нефтепроводов, насосов и гидротурбин. К задачам гидродинамики относятся вычисление подъемной силы и силы сопротивления, действующих на движущееся тело. Для упрощения решения задач гидродинамики введены понятия «идеальная жидкость», «элемент тока».

Идеальная жидкость – это жидкость, вязкостью и сжимаемостью которой можно пренебречь.

В идеальной жидкости нет трения между ее слоями.

Элемент тока – это условно выделенный малый объем жидкости (газа), изменением формы которого при движении можно пренебречь.

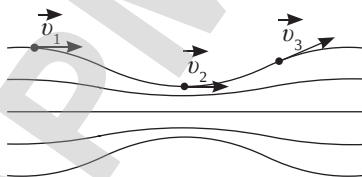


Рис.69. Линии тока

II. Наблюдение движения жидкостей. Линии тока. Трубка тока

Один из способов изучения движения жидкости заключается в следующем: в жидкость подмешивают металлические блестки и делают фотоснимок с малой выдержкой при сильном освещении. На снимке блестки

выглядят как черточки, длины которых пропорциональны скорости течения жидкости. По направлению движения блесток можно судить о направлении течения жидкости в любой точке ее поверхности. При увеличении выдержки фотосъемки черточки сливаются в сплошные линии, которые называют *линиями тока* (рис. 69). Таким методом изучал течение жидкости Эйлер.

Линии тока – это линии, касательные к которым совпадают по направлению со скоростью течения жидкости в соответствующих точках пространства.

При исследовании движения жидкости можно рассматривать трубку тока.

Трубка тока – это объем жидкости или газа, ограниченный линиями тока.

Скорость жидкости или газа в каждой точке линии тока направлена по касательной, следовательно, *жидкость, находящаяся внутри трубки тока, не пересекает ее боковой поверхности.*

III. Ламинарное и турбулентное течение

Законы гидродинамики выполняются для жидкости с ламинарным течением.

Течение ламинарное, если слои жидкости, не перемешиваясь, скользят относительно друг друга.

На рисунке 70 изображены линии тока при ламинарном течении.

Ламинарным, или слоистым, является течение воды в спокойных реках (рис. 71). Ламинарная струя фонтана выглядит, как стеклянный стержень (рис. 72). Установки для получения ламинарной струи используются в светодинамических и светомузыкальных фонтанах.

При увеличении скорости течения жидкости наступает момент, когда возникают вихри, и течение становится турбулентным (рис. 73).

Течение турбулентное, если сопровождается перемешиванием слоев жидкости с образованием завихрений.

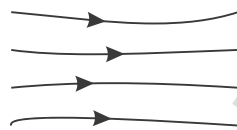


Рис. 70. Линии тока при ламинарном течении



Рис. 71. Река Буктырма, ламинарное течение



Рис. 72. При ламинарном течении площадь сечения трубки тока сохраняется

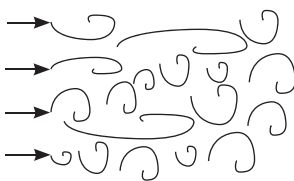


Рис. 73. Линии тока при турбулентном течении



Задание

1. Предложите способы определения средней скорости турбулентного течения жидкости.
2. Предложите установку для определения скорости ветра.

В турбулентном течении мгновенные значения скорости и давления в данной точке жидкости или газа меняются случайным образом. При одних и тех же условиях распределение этих величин во всем объеме жидкости будет различным и практически не повторяющимся. Для турбулентного течения используют средние значения скорости и давления. Турбулентные потоки изучают экспериментально.

Течение жидкости и газа может быть различным: установившимся и не установившимся. Установившимся, или *стационарным* движением, называется такое движение жидкости, при котором в данной точке русла давление и скорость не изменяются со временем.

Течение стационарное, если во всех точках пространства скорости элементов жидкости не меняются со временем.

Течение жидкости, при котором скорость и давление в любой точке меняются со временем, называют не установившимся, или нестационарным.

IV. Кинематическое описание движения жидкости или газа

При описании движения идеальной жидкости применимы законы механики, которые выполняются для твердых тел. Весь объем жидкости или газа делят на малые элементы и рассматривают их движение в пространстве. Например, при определении давления, созданного воздушным потоком на стенку, можно использовать второй закон Ньютона в импульсном виде:

$$\sum_{i=1}^n \vec{F}_i t = \sum \Delta m_i \Delta \vec{v},$$

где Δm_i – элемент воздушного потока, n – число элементов воздушного потока столкнувшихся со стенкой за промежуток времени t , $\vec{F}_i$ – сила давления, созданная элементом воздушного потока.

Контрольные вопросы

1. Какую жидкость называют идеальной?
2. Что такое линии тока? Трубка тока?
3. Какие виды течений жидкостей и газов вам известны? В чем их различие?
4. В чем заключается кинематическое описание движения жидкости и газа?



Ответьте на вопросы

1. Почему течение реки в широкой части ламинарное, а в узкой может стать турбулентным? Почему течение воды в водопадах турбулентное (рис. 74)?

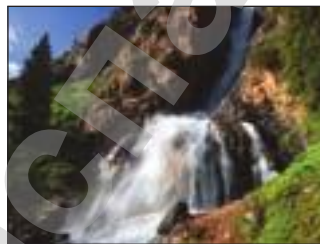


Рис. 74. Водопад Бурканбулак. Жетысу Алатау

2. Почему теоретически рассчитать мгновенные значения давления и скорости элементов тока в турбулентном течении невозможно?
3. Почему турбулентное течение опасно для водного транспорта и воздушных судов?

1. Определите скорость ветра, если он оказывает давление на стену 200 Па. Ветер дует перпендикулярно стене. Плотность воздуха $1,29 \text{ кг/м}^3$.
2. Определите силу давления ураганного ветра на стену дома высотой 30 м и длиной 50 м. Скорость ветра достигает 40 м/с и направлена под углом 30° к стене. Сравните давление ветра с атмосферным давлением. Примите поток воздуха вблизи стены ламинарным.
3. Рассчитайте силу давления и скорость ламинарной струи диаметром 13 мм в точке падения на водную поверхность, если максимальная высота ее подъема 2 м. Установка для струи закреплена под углом 45° к горизонту на уровне свободной поверхности воды в фонтане. Сопротивлением воздуха пренебречь.

Экспериментальное задание

Определите скорость течения воды у берега реки (арыка). Охарактеризуйте вид течения на наблюдаемом участке. Выясните, есть ли в реке (в арыке) участки с турбулентным течением. При каком условии течение становится турбулентным?

Творческое задание

Подготовьте сообщение по темам (на выбор):

1. «Основатели гидродинамики».
2. «Применение законов гидро- и аэродинамики в прогнозе погоды».
3. «Управляемые фонтаны с ламинарным течением: устройство и принцип действия» (рис. 75).



Рис. 75. Фонтан с ламинарным течением, г. Нур-Султан

§ 15. Уравнение неразрывности.

Уравнение Бернулли. Подъемная сила

Ожидаемый результат

Прочитав параграф, вы сможете:

- применять уравнение неразрывности и уравнение Бернулли при решении экспериментальных, расчетных и качественных задач.

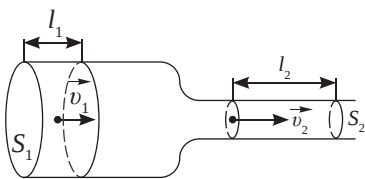


Рис. 76. Трубка тока разного сечения

I. Уравнение неразрывности для жидкости и несжимаемого газа

Рассмотрим два сечения трубки тока площадями S_1 и S_2 (рис. 76) с соответствующими скоростями движения жидкости $\vec{v}_1$ и $\vec{v}_2$. Пусть движение жидкости в трубке стационарное.

При стационарном движении все частицы проходят точки пространства с соответствующими им скоростями.

За промежуток времени Δt через сечение S_1 проходит жидкость объемом $V_1 = S_1 l_1 = S_1 v_1 \Delta t$. Через второе сечение S_2 за это же время: $V_2 = S_2 l_2 = S_2 v_2 \Delta t$. Для несжимаемой жидкости $V_1 = V_2$, следовательно:

$$S_1 v_1 = S_2 v_2 \text{ или } \frac{v_1}{v_2} = \frac{S_2}{S_1}.$$

Получено соотношение, которое называют **уравнением неразрывности**.

Задание 1

Объясните понижение давления в трубе меньшего сечения на основе второго закона Ньютона и уравнения неразрывности.

Модули скоростей несжимаемой жидкости обратно пропорциональны площадям сечения трубок тока.

II. Давление в движущихся жидкостях и газах

Определим давление жидкости в трубе переменного сечения с помощью жидкостных манометров (рис. 77). Опыт показывает, что в широких частях трубы давление больше, чем в узких. На основании уравнения неразрывности следует, что в той части трубы, где сечение больше, скорость течения меньше.

Эксперимент

Измерьте давление в прозрачной трубе разного сечения, заполненной водой при условиях:

- 1) вода находится в покое.
- 2) вода течет по трубе (рис. 77).

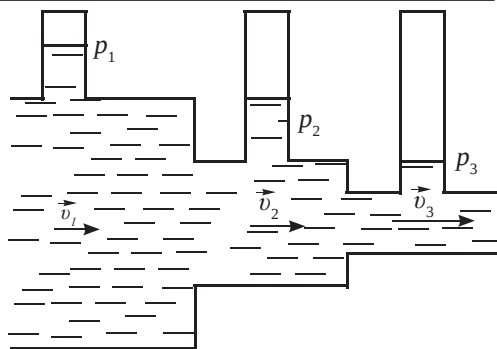


Рис. 77. Измерение давления жидкости в различных сечениях трубы

При стационарном течении жидкости давление больше в той части трубы, где скорость течения меньше.

Зависимость давления жидкости от скорости ее стационарного течения в математической форме была установлена швейцарским физиком Даниилом Бернулли в 1738 г.

III. Уравнение Бернулли

Закон сохранения энергии в применении к движущейся в трубке идеальной жидкости получил название *уравнения Бернулли*. Пусть трубка тока переменного сечения расположена под некоторым углом к горизонту (рис. 78). Выделим объем жидкости,

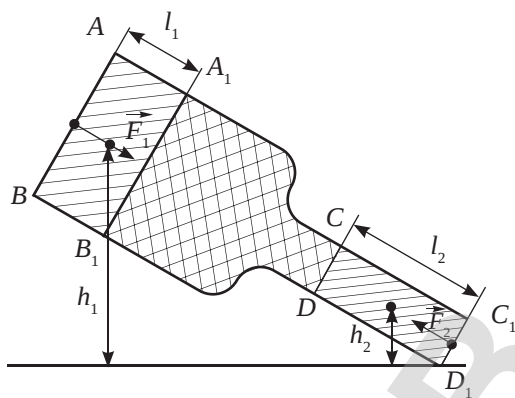


Рис. 78. Течение идеальной жидкости в трубке с разным сечением



Ответьте на вопросы

1. Почему работа внешней силы $\vec{F}_2$ при выводе уравнения Бернулли взята с отрицательным знаком?
2. Какие устройства могут создать внешние силы $\vec{F}_1$ и $\vec{F}_2$, действующие на жидкость в трубке?
3. Что произойдет, если жидкость направить из тонкой части трубы в широкую?

ограниченный сечением AB в широкой части трубки и CD в ее узкой части. Под действием силы тяжести и внешних сил давления $\vec{F}_1$ и $\vec{F}_2$ выделенный объем жидкости через малый промежуток времени Δt займет часть трубы, ограниченную сечением A_1B_1 и C_1D_1 .

Рассмотрев рисунок 78, приходим к выводу, что энергия жидкости, заключенной между сечениями A_1B_1 и CD , остается неизменной. Работа внешних сил определяется изменением энергии жидкости, ограниченной сечениями AB и A_1B_1 , при перемещении в узкую часть трубы между сечениями CD и C_1D_1 :

$$A = \Delta E. \quad (1)$$

Определим работу внешних сил $\vec{F}_1$ и $\vec{F}_2$:

$$A = A_1 + A_2 = F_1 l_1 - F_2 l_2 = p_1 S_1 v_1 \Delta t - p_2 S_2 v_2 \Delta t, \quad (2)$$

где: $F_1 = p_1 S_1$; $F_2 = p_2 S_2$; $l_1 = v_1 \Delta t$; $l_2 = v_2 \Delta t$.

Изменение полной механической энергии выделенного объема жидкости при переходе из одного состояния в другое определим как сумму изменения потенциальной и кинетической энергии:

$$\Delta E = \Delta E_k + \Delta E_p = \frac{1}{2} \rho \Delta V (v_2^2 - v_1^2) + \rho g (S_2 l_2 h_2 - S_1 l_1 h_1). \quad (3)$$

Подставим уравнения (2) и (3) в (1) и, учитывая, что $S_1 v_1 \Delta t - S_2 v_2 \Delta t = V$, получим:

$$(p_1 - p_2)\Delta V = \frac{1}{2}\rho\Delta V(v_2^2 - v_1^2) + \rho g\Delta V(h_2 - h_1).$$

Сократим на ΔV , равенство примет вид:

$$p_1 - p_2 = \frac{1}{2}\rho v_2^2 - \frac{1}{2}\rho v_1^2 + \rho gh_2 - \rho gh_1$$

откуда
$$p_1 + \rho gh_1 + \frac{\rho v_1^2}{2} = p_2 + \rho gh_2 + \frac{\rho v_2^2}{2} \quad (4)$$

или
$$p + \rho gh + \frac{\rho v^2}{2} = \text{const} . \quad (5)$$

Полученные выражения (4) и (5) называют уравнением Бернулли для идеальной жидкости или законом сохранения плотности энергии для движущихся жидкостей и газов.

Согласно уравнению Бернулли:

Полное давление в установившемся потоке жидкости остается постоянным вдоль этого потока.

Полное давление состоит из весового ρgh , статического p и динамического $\frac{\rho v^2}{2}$ давлений.



Задание 2

Запишите уравнение Бернулли для жидкости, текущей:

- 1) по горизонтальной трубе с разным сечением;
- 2) по наклоненной трубе с открытыми концами.



Интересно знать!

Выдающуюся роль в развитии аэродинамики сыграл «отец русской авиации» – Николай Егорович Жуковский (1847–1921). Заслуга Жуковского состоит в том, что он впервые объяснил образование подъемной силы крыла и сформулировал теорему для вычисления этой силы.

IV. Подъемная сила крыла

Основным приспособлением, служащим для изучения законов движения тел в воздухе, является аэродинамическая труба. В одном конце трубы установлен мощный вентилятор, приводимый во вращение электродвигателем (рис. 79). В них исследуют не только модели, но и реальные самолеты. Аэродинамические трубы изготавливают различных размеров.



Рис. 79. Испытание модели самолета в аэродинамической трубе

На рисунке 80 представлена картина обтекания пластины, плоскость которой направлена перпендикулярно потоку, созданному в аэродинамической трубе. Плотность воздуха перед пластиной возрастает, за пластиной – уменьшается. Воздух устремляется в разреженное пространство и создает завихрения. При этом пластина не перемещается по вертикали. Если между пластиной и потоком воздуха образуется острый угол, то разность давлений создает аэродинамическую силу, пластина поднимается (рис. 81) или опускается. Угол наклона назван углом атаки, его обозначают греческой буквой α .

Аэродинамическая сила возникает не только за счет угла атаки, она создается несимметричным профилем крыла. Над крылом скорость потока больше, чем под крылом, благодаря тому, что верхняя часть более выпуклая (рис. 82). Согласно уравнению Бернулли, давление на нижнюю часть крыла больше, чем над крылом. Чем больше скорость набегающего на крыло потока, тем больше разность давлений и аэродинамическая сила R , которую можно разложить на подъемную силу F_y и силу лобового сопротивления F_x (рис. 83).

С увеличением угла наклона подъемная сила возрастает, лобовое сопротивление уменьшается. При критическом значении угла атаки происходит отрыв потока от поверхности крыла, подъемная сила пропадает, сила сопротивления резко возрастает. Самолет входит в «штопор» (рис. 84).

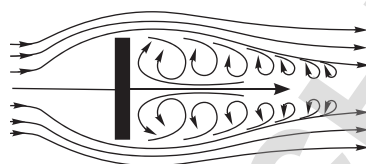


Рис. 80. Обтекание потоком воздуха плоской пластины, перпендикулярной направлению потока.

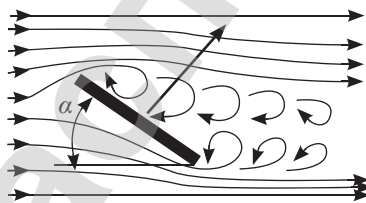


Рис. 81. Аэродинамическая сила зависит от угла атаки

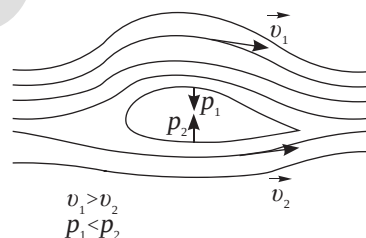


Рис. 82. Аэродинамическая сила зависит от формы сечения крыла

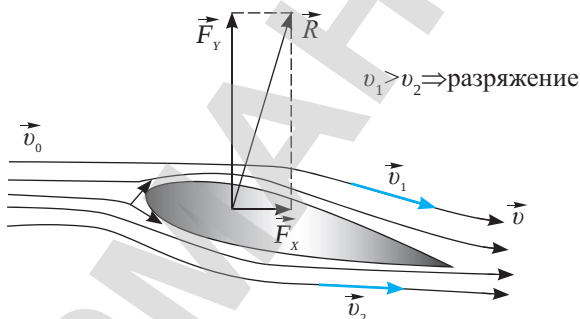


Рис. 83. Подъемная сила $\vec{F}_y$ и сила лобового сопротивления F_x – составляющие аэродинамической силы R

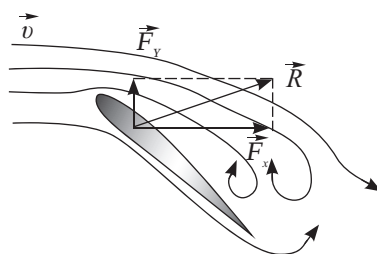


Рис. 84. Критический угол атаки вводит самолет в штопор

Контрольные вопросы

1. Сформулируйте уравнение неразрывности. Для каких жидкостей и газов оно справедливо?
2. Как зависит давление жидкости в трубе от скорости течения жидкости?
3. Соотношение каких величин устанавливает уравнение Бернулли?
4. Какую силу называют силой лобового сопротивления?
Какую силу – подъемной?



Упражнение

15

1. В широкой части горизонтальной трубы вода течет со скоростью 8 см/с при давлении, равном $1,5 \cdot 10^5$ Па. В узкой части трубы давление равно $1,4 \cdot 10^5$ Па. Определите скорость течения в узкой части трубы без учета трения.
2. В широкой части трубы нефть течет со скоростью 2 м/с. Определите скорость течения нефти в узкой части трубы, если разность давлений в широкой и узкой части трубы составляет 50 мм рт. ст.
3. По горизонтальной трубе переменного сечения течет вода. Площади поперечных сечений трубы в узкой и широкой ее части равны 10 см^2 и 20 см^2 соответственно. Разность давлений в указанных сечениях 200 мм водного столба. Определите объем воды, проходящий через произвольное сечение трубы за 1 с.
4. Трубка расположена горизонтально. В широкой части трубы диаметром D расположен поршень, на него действует постоянная сила F . Узкая часть трубы имеет диаметр d , из нее вытекает струя воды. Определите скорость перемещения поршня, трение не учитывайте.

Творческое задание

Подготовьте сообщение по темам (на выбор):

1. «Технология изготовления и запуска воздушного змея».
2. «Режимы полета самолета».
3. «Устройство и принцип действия водоструйного насоса, карбюратора».

§ 16. Течение вязкой жидкости. Формула Стокса. Обтекание тел

Ожидаемый результат

Прочитав параграф, вы сможете:

- применять формулы Торричелли и Стокса при решении экспериментальных, расчетных и качественных задач.



Ответьте на вопросы

1. Почему жидкий клей при низкой температуре становится тягучим?
2. Почему капля масла растекается по стеклу медленнее, чем капля воды?

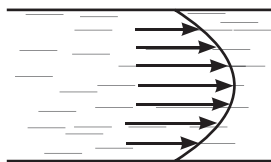


Рис. 85. Скорость течения воды максимальна в середине трубы

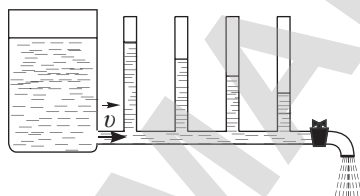


Рис. 86. Понижение давления жидкости по направлению течения

I. Течение вязкой жидкости

Скорость течения различных слоев жидкости в трубе или реке неодинакова. У краев трубы или у берега и дна реки скорость меньше, чем в середине. На рисунке 85 изображено распределение скорости жидкости по сечению трубы: скорость меняется от нуля у стенки до максимального значения в середине трубы. Различие скоростей объясняется вязкостью жидкости или действием сил внутреннего трения между ее слоями.

Вязкость – это свойство реальных жидкостей оказывать сопротивление перемещению одной части жидкости относительно другой.

Вязкость жидкости возрастает с уменьшением температуры. Скорость течения воды в реке в осенний период уменьшается и может практически прекратиться в зимний период.

Существование сил внутреннего трения приводит к понижению давления по направлению течения жидкости вдоль трубы, чем дальше от начала трубы, тем меньше давление текущей жидкости. В этом можно убедиться на опыте, воспользовавшись прибором, изображенным на рисунке 86.

Если кран прибора закрыть, то во всех манометрических трубках уровень жидкости станет одинаковым, так как сила трения в покоящейся жидкости отсутствует. При устройстве водопроводов необходимо учитывать падение давления в трубах. Чем больше число открытых кранов, тем быстрее течет вода и тем сильнее падает напор воды. Для поддержания стационарного течения жидкости в трубе необходим перепад давления на ее входе и выходе.



Возьмите на заметку

Факторы, влияющие на понижение давления в водопроводе с трубами разного сечения:

- уменьшение площади сечения трубы,
- вязкость жидкости.



Задание 1

Используя уравнение Бернулли, выведите формулу расчета скорости истечения воды из отверстия сосуда (рис. 87).

Сравните с формулой, полученной Э. Торричелли:

$$v_2 = \sqrt{2gh}.$$



Ответьте на вопрос

Почему для идеальной жидкости, находящейся в сосуде с отверстием, уменьшение высоты столба жидкости в сосуде не влияет на значение скорости истечения через отверстие?

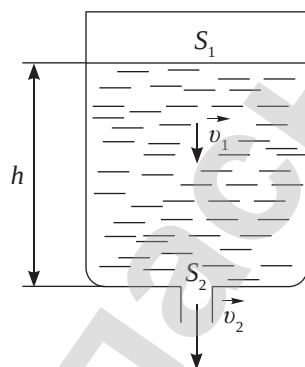


Рис. 87. К практическому заданию 1

II. Движение тел в жидкостях и газах.

Формула Стокса

При движении тел в жидкостях и газах возникают силы сопротивления. Они вызваны двумя причинами:

- 1) трением среды о поверхность тела;
- 2) изменением потока жидкости или газа при обтекании тела.

Сила лобового сопротивления среды зависит от вязкости среды, а также от скорости движения тела, его размеров и формы.

Сила лобового сопротивления, которую испытывает шарик, падающий в вязкой жидкости или газе, определяется формулой Стокса, названной в честь английского физика, внесшего значительный вклад в гидродинамику, Джорджа Габриеля Стокса:

$$F = 6\pi\eta rv,$$

где: η – коэффициент внутреннего трения жидкости или газа или динамическая вязкость, единица измерения $[\eta] - 1 \text{ Па} \cdot \text{с}$; r – радиус шарика; v – скорость шарика.

Формула Стокса позволяет определить вязкость жидкостей. Приборы, созданные для определения вязкости жидкостей, называют вискозиметрами. Действие вискозиметра Гепплера основано на законе Стокса, он представляет собой трубку, в которую помещается вязкая среда (рис. 88). Вязкость определяется по скорости прохождения падающим шариком промежутков между метками на трубке вискозиметра, который позволяет вести измерения с погрешностью в пределах от 1 до 3 %.



Рис. 88. Вискозиметр

III. Обтекание тел

Для уменьшения силы сопротивления, вызванной изменением потока жидкости или газа, твердым телам придают обтекаемую форму. На рисунке 89 показаны линии тока вокруг пластины и тела обтекаемой формы. За пластиной образуется область беспорядочного вихревого движения, где давление сильно падает (рис. 89, а), обтекаемое тело нарушает линии тока незначительно (рис. 89, б).

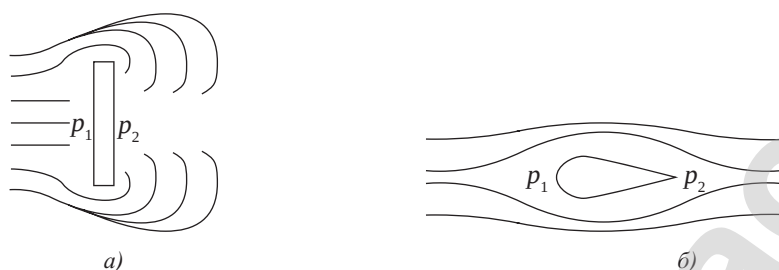


Рис. 89. Сила сопротивления среды зависит от формы тела

При малом значении скорости повышение давления в передней части тела менее значительно, чем понижение позади него, поэтому придание обтекаемой формы задней части в этом случае более существенно (рис. 90). Такую форму имеют самолеты, дирижабли, подводные лодки, быстро плавающие морские животные – дельфины, акулы, киты.

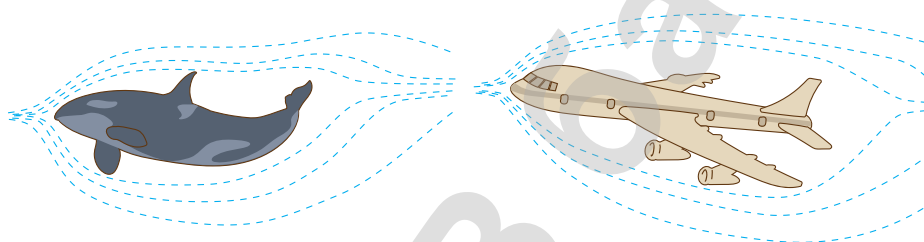


Рис. 90. При малых скоростях обтекаемую форму придают задней части устройства

При движении тел со сверхзвуковой скоростью сопротивление воздуха сильно возрастает в передней части тела. Воздух, сжатый в носовой части сверхзвуковых самолетов, ракет и снарядов, не может удалиться по направлению движения тела, создается мощный звуковой барьер. Воздух подобен натянутой тетиве лука, для уменьшения сопротивления воздуха необходимо заострять переднюю часть движущегося тела (рис. 91). С этой же целью сверхзвуковые самолеты выводят на высоты, где плотность воздуха значительно уменьшается.



Рис. 91. Обтекаемая форма передней части сверхзвукового самолета



Ответьте на вопросы

1. Почему при малых скоростях более обтекаемой должна быть хвостовая часть самолета? При сверхзвуковых скоростях – носовая часть?
2. Почему для создания реактивной тяги в сверхзвуковых самолетах используют реактивный двигатель, а не пропеллер?
3. Почему для расчета сопротивления воздуха или жидкости нет единой формулы для всех тел?

IV. Эффект Магнуса. Циркуляция воздуха

Рассмотрим обтекание равномерным потоком воздуха вращающегося цилиндра. При вращении цилиндр увлекает прилегающие слои воздуха (рис. 92, а), приводя их во вращательное движение. Сложение скоростей поступательного и вращательного движения приводит к изменению скорости потоков воздуха вокруг цилиндра: $v_1 > v_2$ (рис. 92, б). В результате давление, которое испытывает цилиндр с различных сторон, становится разным. На основании закона Бернулли давление $p_1 < p_2$. Равнодействующая сил, приложенных к цилиндру, направлена перпендикулярно направлению потока, цилиндр приподнимается.

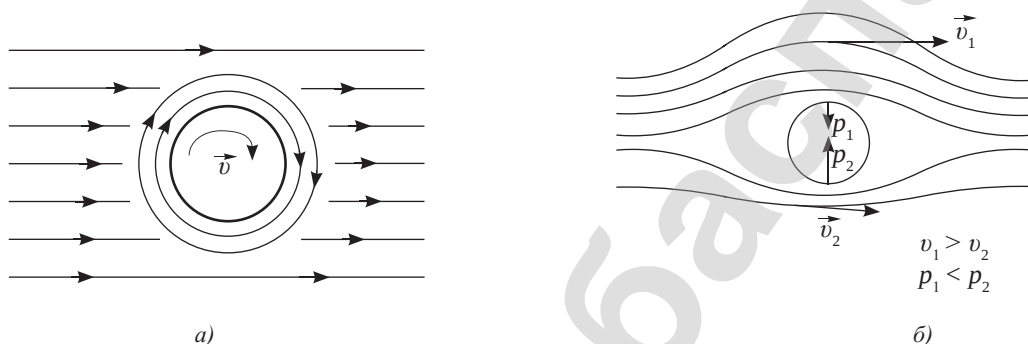


Рис. 92. Возникновение подъемной силы в результате циркуляции воздушного слоя

Циркуляцией воздуха вокруг закрученного мяча можно объяснить изменение направления его движения, что позволяет забить гол с угла футбольного поля (рис. 93).

Возникновение перпендикулярной к потоку силы при обтекании воздухом вращающегося тела называют эффектом Магнуса в честь немецкого ученого, изучившего данное явление.

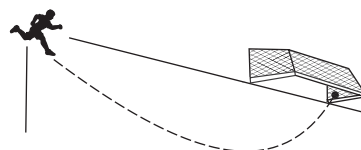


Рис. 93. Изменение траектории полета мяча в результате эффекта Магнуса



Ответьте на вопрос

Для чего на легковых машинах устанавливают спойлер (рис. 94)?



Рис. 94. Автомобиль со спойлером



Задание 2

Продолжите перечень явлений, в которых наблюдается эффект Магнуса: полет бумеранга, ураган срывает крышу дома, сильный ветер выворачивает зонт, проветривается норка крота и др.

Контрольные вопросы

1. Что такое вязкость жидкости?
2. Каким образом сила внутреннего трения влияет на скорость течения жидкости в трубах?
3. Назовите причины возникновения силы сопротивления движению в жидкостях и газах.
4. Как определяют вязкость жидкости? В чем ее измеряют?
5. В чем заключается эффект Магнуса?
6. В чем различие причин возникновения подъемной силы вращающегося тела и крыла самолета?



Упражнение

16

1. На дне бака высотой 50 см, полностью заполненного водой, имеется отверстие площадью 1 см^2 значительно меньшей площади сечения бака. Если открыть отверстие, то из него начинает вытекать струя воды. Чему равна площадь сечения струи на высоте 20 см ниже дна бака?
2. На какой высоте площадь поперечного сечения вертикальной струи фонтана в 3 раза больше выходного отверстия трубки? Скорость воды в выходном отверстии 9 км/ч. Сопротивление воздуха не учитывать.
3. В водопроводной трубе образовалось отверстие сечением 4 мм^2 , из которого вертикально вверх бьет струя воды, поднимаясь на высоту 80 см. Какова утечка воды за сутки?
4. Шарик всплывает в жидкости, плотность которой в 4 раза больше плотности материала шарика с постоянной скоростью. Во сколько раз сила трения, действующая на шарик, больше веса этого шарика?
5. Какой наибольшей скорости может достичь дождевая капля диаметром $d = 0,3 \text{ мм}$, если динамическая вязкость воздуха равна $1,2 \cdot 10^{-5} \text{ Па} \cdot \text{с}$?
6. Стальной шарик диаметром 1 мм падает с постоянной скоростью $0,185 \text{ см/с}$ в большом сосуде, наполненном касторовым маслом. Определите динамическую вязкость касторового масла. Плотность касторового масла 900 кг/м^3 .

Экспериментальное задание

Подготовьте видеозапись с пояснением опыта, демонстрирующего эффект Магнуса.

Итоги главы 5

Уравнение неразрывности	$S_1 v_1 = S_2 v_2$
Уравнение Бернулли	$p_1 + \rho g h_1 + \frac{\rho v_1^2}{2} = p_2 + \rho g h_2 + \frac{\rho v_2^2}{2}$ $p_1 + \rho g h + \frac{\rho v^2}{2} = \text{const}$
Формула Торричелли	$v_2 = \sqrt{2gh}$
Формула Стокса	$F = 6\pi\eta r v$

Основные уравнения гидро- и аэродинамики

Уравнение неразрывности

Модули скоростей несжимаемой жидкости обратно пропорциональны площадям сечения трубок тока.

Уравнение Бернулли

Полное давление в установившемся потоке жидкости остается постоянным вдоль этого потока.

Глоссарий

Вискозиметр – прибор для измерения вязкости жидкости.

Гидро- и аэродинамика – раздел механики, изучающий движение жидкостей и газов, а также взаимодействие движущихся жидкостей и газов с твердыми телами.

Идеальная жидкость – жидкость, вязкостью и сжимаемостью которой можно пренебречь.

Линии тока – линии, касательные к которым совпадают по направлению со скоростью течения жидкости в соответствующих точках пространства.

Полное давление в установившемся потоке жидкости – сумма весового, статического и динамического давлений.

Трубка тока – объем жидкости или газа, ограниченный линиями тока.

Течение ламинарное, если слои жидкости, не перемешиваясь, скользят относительно друг друга.

Течение турбулентное, если оно сопровождается перемешиванием слоев жидкости с образованием завихрений.

Течение стационарное, если во всех точках пространства скорости элементов жидкости не меняются со временем.

Для изучения тепловых процессов в молекулярной физике используют два метода: статистический и термодинамический.

В основе статистического метода лежит молекулярно-кинетическая теория. В указанной теории физические процессы рассматривают на основе знаний о внутреннем строении вещества.

Термодинамический метод предполагает изучение тепловых явлений без использования представлений о внутреннем строении вещества, на основе законов термодинамики и параметров, характеризующих систему в целом: температуры, давления и объема.

ГЛАВА 6

ОСНОВЫ МОЛЕКУЛЯРНО- КИНЕТИЧЕСКОЙ ТЕОРИИ ГАЗОВ

Гипотеза атомистического строения вещества впервые была выдвинута Демокритом. В создании молекулярно-кинетической теории большую роль сыграли русский ученый М.В. Ломоносов, немецкий физик Р. Клаузиус, английские физики Дж. Джоуль, Дж. Максвелл, австрийский физик Л. Больцман.

К XX в. были измерены размеры молекул различных веществ, их массы и скорости, выяснено расположение атомов в молекулах, т.е. была окончательно завершена молекулярно-кинетическая теория строения вещества.

Изучив главу, вы сможете:

- описывать связь температуры со средней кинетической энергией поступательного движения молекул;
- описывать модель идеального газа;
- применять основное уравнение молекулярно-кинетической теории при решении задач.

§ 17. Основные положения МКТ газов и ее опытное обоснование

Ожидаемый результат

Прочитав параграф, вы сможете:

- привести доказательства трем положениям МКТ, пояснить тепловые явления на основе МКТ, рассчитывать массу и размер молекулы, количество молекул, количество вещества.



Джон Уильям Стретт, лорд Рэлей (1842–1919) – английский физик и механик, получивший в 1904 г. Нобелевскую премию по физике «За исследование плотности газообразных элементов и открытие в связи с этим аргона». В 1879 г. Рэлей стал профессором Кембриджского университета и директором Кавендишской лаборатории. С 1908 по 1919 гг. был президентом Кембриджского университета.

I. Основные положения молекулярно-кинетической теории (МКТ)

Такие явления как, диффузия и броуновское движение, смачивание и подъем жидкости по капиллярам, испарение и кипение, плавление и кристаллизация, легко объяснить на основе МКТ – молекулярно-кинетической теории и трех ее положений:

1. Все вещества состоят из частиц: молекул или атомов, между которыми есть промежутки.
2. Частицы вещества непрерывно и хаотически движутся.
3. Частицы вещества взаимодействуют друг с другом.

II. Опытное обоснование I-го положения МКТ

Убедительным подтверждением первого положения МКТ является оценка размеров и массы молекул английским физиком Дж. Рэлеем.

Предположив, что капля oleинового масла растекается по поверхности воды слоем толщиной в одну молекулу, он определил ее размер:

$$d = \frac{V}{S},$$

где d – диаметр молекулы, V – объем капли, площадь растекшейся капли, S – площадь капли.

Приняв объем молекулы равной $V_0 = d^3$, нашел их количество во всем объеме вещества:

$$N = \frac{V}{V_0}.$$

При известном значении массы капли и числа молекул в ней, рассчитал массу одной молекулы, которая равна:

$$m_0 = \frac{m}{N}.$$

Результаты опытов, проведенные по методу Рэрея, показывают, что размер молекулы составляет порядка 10^{-9} м, а ее масса около 10^{-26} кг.

Никаких сомнений в верности первого положения МКТ не осталось, когда учеными были созданы электронный, а затем туннельный микроскопы.

Благодаря туннельному микроскопу, принцип действия которого основан на сканировании поверхностей веществ, получены снимки расположения

молекул и атомов (рис. 95). Металлическая игла сканирующего туннельного микроскопа скользит над объектом на расстоянии меньше нанометра (рис. 96). В процессе движения на иглу подается небольшой потенциал, и в итоге между иглой и образцом создается туннельный ток – электроны из образца, преодолевая расстояние до иглы, перепрыгивают на нее. Количество электронов зависит от расстояния до кончика иглы, поэтому, определяя величину туннельного тока, ученые могут понять, каков рельеф поверхности образца. В 1986 г. сотрудникам Исследовательского центра компании IBM в Цюрихе Г. Биннигу и Г. Рореру за это достижение была присуждена Нобелевская премия.

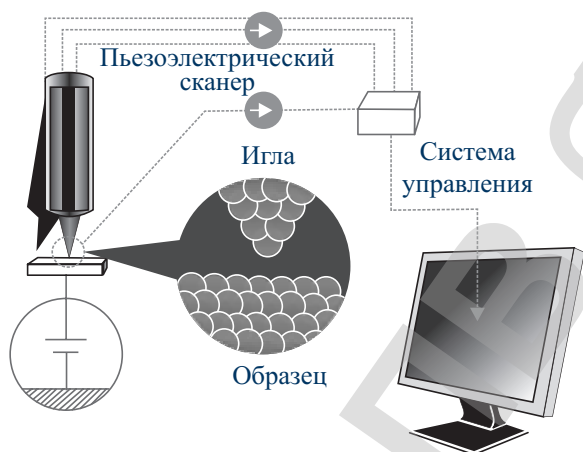


Рис. 96. Принцип действия туннельного микроскопа

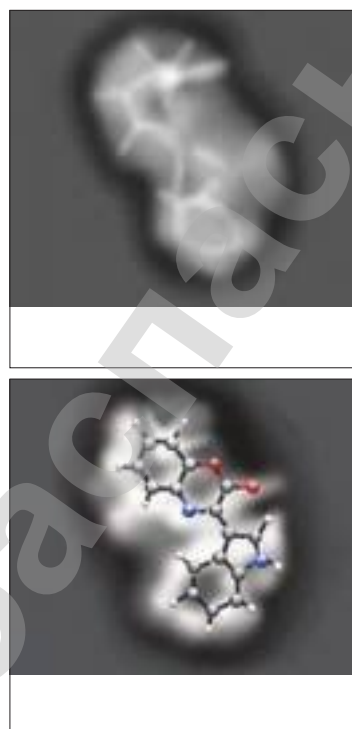


Рис. 95. Снимок расположения молекул в веществе



Обратите внимание!

Тонна нефти, растекаясь по поверхности океана пленкой 1/16 мкм, занимает площадь около 12 км².



Эксперимент

1. Оцените число молекул в одном листе учебника, полагая, что размер молекулы составляет порядка 10^{-9} м.
2. Определите площадь нефтяного пятна с помощью самодельной палетки. Масштаб съемки примите равным М 1: 100000 (рис. 97).



Рис. 97. Разлив нефти



Ответьте на вопросы

1. Какая площадь покрывается при разливе нефти из танкера грузоподъемностью 550 тысяч тонн? Сравните с площадью Каспийского моря (371 000 км²).
2. Какие экологические проблемы создает разлив нефти (рис. 98)?



Рис. 98. Гибель птиц и животных в области разлива нефти

III. Относительная молекулярная и молярная масса. Количество вещества. Число Авогадро

Относительная молекулярная масса, молярная масса, количество вещества и их единицы измерения введены на Международной Генеральной конференции по мерам и весам. Эти величины известны вам из курса химии (таблица 7).

Таблица 7. Основные величины МКТ

Определение	Формула	Единицы измерения
Относительная молекулярная масса M_r вещества – это величина, равная отношению массы молекулы данного вещества к $1/12$ массы атома углерода	$M_r = \frac{m_o}{\frac{1}{12} m_{oc}}$	Не имеет размерности
Количество вещества – это величина, равная отношению числа молекул в данном теле к числу атомов в 0,012 кг углерода. Моль – количество вещества, содержащее столько же молекул, сколько содержится атомов в 12 г углерода	$v = \frac{N}{N_A}$ $v = \frac{m}{M}$	$[v] = 1 \text{ моль}$
Молярная масса – это масса вещества, взятого в количестве одного моля	$M = m_0 N_A$ $M = M_r \cdot 10^{-3} \frac{\text{кг}}{\text{моль}}$	$[M] = 1 \frac{\text{кг}}{\text{моль}}$



Запомните!

В одном моле любого вещества содержится одинаковое количество молекул. Это число названо числом Авогадро в честь итальянского ученого физика и химика А. Авогадро, оно равно $N_A = 6,02 \cdot 10^{23} \text{ моль}^{-1}$.



Кусочки науки

Молекулярные массы сложных молекул можно определить, складывая относительные атомные массы A_r входящих в них элементов, используя таблицу Менделеева. Например, молекулярная масса воды (H_2O) равна:
 $M_r(H_2O) = 2A_r(H) + A_r(O) \approx 2 \cdot 1 + 16 = 18$.

IV. Опыт Штерна как доказательство второго положения молекулярно-кинетической теории

В 1920 г. немецкий физик Отто Штерн поставил опыт по определению средней скорости движения молекулы. На плоском горизонтальном основании он закрепил две коаксиальные цилиндрические поверхности (1) и (2), которые могли вращаться вокруг

оси 00_1 (рис. 99). Внутренний цилиндр имел узкую щель (4). Вся система находилась в вакууме. По оси 00_1 он расположил платиновую проволоку (3), покрытую серебром, которую нагревал до высокой температуры. Атомы серебра, испаряясь с поверхности и проходя через узкую щель в стенке внутреннего цилиндра (1), долетали до внутренней поверхности внешнего цилиндра и осаждались на нем напротив щели в виде узкой полоски. При вращении с угловой скоростью ω внешний цилиндр проворачивался на угол φ за промежуток времени t , необходимый атомам для преодоления расстояния между стенками двух цилиндров. В результате атомы осаждались в виде размытой полоски на расстоянии S от предыдущей полоски. Среднюю скорость движения атомов серебра между двумя цилиндрами Штерн определил следующим образом:

$$v = \frac{R - r}{t}, \quad (1)$$

где R – радиус внешнего цилиндра, r – радиус внутреннего цилиндра.

Выразив смещение серебряной полоски через скорость вращения цилиндра:

$$S = v_{\text{ц}} t = \omega R t, \quad (2)$$

где $v_{\text{ц}}$ – линейная скорость вращения внешнего цилиндра, Штерн определил время полета атомов между цилиндрами:

$$t = \frac{S}{\omega R}.$$

Из формулы (1) с учетом формулы (2) получим:

$$v = \frac{\omega R(R - r)}{S}. \quad (3)$$

При известных значениях R , r , ω и значении S , полученного опытным путем, была определена средняя скорость движения атомов серебра, она оказалась равной 650 м/с.

V. Силы взаимодействия между молекулами как доказательство третьего положения молекулярно-кинетической теории

На рисунке 100 представлены графики: график 1 соответствует зависимости силы отталкивания между атомами от расстояния между ними, график 2 – зависимости силы притяжения атомов от расстояния между ними, график 3 – результирующая сил молекулярного взаимодействия. Из графика следует, что при $r < r_0$ преобладают силы отталкивания, а при $r > r_0$ преобладают

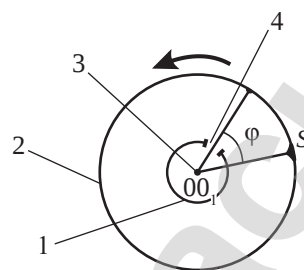


Рис. 99. Схема установки для опыта Штерна



Отто Штерн (1888–1969) – немецкий физик. С 1923 г. профессор и директор физико-химической лаборатории университета в Гамбурге. С 1933 г. – профессор Технологического института Карнеги в Питсбурге (США). В 1943 г. Штерн был удостоен Нобелевской премии по физике.



Ответьте на вопросы

1. Почему в опыте Штерна установку помещают в вакуумную камеру?
2. Почему толщина слоя серебра, осаждающегося на поверхности вращающегося цилиндра в опыте Штерна, не везде одинакова?

силы притяжения. На расстоянии $r = r_0$ силы притяжения и отталкивания равны, поэтому равнодействующая сила равна нулю: $F = 0$.

График зависимости силы от расстояния доказывает, что межмолекулярные силы проявляются на расстояниях, равных размерам молекул. На расстояниях, равных размерам 2–3 молекул, силы взаимодействия молекул исчезают.

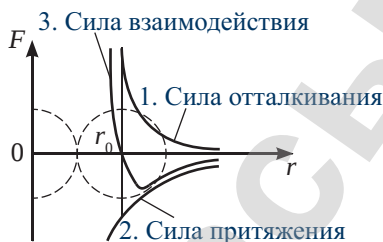


Рис. 100. График зависимости силы взаимодействия атомов от расстояния между ними

Контрольные вопросы

1. Сформулируйте основные положения молекулярно-кинетической теории.
2. Какую массу называют относительной молекулярной? Какую – молярной?
3. Какую величину называют количеством вещества, в чем ее измеряют?
4. В чем заключается опыт Штерна?
5. Какими свойствами обладают силы молекулярного взаимодействия?



Упражнение

17

1. Масса $14,92 \cdot 10^{25}$ молекул инертного газа составляет 5 кг. Какой это газ?
2. В устье Амазонки найден один из крупных самородков золота массой 62,3 кг. Какие количества вещества в нем содержится?
3. Капля минерального масла плотностью $\rho = 920 \frac{\text{кг}}{\text{м}^3}$ и массой 0,023 мг, вылитая на поверхность воды, образовала пленку площадью 60 см^2 . Предполагая, что молекулы в пленке расположились в один ряд, определите диаметры молекул.
4. Плотность алюминия $2,7 \cdot 10^3 \frac{\text{кг}}{\text{м}^3}$. Какое количество вещества содержится в 1 м^3 алюминия?
5. Какой скоростью обладали молекулы паров серебра, если их угловое смещение в опыте Штерна составило $5,4^\circ$ при частоте вращения прибора 150 с^{-1} ? Расстояние между внешним и внутренним цилиндрами равно 2 см.

Творческое задание

1. Изучите статистику аварий с нефтяными танкерами и нефтепроводами. Составьте сравнительные таблицы (графики, диаграммы) по странам, по фирмам.
2. Подготовьте сообщение на тему: «Роль диффузии в природе и технике».

§ 18. Термодинамические системы и термодинамические параметры. Равновесное и неравновесное состояния термодинамических систем. Температура как мера средней кинетической энергии теплового движения частиц вещества

Ожидаемый результат

Прочитав параграф, вы сможете:

- описывать связь температуры со средней кинетической энергией поступательного движения молекул.



Ответьте на вопросы

- В чем различие горячей воды от холодной?
- Что произойдет, если горячую воду налить в холодную?
- Что произойдет, если холодную воду налить в горячую?

Проверьте ваши ответы на опыте.



Задание 1

- Приведите пример термодинамической системы.
- Назовите тела, которые являются окружающей средой для термодинамической системы.
- Выберите из перечисленных величин макроскопические параметры: объем тела, скорость молекулы, масса молекулы, давление, энергия движения молекулы, число молекул, температура, размер молекулы, концентрация.

I. Термодинамические системы и термодинамические параметры

Термодинамической системой называют совокупность тел, взаимодействующих как между собой, так и с окружающей средой. Все тела, находящиеся за пределами границ рассматриваемой системы, называют *окружающей средой*.

Для описания свойств окружающих нас тел и их состояния используют физические величины, которые можно разделить на *микроскопические* и *макроскопические параметры*.

Величины, которые характеризуют молекулярный мир, например, скорость молекулы, ее масса, энергия, называют *микроскопическими* (от древнегреч. «микрос» – «малый»).

Макроскопическими величинами (от древнегреч. «макрос» – «большой») называют величины, характеризующие свойства тел или термодинамических систем в целом, без учета их внутреннего строения.

Макроскопические величины, характеризующие состояние тел, называют термодинамическими параметрами. Термодинамическими параметрами являются объем V , давление p и температура T .

II. Термодинамическое равновесие. Температура как мера средней кинетической энергии теплового движения молекул

Если осуществить контакт двух или нескольких тел, имеющих разные температуры, то через некоторое время наступит *термодинамическое равновесие*: температуры тел станут одинаковыми.

При контакте между телами происходит обмен энергией: тела с большей внутренней энергией передают ее телам с меньшей энергией. Температура тела определяется энергией теплового движения молекул, она является мерой средней кинетической энергии молекул: чем больше кинетическая энергия молекул, тем выше температура тела. Следовательно, энергия передается от более нагретых тел к менее нагретым телам.

Термодинамическое равновесие – это такое состояние замкнутой системы тел, при котором все макроскопические параметры сколь угодно долго остаются неизменными.

Любая замкнутая система тел при неизменных внешних условиях самопроизвольно переходит в состояние термодинамического равновесия. Тела в состоянии теплового равновесия имеют одинаковую температуру.

Температура – физическая величина, характеризующая состояние термодинамического равновесия макроскопической системы.

III. Измерение температуры. Виды термометров

Для измерения температуры тел применяют термометры. Показание прибора снимают после теплового контакта термометра с телом в момент, когда наступает тепловое равновесие.

Термометр – это прибор для измерения температуры посредством контакта с исследуемой средой.

В зависимости от физических явлений, на которых основано действие термометров, различают следующие виды: жидкостные, механические, газовые, электрические, оптические и инфракрасные.

Действие жидкостных термометров основано на тепловом расширении жидкости. Жидкостный термометр представляет собой прозрачный стеклянный резервуар с припаянным к нему капилляром. Шкала наносится на пластинку, жестко соединенную с капилляром. Термометрическая жидкость – жидкость, которая используется для измерения температуры тел, – заполняет резервуар и часть капилляра. Для измерения температур от $-80\text{ }^{\circ}\text{C}$ до $70\text{ }^{\circ}\text{C}$ жидкостный термометр заполняют этиловым спиртом, от $-35\text{ }^{\circ}\text{C}$ до $750\text{ }^{\circ}\text{C}$ – ртутью. Точность измерения жидкостного термометра зависит от цены деления прибора, от верного определения момента наступления теплового равновесия, коэффициента теплового расширения стекла капилляра и пластины, на которую нанесена шкала, глубины погружения термометра в измеряемую среду.

Механические термометры представляют собой две соединенные вместе полочки металлов с различными коэффициентами теплового расширения. Из-за различного удлинения пластин при их нагревании биметаллическая полоска скручивается сильнее (рис. 101). Чем выше температура, тем большее значение температуры указывает стрелка на шкале прибора (рис. 102).



Запомните!

Если в термодинамической системе меняется хотя бы один из параметров любого входящего в систему тела, то в системе происходит термодинамический процесс. Система находится в неравновесном состоянии.



Ответьте на вопросы

1. Почему в медицинских термометрах используют ртуть, а не спирт?
2. Почему трубка жидкостного термометра должна быть одного диаметра?
3. Почему точность измерения жидкостного термометра зависит от глубины его погружения?
4. Почему невозможно точно определить температуру капли жидкости жидкостным термометром?
5. Почему коэффициент теплового расширения веществ, из которых изготовлены капилляр и пластина со шкалой термометра, должны быть одинаковыми?

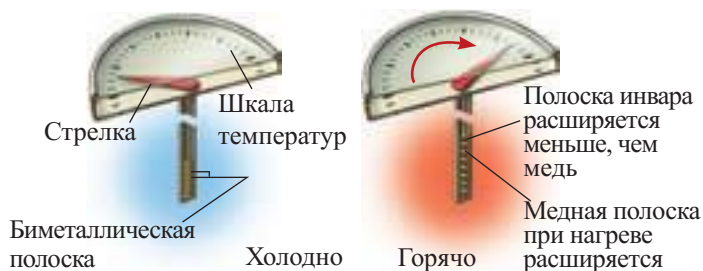


Рис. 101. Устройство механического термометра



Рис. 102. Шкала механического термометра

Газовый термометр – это баллон, заполненный газом, соединенный тонкой трубкой с манометром (рис. 103). Баллон приводят в тепловой контакт с телом, температуру которого нужно измерить, через некоторое время наступает тепловое равновесие газа и тела. Температура определяется давлением газа в баллоне термометра. Шкалу давлений на манометре можно заменить шкалой соответствующих им температур. Из всех видов термометров наиболее точными являются показания газового термометра.

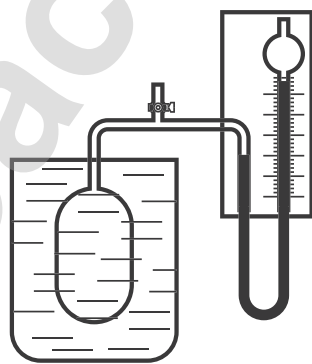
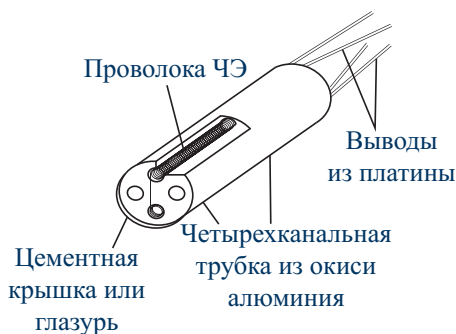


Рис. 103. Устройство газового термометра

Электрические термометры действуют на основе зависимости электрического сопротивления металлов, сплавов и полупроводниковых материалов от температуры (рис. 104, а). Они представляют собой спираль из металлической проволоки, к концам которой припаивают подводящие ток провода из платины, серебра или золота (рис. 104, б). Термометр помещают в трубку для защиты от механических повреждений и действий вредных веществ. Диапазон температур, измеряемых платиновыми термометрами, составляет от -190°C до $+600^{\circ}\text{C}$, медных – от -55°C до $+200^{\circ}\text{C}$. Свинцовые термометры служат для измерения низких температур, термометры из фосфористой бронзы – для сверхнизких температур.



а)



б)

Рис. 104. Электрический термометр

К оптическим и инфракрасным термометрам относятся тепловизор и пирометр, они служат для бесконтактного измерения температуры тел (рис. 105, 106).



Рис. 105. Тепловизор



Рис. 106. Пирометр

IV. Температурные шкалы

На практике получили распространение температурные шкалы Цельсия и Фаренгейта. Для исследования и описания тепловых явлений применение получила шкала Кельвина (рис. 107).

В 1742 г. шведским ученым А. Цельсием была предложена температурная шкала, в которой реперными точками являются температуры таяния льда и кипения воды при нормальном атмосферном давлении. Реперные точки – это точки, по которым наносится шкала измерительного прибора. Температура таяния льда при нормальном атмосферном давлении принимается равной 0°C , кипения воды – 100°C , интервал температур реперных точек разделен на 100 равных частей.

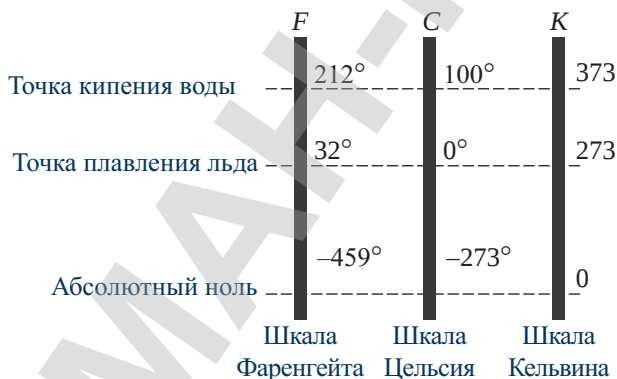


Рис. 107. Шкалы термометров

Шкала Фаренгейта – это температурная шкала, в которой температура таяния льда равна 32°F , кипения воды 212°F , интервал температур разделен на 180 частей. Шкала предложена в 1724 г. немецким физиком Г. Фаренгейтом и в настоящее время применяется в ряде стран.



Кусочки науки

Выразим в градусах Фаренгейта температуру 20°C :

$$20^{\circ}\text{C} = 32 + 1,8 \cdot 20 = 68^{\circ}\text{F}.$$

Выполним обратный перевод:

$$68^{\circ}\text{F} = \frac{68 - 32}{1,8} = 20^{\circ}\text{C}.$$



Задание 2

1. Проведите сравнительный анализ приведенных в учебнике термометров. Составьте таблицу с указанием области применения каждого вида термометра.
2. Изобразите в тетради комнатный, лабораторный и медицинский жидкостные термометры, укажите их основные различия.



Запомните!

Перевод температуры по шкале Фаренгейта в температуру по шкале Цельсия производится по формуле:

$$t^{\circ}\text{C} = \frac{5}{9}(t^{\circ}\text{F} - 32),$$

обратный перевод по формуле:

$$t^{\circ}\text{F} = 32 + \frac{9}{5}t^{\circ}\text{C}.$$

Цена деления по шкале Фаренгейта отличается от цены деления по шкале Цельсия:

$$1\text{ }^{\circ}\text{C} = 1,8\text{ }^{\circ}\text{F}.$$

Шкала Кельвина, или шкала абсолютных температур, предложена в 1848 г. английским физиком Уильямом Томсоном, лордом Кельвином. За реперную точку им была принята температура, соответствующая состоянию тел с предельной степенью холода, при которой полностью прекращается поступательное движение молекул. Температуру, соответствующую этому состоянию, он назвал *абсолютным нулем*.

Абсолютный нуль температуры – это минимальный предел температуры, которую может иметь физическое тело во Вселенной, при которой полностью прекращается поступательное движение молекул.

В шкале Кельвина нет отрицательной температуры, 0 К – это самая низкая температура в природе. В настоящее время получены температуры всего на несколько миллионных долей градуса выше абсолютного нуля. Цену деления шкалы Кельвин принял равным градусу по шкале Цельсия.

Температуры по шкале Кельвина и Цельсия связаны соотношением:

$$T = (273,16 + t)\text{K} \text{ или } t = (T - 273,16)^{\circ}\text{C}.$$

В приближенных расчетах можно использовать соотношения:

$$T = (273 + t)\text{K} \text{ или } t = (T - 273)^{\circ}\text{C}.$$



Возьмите на заметку

На X Генеральной конференции по мерам и весам в 1954 г. в шкалу Кельвина была введена вторая реперная точка – температура тройной точки воды, ее значение приняли равной 273,16 К; при температуре тройной точки вода может находиться в твердом, жидком и газообразном состояниях.



Ответьте на вопрос

Почему невозможно достичь температуры, равной абсолютному нулю?

Контрольные вопросы

1. Какие параметры называют микроскопическими? Какие макроскопическими?
2. Какие параметры называют термодинамическими?
4. В чем заключается физический смысл температуры?
5. Какие свойства тел положены в основу устройства термометров?
6. Перечислите виды термометров.
7. Что понимают под абсолютным нулем температуры?



Упражнение

18

1. Выразите в Кельвинах следующие значения температур: 20 °C, 27 °C, –73 °C, 100 °C.
2. Выразите в градусах Цельсия следующие температуры: 4 К, 200 К, 440 К, 300 К.
3. Определите температуру по шкале Цельсия, если по шкале Фаренгейта температура равна: 84,2 °F, 80,6 °F, 71,6 °F.
4. Переведите в градусы по шкале Фаренгейта температуры: 30 °C, 25 °C, 20 °C.

§ 19. Идеальный газ. Основное уравнение молекулярно-кинетической теории газов

Ожидаемый результат

Прочитав параграф, вы сможете:

- описывать модель идеального газа;
- применять основное уравнение молекулярно-кинетической теории при решении задач.

I. Идеальный газ

Для математического описания тепловых процессов, происходящих в газах, вводится понятие *идеального газа*.

Идеальный газ – это физическая модель газа, в которой потенциальной энергией взаимодействия между молекулами можно пренебречь, расстояние между молекулами на много больше размеров молекул.



Вспомните!

Давление в газах создается ударами молекул.

В СИ давление измеряют в паскалях.

Давление, при котором на поверхность тела площадью 1 м^2 действует сила давления в 1 Н , равно 1 Па .



Запомните!

Для измерения давления используют также внесистемные единицы: миллиметр ртутного столба (торр), атмосфера:

$1 \text{ мм рт.ст.} \approx 133,3 \text{ Па}$

$1 \text{ атм} = 101325 \text{ Па} \approx 10^5 \text{ Па}$.



Возьмите на заметку

Для технических измерений была принята техническая атмосфера (1 ат), равная давлению, которое производит сила $9,80665 \text{ Н}$ на площадь, равную 1 см^2 .

$1 \text{ ат} = 98066,5 \text{ Па}$.

Реальные разреженные газы ведут себя, как идеальный газ. Все газы при низких давлениях и высоких температурах близки по своим свойствам к идеальному газу. При высоких давлениях молекулы газа сближаются, в этом случае пренебречь их собственными размерами нельзя. При понижении температуры кинетическая энергия молекул уменьшается, становится сравнимой с потенциальной энергией. Следовательно, при высоких давлениях и низких температурах нельзя считать газ идеальным.

II. Основное уравнение МКТ

Зависимость давления идеального газа от средней кинетической энергии поступательного движения его молекул называют *основным уравнением МКТ идеального газа*.

Пусть в сосуде объемом V находится идеальный газ, состоящий из N молекул массой m_0 (рис. 108).

При ударе одной молекулы, который длится Δt , на вертикальную стенку со стороны молекулы действует импульс силы $F_{\partial 1} \Delta t$, равный изменению импульса тела на основании третьего закона Ньютона. Давление на стенку создает перпендикулярная составляющая импульса, следовательно:

$$F_{\partial 1} \Delta t = m_0 v_x - (-m_0 v_x) = 2m_0 v_x. \quad (1)$$

Среднее значение силы давления зависит от числа молекул. За некоторое время t до стенки долетят те молекулы, которые были от нее на расстоянии:

$$l = \bar{v}_x t. \quad (2)$$

Число частиц, движущихся по направлению оси Ox и в противоположном направлении, равно, поэтому стенка получит за время t количества ударов N , равное:

$$N = \frac{1}{2} n V = \frac{1}{2} n S l = \frac{1}{2} n S \bar{v}_x t, \quad (3)$$

где n – число молекул в единице объема; $Sl = V$ – объем газа, содержащий N молекул.

Импульс силы молекул, ударившихся о стенку за время t , равен:

$$Ft = N \cdot 2m_0\bar{v}_x = \frac{1}{2}nS\bar{v}_x t \cdot 2m_0\bar{v}_x = nm_0S\bar{v}_x^2 t, \quad (4)$$

где $\bar{v}_x^2$ – среднее квадратичное значение скорости движения молекул.

Так как все направления движения молекул равноправны, можно записать:

$$\bar{v}_x^2 = \bar{v}_y^2 = \bar{v}_z^2.$$

Учитывая соотношение модуля скорости с ее проекциями на оси координат:

$$\bar{v}^2 = \bar{v}_x^2 + \bar{v}_y^2 + \bar{v}_z^2,$$

запишем
$$\bar{v}_x^2 = \frac{1}{3}\bar{v}^2. \quad (5)$$

На основании (4) и (5) выражение для импульса силы давления примет вид:

$$Ft = \frac{1}{3}nm_0S\bar{v}^2 t. \quad (6)$$

Разделив обе части уравнения (6) на St , получим:

$$\frac{F}{S} = \frac{1}{3}nm_0\bar{v}^2. \quad (7)$$

С учетом равенства $p = \frac{F}{S}$, запишем уравнение

(7) в виде:

$$p = \frac{1}{3}nm_0\bar{v}^2. \quad (8)$$

Концентрация молекул связана с плотностью газа соотношением $n \cdot m_0 = \rho$, подставив в (8) получим:

$$p = \frac{1}{3}\rho\bar{v}^2. \quad (9)$$

Если учесть, что средняя кинетическая энергия молекул равна $\bar{E} = \frac{m_0\bar{v}^2}{2}$, то уравнение (8) примет вид:

$$p = \frac{1}{3}nm_0\bar{v}^2 \cdot \frac{2}{2} = \frac{2}{3}n \frac{m_0\bar{v}^2}{2}$$

или
$$p = \frac{2}{3}n\bar{E}. \quad (10)$$

Соотношения (8), (9) и (10) называют основным уравнением молекулярно-кинетической теории.

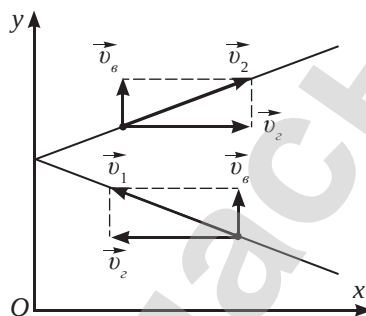


Рис. 108. К расчету давления газа



Ответьте на вопросы

1. Почему основное уравнение МКТ выполняется только для идеального газа?
2. Почему при выводе основного уравнения МКТ появляются множители $1/3$? $1/2$?
3. Почему основное уравнение МКТ названо «мостиком» между микромиром и макромиром?



Задание 1

Выполните работу с единицами измерений величин, вошедших в основное уравнение МКТ. Докажите, что в каждом случае в результате выполненных действий вы получите Па.



Ответьте на вопрос

Почему энергетическая температура не получила практического применения?

III. Энергетическая температура. Постоянная Больцмана

Был проведен следующий опыт: сосуды равного объема с одинаковым количеством молекул водорода, кислорода и гелия поместили в тающий лед при нормальном атмосферном давлении (рис. 109).

Отношение $\frac{pV}{N}$ для каждого газа после установления теплового равновесия оказалось одинаковым:

$$\frac{pV}{N} = 3,76 \cdot 10^{-21} \text{ Дж}.$$

Сосуды поместили в кипящую воду, определили отношение этих же величин и вновь получили одинаковый результат для всех газов: $\frac{pV}{N} = 5,14 \cdot 10^{-21} \text{ Дж}.$

Отношение: $\frac{pV}{N}$ обозначили буквой θ и назвали *энергетической температурой*:

$$\frac{pV}{N} = \theta. \quad (11)$$

Энергетическая температура и температура по шкале Кельвина связаны соотношением:

$$\theta = kT, \quad (12)$$

где k — коэффициент пропорциональности, получивший название *постоянной Больцмана*.

Вычислили значение k :

$$\theta_{100} - \theta_0 = k(T_2 - T_1) \quad (13)$$

$$k = \frac{\theta_{100} - \theta_0}{T_2 - T_1} = 1,38 \cdot 10^{-23} \frac{\text{Дж}}{\text{К}}.$$

IV. Температура — мера средней кинетической энергии поступательного движения молекул

От скорости и средней кинетической энергии движения молекул зависит температура тела. Получим соотношение величин, используя основное уравнение МКТ в виде:

$$p = \frac{2}{3} n \bar{E}. \quad (14)$$

По определению концентрация молекул вещества равна:

$$n = \frac{N}{V}. \quad (15)$$



Людвиг Больцман
(1844–1906) — австрийский физик-теоретик, основатель статистической механики и молекулярно-кинетической теории. Член Австрийской академии наук.



Рис. 109. Исследование состояния газов в баллонах

Возьмите на заметку

Постоянная Больцмана связывает энергетическую температуру, выраженную в Джоулях, с температурой, измеряемой в градусах шкалы Кельвина:

$$\theta = kT.$$

Из формул (14) и (15) получим:

$$p = \frac{2}{3} n \bar{E} = \frac{2}{3} \frac{N}{V} \bar{E}, \quad (16)$$

откуда
$$\frac{pV}{N} = \frac{2}{3} \bar{E}. \quad (17)$$

Из (11) и (12) получим:

$$\frac{pV}{N} = kT. \quad (18)$$

Приравнявая правые части уравнений (17) и (18), получим:

$$\frac{2}{3} \bar{E} = kT \quad \text{или} \quad \bar{E} = \frac{3}{2} kT. \quad (19)$$

Из формулы (19) следует, что зависимость между средней кинетической энергией хаотического движения молекул и абсолютной температурой прямо пропорциональна.

Температура – мера средней кинетической энергии поступательного движения молекул.

V. Средняя квадратичная скорость движения молекул и температура тела

Приравнявая правые части уравнений $\bar{E} = \frac{m_0 \bar{v}^2}{2}$ и $\bar{E} = \frac{3}{2} kT$, получим формулу расчета средней квадратичной скорости молекул:

$$\frac{m_0 \bar{v}^2}{2} = \frac{3}{2} kT, \text{ откуда имеем: } \bar{v} = \sqrt{\frac{3kT}{m_0}}. \quad (20)$$

Подкоренное выражение в полученной формуле умножим и разделим на число Авогадро:

$$\bar{v} = \sqrt{\frac{3kT}{m_0}} = \sqrt{\frac{3kTN_A}{m_0 N_A}},$$

где
$$\bar{v} = \sqrt{\frac{3RT}{M}}, \quad (21)$$

$$R = kN_A = 1,38 \cdot 10^{-23} \frac{\text{Дж}}{\text{К}} \cdot 6,02 \cdot 10^{23} \text{ моль}^{-1} = 8,31 \frac{\text{Дж}}{\text{К} \cdot \text{моль}}$$

– универсальная газовая постоянная.



Задание 2

Определите скорость движения молекул азота, кислорода, водяного пара при температуре 300 К.



Ответьте на вопросы

1. Какая зависимость существует между среднеквадратичной скоростью движения молекул и температурой тела?
2. Во сколько раз увеличится температура тела, если средняя квадратичная скорость движения молекул возрастет в 1,2 раза?
3. На сколько процентов увеличится температура тела, если средняя квадратичная скорость движения молекул возрастет на 20 %?

Контрольные вопросы

1. Какими свойствами обладает идеальный газ?
2. Назовите единицы измерения давления.
3. Какие параметры связывает основное уравнение МКТ?
4. Каков физический смысл постоянной Больцмана?



Упражнение

19

1. В сосуде объемом $V = 1$ л находится водород массой 2 г. Определите давление водорода, если средняя квадратичная скорость его молекул $v = 400 \frac{м}{с}$.
2. Плотность водорода при некоторых условиях равна $\rho_1 = 0,09 \frac{кг}{м^3}$. Определите молярную массу метана, если его плотность при тех же условиях $\rho_2 = 0,72 \frac{кг}{м^3}$.
3. Газ плотностью $\rho = 3,3 \frac{кг}{м^3}$ находится при температуре $t = 17^\circ C$. Определите давление газа, если масса молекулы $m_0 = 6,6 \cdot 10^{-27}$ кг. Какой это газ?
4. Определите температуру $N = 2 \cdot 10^{22}$ молекул идеального газа, находящегося в сосуде емкостью $V = 13,8$ л при давлении $p = 100$ кПа.
5. Определите концентрацию молекул идеального газа, если при температуре $T = 300$ К плотность газа $\rho = 1,2 \frac{кг}{м^3}$, а средняя квадратичная скорость молекул $v = 500 \frac{м}{с}$.

Творческое задание

Подготовьте сообщения об ученых (на выбор)::

1. А. Цельсий, Г. Фаренгейт, У. Томсон, Л. Больцман.
2. Разработайте свою шкалу термометра, выбрав жидкость и соответствующие ей реперные точки. Установите формулу перевода значений температуры в градусы по Цельсию. Подумайте, какая шкала дает более точные показания?

Итоги главы 6

Относительная молекулярная и молярная массы	Основное уравнение МКТ	Постоянные величины
Относительная молекулярная масса $M_r = \frac{m_0}{\frac{1}{12} m_{0C}}$ Молярная масса $M = M_r \cdot 10^{-3} \frac{\text{кг}}{\text{моль}}$ $M = m_0 N_A; \quad M = \frac{m}{\nu}$ Для смеси газов $M = \frac{m_1 + m_2 + \dots + m_n}{\nu_1 + \nu_2 + \dots + \nu_n}$ Масса молекулы $m_0 = \frac{m}{N}$	$p = \frac{1}{3} n m_0 \bar{v}^2$ $p = \frac{1}{3} \rho \bar{v}^2$ $p = \frac{2}{3} n \bar{E}$ $p = nkT$	Постоянная Больцмана $k = 1,38 \cdot 10^{-23} \frac{\text{Дж}}{\text{К}}$ Число Авогадро $N_A = 6,02 \cdot 10^{23} \text{ моль}^{-1}$ Универсальная газовая постоянная $R = 8,31 \frac{\text{Дж}}{\text{моль} \cdot \text{К}}$
Количество вещества	Кинетическая энергия движения молекул	Нормальные условия
$\nu = \frac{m}{M}$ $\nu = \frac{N}{N_A}$	$E = \frac{m_0 \bar{v}^2}{2}$ $E = \frac{3}{2} kT$	$T = 273 \text{ К}, t = 0 \text{ } ^\circ\text{С}$ $p = 101300 \text{ Па} = 760 \text{ мм рт.ст.}$
Число молекул	Средняя квадратичная скорость молекул	Связь между шкалами температур
$N = \frac{m}{M} N_A$ $N = \nu N_A$ $N = \frac{m}{m_0}$ $N = \frac{V}{V_0}$	$\bar{v} = \sqrt{\frac{3kT}{m_0}}$ $\bar{v} = \sqrt{\frac{3RT}{M}}$	Кельвина и Цельсия $T = (273 + t) \text{ К},$ $t = (T - 273) \text{ } ^\circ\text{С}$ Цельсия и Фаренгейта, $t \text{ } ^\circ\text{С} = \frac{5}{9} (t \text{ } ^\circ\text{Ф} - 32)$ $t \text{ } ^\circ\text{Ф} = 32 + \frac{9}{5} t \text{ } ^\circ\text{С}$

Основные положения и законы МКТ

Три положения МКТ

1. Все вещества состоят из частиц: молекул или атомов, между которыми есть промежутки.
2. Частицы вещества непрерывно и хаотически движутся.
3. Частицы вещества взаимодействуют друг с другом.

Закон Авогадро

В равных объемах газа при одинаковых температурах и давлениях содержится одинаковое количество молекул.

Глоссарий

Абсолютный нуль температуры – минимальный предел температуры, которую может иметь физическое тело во Вселенной, при которой полностью прекращается поступательное движение молекул.

Идеальный газ – физическая модель газа, в которой молекулы представляют собой упругие шарики пренебрежимо малых размеров, потенциальной энергией взаимодействия между которыми можно пренебречь.

Количество вещества – величина, равная отношению числа молекул в данном теле к числу атомов в 0,012 кг углерода.

Макроскопические параметры – величины, характеризующие свойства тел в целом, без учета их внутреннего строения.

Микроскопические параметры – величины, которые характеризуют молекулярный мир, например, скорость молекул, их масса, энергия.

Моль – количество вещества, содержащее столько же молекул, сколько содержится атомов в 12 г углерода.

Молярная масса – масса вещества, взятого в количестве одного моля.

Относительная молекулярная масса – величина, равная отношению массы молекулы данного вещества к $1/12$ массы атома углерода.

Термодинамические параметры – макроскопические величины, характеризующие состояние тел: давление, объем, температура.

Термодинамическое равновесие – такое состояние замкнутой системы тел, при котором все макроскопические параметры сколь угодно долго остаются неизменными.

Температура – физическая величина, характеризующая состояние термодинамического равновесия макроскопической системы.

Термометр – прибор для измерения температуры посредством контакта с исследуемой средой.

ГЛАВА 7

ГАЗОВЫЕ ЗАКОНЫ

Газовые законы были открыты опытным путем задолго до появления молекулярно-кинетической теории. Законы были установлены на опытах с реальными газами при условиях, приближающих их к модели идеального газа: при большой температуре и невысоком давлении. Такие газы, как азот и кислород, из которых состоит атмосфера Земли, с достаточной точностью могут рассматриваться как идеальные газы при обычных условиях.

Изучив подраздел, вы сможете:

- применять уравнение состояния идеального газа при решении задач;
- исследовать зависимость давления от объема газа при постоянной температуре (закон Бойля – Мариотта);
- исследовать зависимость объема газа от температуры при постоянном давлении (закон Гей-Люссака);
- исследовать зависимость давления от температуры газа при постоянном объеме (закон Шарля);
- применять газовые законы при решении расчетных и графических задач.

§ 20. Уравнение состояния идеального газа

Ожидаемый результат

Прочитав параграф, вы сможете:

- применять уравнение состояния идеального газа при решении задач.



Запомните!

Значение универсальной газовой постоянной:

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



Бенуа Поль Эмиль Клапейрон (1799–1864) – французский физик и инженер. В 1834 г. вывел уравнение состояния идеального газа, объединяющее законы Бойля – Мариотта, Гей-Люссака и Авогадро, обобщенное в 1874 г. Д.И. Менделеевым. Вывел уравнение, устанавливающее связь между температурой плавления и кипения вещества с давлением. Впервые ввел в термодинамику графический метод, изобразив термодинамический процесс в pV -диаграмме.

I. Уравнение состояния идеального газа

Состояние некоторой массы газа определяется значениями трех параметров: давлением p , объемом V и температурой T . Изменение одного из этих параметров приводит к изменению других.

Уравнение, которое связывает между собой термодинамические параметры, называют уравнением состояния газа.

Получим соотношение параметров состояния газа:

$$p = nkT. \quad (1)$$

Подставим в уравнение (1) формулы расчета концентрации:

$$n = \frac{N}{V} \quad (2)$$

и числа молекул в веществе, выраженного через количество вещества:

$$N = \nu N_A, \quad (3)$$

получим:
$$pV = \frac{m}{M} k N_A T. \quad (4)$$

Заменим произведение постоянной Больцмана на число Авогадро универсальной газовой постоянной:

$$R = k N_A = 8,31 \frac{\text{Дж}}{\text{К} \cdot \text{моль}}. \quad (5)$$

С учетом (5), запишем уравнение (4) в виде:

$$pV = \frac{m}{M} RT. \quad (6)$$

Соотношение (6) является уравнением состояния газа, его называют *уравнением Менделеева – Клапейрона*.

II. Уравнение состояния газа и объединенный газовый закон

Уравнение состояния газа описывает связь между параметрами одного и того же состояния. Газовые законы описывают изменение состояния газа и устанавливают связь между параметрами исходного и конечного состояний газа.

Рассмотрим два различных состояния некоторого газа. Начальное, с параметрами p_1, V_1, T_1, m_1 и конечное, с параметрами p_2, V_2, T_2, m_2 . Для начального состояния уравнение состояния газа имеет вид $p_1 V_1 = \frac{m_1}{M} R T_1$.

Переместим переменные величины в левую часть уравнения, получим:

$$\frac{p_1 V_1}{m_1 T_1} = \frac{R}{M}. \quad (7)$$

Для конечного состояния газа запишем аналогичное соотношение величин:

$$\frac{p_2 V_2}{m_2 T_2} = \frac{R}{M}. \quad (8)$$

Приравняем левые части уравнений (7) и (8):

$$\frac{p_1 V_1}{m_1 T_1} = \frac{p_2 V_2}{m_2 T_2} \quad (9)$$

или
$$\frac{pV}{mT} = \text{const}. \quad (10)$$

Полученное уравнение является выражением объединенного газового закона, в нем объединены все параметры, характеризующие процессы, происходящие в термодинамической системе.

Если в процессе перехода газа от начального состояния к конечному состоянию, его масса не меняется $m = \text{const}$, то объединенный газовый закон примет вид:

$$\frac{p_1 V_1}{T_1} = \frac{p_2 V_2}{T_2} \quad (11)$$

или
$$\frac{pV}{T} = \text{const}. \quad (12)$$

Полученные выражения (11) и (12) называют *объединенным газовым законом*, или *уравнением Клапейрона*, в честь французского физика Бенуа Клапейрона. Он получил это соотношение термодинамических параметров экспериментально в 1834 г.



Ответьте на вопросы

1. Почему уравнение состояния Клапейрона можно использовать только для газов с неизменным количеством вещества?
2. Почему уравнение состояния справедливо для газов с малым значением давления и не слишком низкой температурой?
3. В чем принципиальное отличие уравнения состояния от газового закона?



Задание 1

Из формул 6, 9, 11 выразите все входящие в них величины. Какие правила из курса математики вам необходимо использовать?

Для данной массы газа произведение давления на объем, деленное на абсолютную температуру, есть величина постоянная, не зависящая от состояния, в котором находится газ.

III. Применение уравнения состояния и объединенного газового закона в решении задач

Для определения неизвестного параметра, характеризующего состояние термодинамической системы, используют уравнение состояния Менделеева – Клапейрона (6) или уравнение Клапейрона (12) при известном значении константы.

Если в системе с неизменным количеством вещества происходит термодинамический процесс, то неизвестный параметр рассчитывают с использованием объединенного газового закона Клапейрона (11).

В том случае, когда в системе происходит утечка газа или, наоборот, накачивание газа необходимо использовать уравнение (9) – объединенный газовый закон Менделеева – Клапейрона.

Если в некоторой емкости создают смесь газов, то молярная масса становится переменной величиной. В таком случае в решении задачи используют уравнение:

$$\frac{p_1 V_1 M_1}{T_1 m_1} = \frac{p_2 V_2 M_2}{T_2 m_2},$$

полученное из уравнения состояния газа Менделеева – Клапейрона. Молярные массы смесей определяют по формуле:

$$M_{см} = \frac{m_1 + m_2 + \dots + m_n}{v_1 + v_2 + \dots + v_n},$$

где $m_1, \dots, m_n$ – массы газов, входящих в смесь, $v_1, \dots, v_n$ – количество вещества каждого вида газа в смеси, n – число газов, входящих в состав смеси.



Задание 2

1. Изучите III часть параграфа. Составьте и запишите в тетради памятку по использованию уравнений состояния газа и объединенного газового закона в решении задач.
2. Докажите, что молярная масса смеси, состоящая из водорода и кислорода, взятых по 1 молю, отличается от молярной массы смеси этих же газов, состоящей из 0,5 моль водорода и 1,5 моль кислорода.



Ответьте на вопросы

1. Почему молярную массу смеси газов нельзя определять как среднее арифметическое молярных масс газов, входящих в состав смеси?
2. Почему при использовании уравнения состояния необходимо все величины выразить в СИ, а в расчетах с использованием газового закона единицы измерения физических величин должны просто совпадать, например, объемы – в литрах?

ПРИМЕР РЕШЕНИЯ ЗАДАЧИ

Кислород массой 10 г находился в сосуде под поршнем и под давлением $p = 0,303$ МПа при температуре 10°C . После нагревания при постоянном давлении его объем увеличился до 10 л. Определите его начальный объем и конечную температуру.

Дано:

$$m = 10 \text{ г}$$

$$p = 0,303 \text{ МПа}$$

$$t_1 = 10^\circ\text{C}$$

$$V_2 = 10 \text{ л}$$

$$V_1 = ?$$

$$T_2 = ?$$

СИ

$$10 \cdot 10^{-3} \text{ кг}$$

$$0,303 \cdot 10^6 \text{ Па}$$

$$283 \text{ К}$$

$$10 \cdot 10^{-3} \text{ м}^3$$

Решение:

Из уравнения Менделеева – Клапейрона

$$pV_1 = \frac{m}{M} RT_1,$$

определим объем газа в первом состоянии

$$V_1 = \frac{mRT_1}{Mp};$$

$$V_1 = \frac{10 \cdot 10^{-3} \text{ кг} \cdot 8,31 \frac{\text{Дж}}{\text{моль} \cdot \text{К}} \cdot 283 \text{ К}}{0,032 \frac{\text{кг}}{\text{моль}} \cdot 0,303 \cdot 10^6 \text{ Па}} = 2,4 \cdot 10^{-3} \text{ м}^3.$$

Выразим из уравнения Менделеева – Клапейрона для второго состояния газа конечную температуру:

$$pV_2 = \frac{m}{M} RT_2, \quad T_2 = \frac{pV_2 M}{Rm};$$

$$T_2 = \frac{0,303 \cdot 10^6 \text{ Па} \cdot 10 \cdot 10^{-3} \text{ м}^3 \cdot 0,032 \frac{\text{кг}}{\text{моль}}}{8,31 \frac{\text{Дж}}{\text{моль} \cdot \text{К}} \cdot 10 \cdot 10^{-3} \text{ кг}} \approx 1167 \text{ К}$$

Ответ: $V_1 = 2,4 \cdot 10^{-3} \text{ м}^3$; $T_2 \approx 1167 \text{ К}$.

Контрольные вопросы

1. Какое уравнение называют уравнением состояния газа?
2. При каком условии выполняется соотношение термодинамических параметров, полученных Клапейроном?
3. В чем различие объединенных газовых законов Клапейрона и Менделеева – Клапейрона?
4. В чем заключается основное различие уравнения состояния газа от газового закона?
5. Как проверить выполнение уравнения Клапейрона опытным путем?



Упражнение

20

1. Определите температуру аммиака NH_3 , находящегося под давлением $2,3 \cdot 10^5 \text{ Па}$, если его объем $0,02 \text{ м}^3$, а масса 30 г .
2. Какое количество вещества находится в баллоне вместимостью 10 л при давлении $0,29 \text{ МПа}$ и температуре 17°C ?
3. Определите плотность кислорода при температуре 47°C и атмосферном давлении 10^5 Па .
4. Сколько молекул заключено в объеме $0,5 \text{ м}^3$ газа, если при температуре 300 К он находится под давлением $7,48 \cdot 10^5 \text{ Па}$?
5. Давление газа при уменьшении его объема в 2 раза увеличилось на 120 кПа , а абсолютная температура возросла на 10% . Каким было первоначальное давление?
6. В баллоне находится газ с температурой 15°C . Во сколько раз уменьшится давление газа, если 40% выйдет из баллона, а температура при этом понизится на 8°C ?

Творческое задание

Подготовьте сообщение по теме: «Применение сжатых и разреженных газов в технике».

§ 21. Изопроцессы. Графики изопроцессов. Закон Дальтона

Ожидаемый результат

Прочитав параграф, вы сможете:

- исследовать зависимость давления от объема газа при постоянной температуре (закон Бойля – Мариотта);
- исследовать зависимость объема газа от температуры при постоянном давлении (закон Гей-Люссака);
- исследовать зависимость давления от температуры газа при постоянном объеме (закон Шарля);
- применять газовые законы при решении расчетных и графических задач.

I. Изопроцессы

В физике и технике широкое применение получили изопроцессы.

Изопроцесс (от древнегреч. «isos» – «равный», «одинаковый») – это процесс, протекающий в системе с неизменной массой при постоянном значении одного из параметров системы.

Уравнения зависимости между двумя переменными термодинамическими параметрами для изопроцессов называют *газовыми законами*. Газовые законы можно рассматривать как частные случаи объединенного газового закона Клапейрона:

$$\frac{p_1 V_1}{T_1} = \frac{p_2 V_2}{T_2}. \quad (1)$$

II. Закон Бойля – Мариотта

Газовый закон устанавливающий зависимость давления газа от его объема при постоянной температуре, назван законом Бойля – Мариотта. Уравнение газового закона получено экспериментально в 1662 г. английским физиком Робертом Бойлем и независимо от него в 1676 г. французским физиком Эдмоном Мариоттом. Закон Бойля – Мариотта описывает изотермический процесс. *Изотермический процесс – это изменение состояния термодинамической системы при постоянной температуре.*

Из уравнения Клапейрона (1) для газа $T = \text{const}$

$$p_1 V_1 = p_2 V_2 \quad (2)$$

или

$$pV = \text{const}. \quad (3)$$

Задание 1

1. Преобразуйте уравнение Клапейрона (1) для трех частных случаев:
1) $T = \text{const}$;
2) $p = \text{const}$;
3) $v = \text{const}$.
2. Сравните полученные результаты с формулами 2, 5, 7.
3. Выясните, как называются записанные вами законы.

Ответьте на вопросы

1. По какому признаку вы отличаете прямую зависимость величин от обратной?
2. В каком из записанных вами законов зависимость величин прямая? В каком – обратная?
3. Как в математике называют график прямой зависимости?
4. Как называют график обратной зависимости?

При постоянном значении температуры произведение давления газа данной массы на его объем остается постоянной величиной.

Из (2) следует, что давление идеального газа обратно пропорционально его объему:

$$\frac{p_1}{p_2} = \frac{V_2}{V_1}. \quad (4)$$

График такой зависимости – гипербола, которую называют *изотермой*. На рисунке 110 представлены изотермы двух процессов, которые происходили при различных значениях температуры.

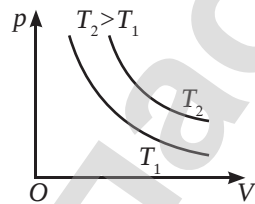


Рис. 110. Изотермы

III. Закон Гей-Люссака

Газовый закон, который описывает изобарный процесс, называют *законом Гей-Люссака*. Экспериментальное исследование зависимости объема газа от температуры провел в 1802 г. французский физик Жозеф Гей-Люссак.

Изобарный процесс – это процесс изменения состояния термодинамической системы при постоянном давлении.

Из уравнения Клапейрона при $p = \text{const}$, следует:

$$\frac{V_1}{T_1} = \frac{V_2}{T_2} \quad (5) \quad \text{или} \quad \frac{V}{T} = \text{const}. \quad (6)$$



Задание 2

Докажите рассуждением, что для диаграмм, представленных на рисунках 110–112, выполняются условия:

$$\begin{aligned} T_2 &> T_1 \\ p_2 &> p_1 \\ V_2 &> V_1 \end{aligned}$$

При постоянной массе газа и неизменном давлении отношение его объема к температуре остается постоянной величиной.

Из уравнения (5) следует, что зависимость объема от температуры прямо пропорциональна: $\frac{V_1}{V_2} = \frac{T_1}{T_2}$. На VT-диаграмме график зависимости представляет собой

прямую линию, проходящую через начало координат, которую называют *изобарой* (рис. 111). Газовые законы, справедливые для идеальных газов, при низких температурах не выполняются. Поэтому на VT-диаграмме график при низких температурах изображен штриховой линией.

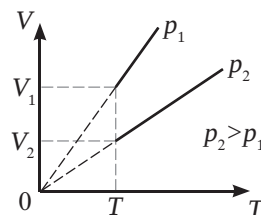


Рис. 111. Изобары

IV. Закон Шарля

Зависимость давления от температуры при постоянном объеме газа была установлена экспериментально французским ученым Жаном Шарлем в 1787 г. и названа *законом Шарля*.

Изохорный процесс – это процесс изменения состояния термодинамической системы при постоянном объеме.

Из уравнения Клапейрона при $V = \text{const}$ следует:

$$\frac{p_1}{T_1} = \frac{p_2}{T_2} \quad (7)$$

или
$$\frac{p}{T} = \text{const} . \quad (8)$$

При постоянной массе и неизменном объеме газа отношение его давления к температуре остается постоянной величиной.

Зависимость давления от абсолютной температуры прямо пропорциональная: $\frac{p_1}{p_2} = \frac{T_1}{T_2}$. График зависимости p от T – изохора, которая представлена на рисунке 112.

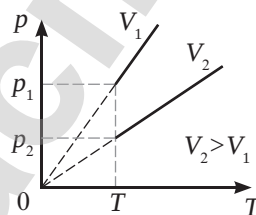


Рис. 112. Изохоры

V. Графическое изображение изопроцессов на различных диаграммах

На рисунке 113 на диаграммах pV , VT и pT изображены: изотерма – 1, изобара – 2, изохора – 3.

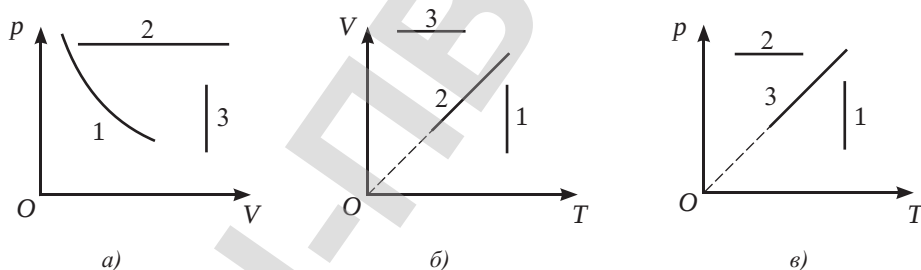


Рис. 113. Диаграммы изопроцессов

Любая точка на диаграмме соответствует состоянию газа, линия – термодинамическому процессу. Отметим точками три состояния газа с соответствующими им параметрами $p_1 T_1 V_1$, $p_2 T_2 V_2$, $p_3 T_3 V_3$ на pV -диаграмме (рис. 114, а). Направление переходов из одного состояния в другое обозначим стрелками. Для удобства использования диаграммы проведем вспомогательную линию: изотерму при температуре, равной температуре газа в первом состоянии T_1 . Из диаграммы видно, что переход из точки 1 в 2 происходит изобарно: $p_1 = p_2$, при этом температура газа возрастает $T_2 > T_1$, объем увеличивается, следовательно, при переходе из состояния 1 в состояние 2 газ расширялся изобарно. Переход из состояния 2 в 3 изотермический, давление газа уменьшалось $p_3 < p_2$, объем возрастал, газ изотермически расширялся.



Задание 3

Рассмотрите диаграммы, изображенные на рисунках 113, а, б, в. Графики каких процессов изображены на каждой диаграмме? Обоснуйте ваш ответ.

Переход газа из состояния 1 в 2 и затем 3 можно изобразить на VT-диаграмме (рис. 114, б) и на pT-диаграмме (рис. 114, в).

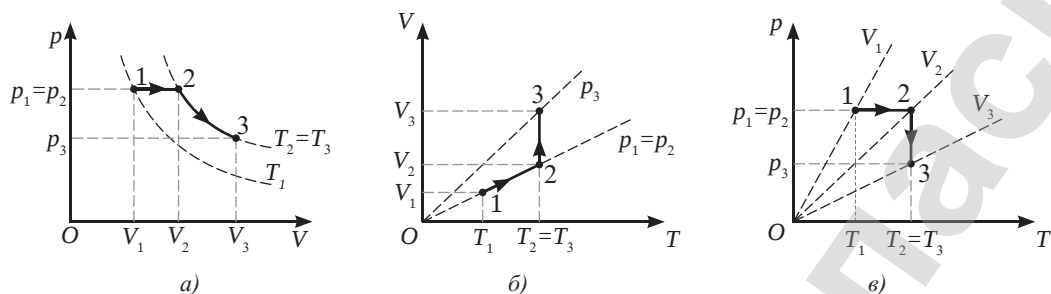


Рис. 114. Изображение термодинамических процессов в различных диаграммах:
1–2 изобарное расширение 2–3 изотермическое расширение

VI. Закон Дальтона. Парциальное давление

Для смеси газов, не вступающих в химическую реакцию, общее число молекул в сосуде равно сумме молекул каждого из газов, входящих в состав смеси:

$$N = N_1 + N_2 + \dots + N_n.$$

Разделим уравнение на объем сосуда:

$$n = n_1 + n_2 + \dots + n_n.$$

Подставим полученное уравнение для концентрации газов в уравнение состояния газа $p = nkT$, получим: $p = (n_1 + n_2 + \dots + n_n)kT$.

Раскрывая скобки, имеем: $p = n_1kT + n_2kT + \dots + n_nkT$.

Слагаемые в этом выражении представляют собой давление газов, входящих в состав смеси.

Парциальное давление составляет ту часть общего давления, которая приходится на долю данного газа в смеси.



Запомните!

Парциальное давление – это давление одного из газов смеси.

Давление смеси идеальных газов, не вступающих в химическую реакцию, равно сумме парциальных давлений каждого газа в отдельности.

$$p = p_1 + p_2 + p_3 + \dots + p_n.$$

Этот закон был установлен в 1809 г. английским ученым Джоном Дальтоном и носит его имя.



Возьмите на заметку

Атмосферное давление создано давлением азота, кислорода, водяных паров и всех примесей, содержащихся в воздухе.

Контрольные вопросы

1. Что называют изопроцессом?
2. Какой процесс называют изотермическим? Изобарным? Изохорным?
3. Какие законы называют газовыми?
4. Сформулируйте газовые законы.

★ Упражнение

21

1. Сосуд, содержащий 10 л воздуха при давлении 1 МПа, соединяют с пустым сосудом вместимостью 4 л. Определите давление, установившееся в сосудах. Процесс изотермический.
2. При 27°C газ занимает объем 10 л. До какой температуры его следует изобарно охладить, чтобы объем уменьшился на 0,25 первоначального объема?
3. Давление воздуха внутри плотно закупоренной бутылки при температуре $T = 280\text{ K}$ составляет $p = 100\text{ кПа}$. На сколько нужно нагреть бутылку, чтобы из нее вылетела пробка, если известно, что из холодной бутылки без нагревания пробку можно вынуть силой $F = 10\text{ Н}$? Сечение пробки $S = 4\text{ см}^2$.
4. Изобразите на pT - и VT -диаграммах процесс, проводимый с идеальным газом (рис. 115). Во сколько раз температура газа в состоянии 4 больше температуры в состоянии 1?
5. На рисунке 116 дана диаграмма цикла, совершаемого идеальным газом, в координатах VT . Изобразите диаграмму этого цикла в координатах pV . Определите отношение наибольшего объема газа в этом цикле к наименьшему.

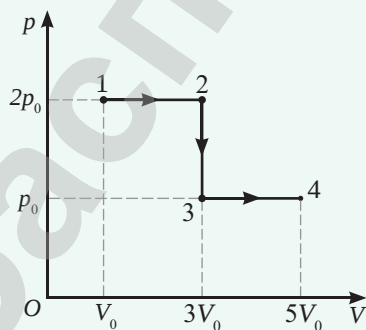


Рис. 115. К упражнению 21.4

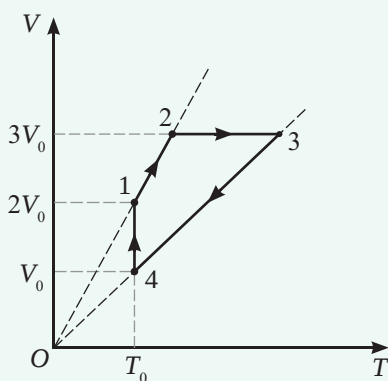


Рис. 116. К упражнению 21.5

Итоги главы 7

Уравнение состояния Менделеева – Клапейрона	Объединенный газовый закон	
$pV = \frac{m}{M} RT$	Клапейрона	Менделеева – Клапейрона
Закон Дальтона	$m = const$	$\frac{p_1 V_1 M_1}{T_1 m_1} = \frac{p_2 V_2 M_2}{T_2 m_2}$
$p = p_1 + p_2 + p_3 + \dots + p_n$	$\frac{p_1 V_1}{T_1} = \frac{p_2 V_2}{T_2}$ $\frac{pV}{T} = const$	$\frac{pVM}{mT} = const$
Газовые законы		
Бойля – Мариотта	Гей-Люссака	Шарля
$m = const,$ $T = const$ $p_1 V_1 = p_2 V_2$ $pV = const$	$m = const,$ $p = const$ $\frac{V_1}{T_1} = \frac{V_2}{T_2}$ $\frac{V}{T} = const$	$m = const,$ $V = const$ $\frac{p_1}{T_1} = \frac{p_2}{T_2}$ $\frac{p}{T} = const$

Законы

Закон Бойля – Мариотта

При постоянном значении температуры произведение давления газа данной массы на его объем остается постоянной величиной.

Закон Гей-Люссака

При постоянной массе газа и неизменном давлении отношение его объема к температуре остается постоянной величиной.

Закон Шарля

При постоянной массе и неизменном объеме газа отношение его давления к температуре остается постоянной величиной.

Объединенный газовый закон Клапейрона

Для данной массы газа произведение давления на объем, деленное на абсолютную температуру, есть величина постоянная, не зависящая от состояния, в котором находится газ.

Закон Дальтона

Давление смеси идеальных газов, не вступающих в химическую реакцию, равно сумме парциальных давлений каждого газа в отдельности.

Глоссарий

Газовый закон – уравнение зависимости между двумя переменными термодинамическими параметрами для изопроцессов.

Изопроцесс – процесс, протекающий в системе с неизменной массой при постоянном значении одного из параметров системы.

Изобарный процесс – процесс изменения состояния термодинамической системы при постоянном давлении.

Изотермический процесс – процесс изменение состояния термодинамической системы при постоянной температуре.

Изохорный процесс – процесс изменения состояния термодинамической системы при постоянном объеме.

Парциальное давление газа – давление, производимое каждым газом, входящим в состав смеси.

ГЛАВА 8

ОСНОВЫ ТЕРМОДИНАМИКИ

Термодинамика зародилась как экспериментальная наука о способах преобразования тепловой энергии тел в механическую энергию машины. Тепловые машины сыграли и продолжают играть основную роль в механизации ручного труда. Позже основы термодинамики проникли во многие разделы физики, так как обмен теплом является одним из основных процессов в жизни человека.

Термодинамика – раздел физики, который рассматривает явления, связанные со взаимным превращением механической и внутренней энергий и передачей внутренней энергии от одного тела к другому.

Изучив главу, вы сможете:

- применять формулы внутренней энергии одноатомного и двухатомного идеального газа при решении задач;
- применять первый закон термодинамики к изопроцессам и адиабатному процессу;
- описывать цикл Карно для идеального теплового двигателя;
- применять формулу коэффициента полезного действия теплового двигателя при решении задач.

§ 22. Внутренняя энергия идеального газа. Термодинамическая работа. Количество теплоты, теплоемкость

Ожидаемый результат

Прочитав параграф, вы сможете:

- применять формулы внутренней энергии одноатомного и двухатомного идеального газа при решении задач.



Вспомните!

(из курса физики 8 класса)

Два способа изменения внутренней энергии тела:

- 1) совершение механической работы;
- 2) теплообмен.

Три способа теплопередачи:

- 1) теплопроводность;
- 2) конвекция;
- 3) излучение.



Ответьте на вопрос.

Почему формула расчета внутренней энергии, данная в параграфе, справедлива только для идеальных газов?

I. Внутренняя энергия

С точки зрения МКТ внутренняя энергия тела – это сумма потенциальной энергии взаимодействия частиц, из которых состоит тело, и средней кинетической энергии их теплового движения.

Внутренняя энергия является функцией температуры и объема $U(T, V)$, поскольку энергия движения частиц прямо пропорциональна температуре тела:

$$\bar{E}_k = \frac{3}{2} kT, \quad (1)$$

а потенциальная энергия взаимодействия зависит от расстояния между ними и следовательно от объема тела.

Определим внутреннюю энергию идеального газа в некотором объеме. Потенциальная энергия взаимодействия идеальных газов пренебрежительно мала, поэтому внутренняя энергия тела равна сумме средних кинетических энергий всех его молекул:

$$U = N\bar{E} = \nu N_A \frac{3}{2} kT = \frac{3}{2} \nu RT. \quad (2)$$

Заменяя количество вещества отношением массы к молярной массе:

$$\nu = \frac{m}{M}, \quad (3)$$

получим формулу расчета внутренней энергии идеального одноатомного газа:

$$U = \frac{3}{2} \cdot \frac{m}{M} RT. \quad (4)$$

Используя уравнение состояния Менделеева – Клапейрона, выразим внутреннюю энергию одноатомного газа через давление и объем:

$$U = \frac{3}{2} pV. \quad (5)$$

Внутренняя энергия при переходе газа из одного состояния в другое не зависит от процесса перехода, она зависит только от параметров состояния: p, V, T . При изменении температуры внутренняя энергия газа меняется, изменение внутренней энергии равно:

$$\Delta U = U_2 - U_1 = \frac{3}{2} \cdot \frac{m}{M} R(T_2 - T_1)$$



Задание 1

1. Приведите примеры изменения внутренней энергии двумя способами.
2. Дайте определение каждому виду теплопередачи, приведите пример.

или

$$\Delta U = \frac{3}{2} \nu R \Delta T. \quad (6)$$

Изменение внутренней энергии газа прямо пропорционально изменению температуры тела. Если температура остается постоянной, то внутренняя энергия газа не меняется.

II. Внутренняя энергия многоатомных газов

Внутренняя энергия одноатомных газов определяется кинетической энергией теплового движения атомов, которые характеризуются тремя степенями свободы $i = 3$, поскольку пространство трехмерно. Введем обозначение степени свободы в формулы (4) и (5):

$$U = \frac{i}{2} \cdot \frac{m}{M} RT \quad (7)$$

или

$$U = \frac{i}{2} pV, \quad (8)$$

где i – число степеней свободы.

Двухатомные молекулы вращаются вокруг двух своих осей, поэтому число степеней свободы для них возрастает на 2 и равно $i = 5$. Для трех и более атомных газов существенным становится колебательное движение атомов внутри молекул. Число степеней свободы таких атомов возрастает до $i = 6$.

III. Работа газа или пара при расширении

Определим работу газа при расширении. Пусть газ находится в сосуде под невесомым поршнем. При нагревании давление газа возрастает, он перемещает поршень до тех пор, пока давление не станет равным давлению внешней среды $p_1 = p_2$ (рис. 117) или $F = F'$. При этом внутренняя энергия движущихся молекул превращается в механическую энергию движения поршня. *Работа – это мера превращения одного вида энергии в другой.* Работа, совершенная газом при расширении, равна: $A = F(h_2 - h_1) = pS(h_2 - h_1)$ или:

$$A = p\Delta V, \quad (9)$$

где p – давление газа, S – площадь поршня, ΔV – изменение объема газа под поршнем.

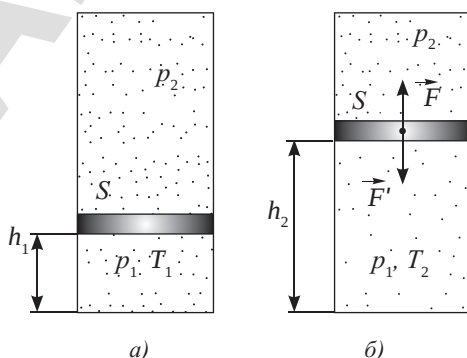


Рис. 117. При расширении газ совершает работу

Работа внешней силы: $A' = -F'(h_2 - h_1) = -A$. Работа газа при расширении положительная $A > 0$, работа внешней силы давления отрицательная $A' < 0$. При сжатии работа газа отрицательная, работа внешней силы положительная, таким образом:

$$A' = -A. \quad (10)$$

На pV -диаграмме (рис. 118) площадь, ограниченная графиком процесса, осью абсцисс и перпендикулярами, восстановленными в точках V_1 и V_2 , численно равна работе газа.

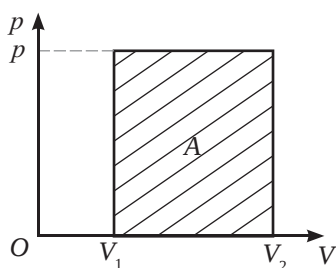


Рис. 118. Площадь фигуры на диаграмме численно равна работе, совершенной газом

IV. Количество теплоты. Теплоемкость

Количество теплоты Q – количественная мера изменения внутренней энергии при теплообмене.

Количество теплоты измеряют в джоулях:

$$[Q] = 1 \text{ Дж.}$$

Формулы расчета количества теплоты при нагревании, охлаждении и фазовых переходах вещества известны из курса физики 8 класса (таблица 8).

Таблица. 8. Формулы расчета количества теплоты

Процесс	Формула
Нагревание и охлаждение	$Q = cm(t_2 - t_1)$
Плавление	$Q = \lambda m$
Отвердевание	$Q = -\lambda m$
Кипение	$Q = rm$
Конденсация	$Q = -rm$
Сгорание топлива	$Q = qm$

Для расчета количества теплоты при нагревании и охлаждении введена удельная теплоемкость вещества. При определении количества теплоты при фазовом переходе используют удельную теплоту (таблица 9).



Ответьте на вопросы

1. Почему за единицу измерения количества теплоты и работы принят джоуль?
2. Какая внесистемная единица измерения энергии вам известна? Укажите соотношение этих единиц измерения с джоулем.



Запомните!

1 кал $\approx$ 4,19 Дж.



Обратите внимание!

Знак минус в формулах свидетельствует о том, что тело передает энергию другим телам или окружающей среде.



Задание 2

Дайте определение величинам, внесенным в таблицу 9.



Запомните!

Единица измерения теплоемкости тела:

$$[C_T] = 1 \frac{\text{Дж}}{\text{К}}.$$

Таблица. 9. Физические величины и их единицы измерения

Физическая величина	Обозначение	Единица измерения
Удельная теплоемкость вещества	c	$[c] = 1 \frac{\text{Дж}}{\text{кг} \cdot \text{К}}$
Удельная теплота плавления	λ	$[\lambda] = \frac{\text{Дж}}{\text{кг}}$
Удельная теплота парообразования	r	$[r] = 1 \frac{\text{Дж}}{\text{кг}}$
удельная теплота сгорания топлива	q	$[q] = 1 \frac{\text{Дж}}{\text{кг}}$

Расчет количества теплоты при нагревании и охлаждении тела упрощается при использовании теплоемкости тела: C_T .

Теплоемкость тела – это количество теплоты, которое получает или отдает тело массой m при изменении его температуры на 1 К .

Теплоемкость тела и удельная теплоемкость вещества связаны соотношением:

$$C_T = cm. \quad (11)$$

Формула расчета количества теплоты с использованием теплоемкости тела примет вид:

$$Q = C_T (t_2 - t_1). \quad (12)$$

V. Уравнение теплового баланса

В теплоизолированной системе тел с разными значениями температур происходит теплообмен. Процесс продолжается до наступления теплового равновесия в системе. В этом случае для системы тел выполняется уравнение теплового баланса:

$$Q_1 + Q_2 + \dots Q_n = 0, \quad (13)$$

где n – число тел в системе.

Если тело в результате теплообмена поглощает энергию, то количество теплоты, полученное телом, в уравнении (9) положительное, если выделяет, то количество теплоты отрицательное.

ПРИМЕР РЕШЕНИЯ ЗАДАЧИ

Определите начальную температуру нагретого алюминиевого куба, который полностью погрузился в лед при температуре -20°C . Изменением объема куба при его охлаждении пренебречь.

Дано:

$$t_1 = -20^\circ\text{C}$$

$$c_1 = 2100 \frac{\text{Дж}}{\text{кг} \cdot \text{К}}$$

$$c_2 = 4200 \frac{\text{Дж}}{\text{кг} \cdot \text{К}}$$

$$\rho_1 = 900 \frac{\text{кг}}{\text{м}^3}$$

СИ

$$T_1 = 253 \text{ К}$$

Решение:

Для того, чтобы куб полностью погрузился в лед, достаточно расплавить лед в объеме куба. Напишем уравнение теплового баланса для двух тел: $Q_1 + Q_2 = 0$, где Q_1 – количество теплоты, полученное льдом при его нагревании до 0°C и плавлении, Q_2 – количество теплоты, отданное кубом при его охлаждении до 0°C .

$$\rho_2 = 2700 \frac{\text{кг}}{\text{м}^3}$$

$$\lambda = 3,3 \cdot 10^5 \frac{\text{Дж}}{\text{кг}}$$

$$T_2 = ?$$

Так как $Q_1 = c_1 m_1 (T_{\text{пл}} - T_1) + \lambda m$; $Q_2 = c_2 m_2 (T_{\text{пл}} - T_2)$,

$m_1 = \rho_1 V$, $m_2 = \rho_2 V$, получим:

$$c_1 \rho_1 V (T_{\text{пл}} - T_1) + \lambda \rho_1 V + c_2 \rho_2 V (T_{\text{пл}} - T_2) = 0.$$

Из последнего уравнения, раскрывая скобки, имеем:

$$T_2 = \frac{c_1 \rho_1 (T_{\text{пл}} - T_1) + \lambda \rho_1}{c_2 \rho_2} + T_{\text{пл}}.$$

Выполним расчеты:

$$T_2 = \frac{2100 \frac{\text{Дж}}{\text{кг} \cdot \text{К}} \cdot 900 \frac{\text{кг}}{\text{м}^3} (273 - 253) \text{ К} + 3,3 \cdot 10^5 \frac{\text{Дж}}{\text{кг}} \cdot 900 \frac{\text{кг}}{\text{м}^3}}{4200 \frac{\text{Дж}}{\text{кг} \cdot \text{К}} \cdot 2700 \frac{\text{кг}}{\text{м}^3}} + 273 \text{ К} \approx 303 \text{ К}.$$

Ответ: $T_2 \approx 303 \text{ К}$.

Контрольные вопросы

1. Что такое внутренняя энергия? От каких параметров она зависит?
2. Какими способами можно изменить внутреннюю энергию тела или системы тел?
3. Что называют количеством теплоты? Какие формулы расчета количества теплоты вам известны?
4. В чем различие теплоемкости тела от удельной теплоемкости вещества?
5. Каков физический смысл совершенной работы?



Упражнение

22

1. Как изменится внутренняя энергия 240 г кислорода при его охлаждении на 100 К?
2. Определите внутреннюю энергию одноатомного идеального газа, взятого в количестве 5 молей, при температуре 27 °С?
3. Зависит ли изменение внутренней энергии газа от способа его перевода из состояния 1 в состояние 2 (рис. 119)? Найдите изменение внутренней энергии при переходе из состояния 1 в состояние 2, если газ одноатомный; $p_0 = 10^5 \text{ Па}$, $V_0 = 2 \text{ л}$.

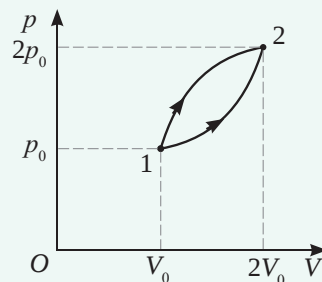


Рис. 119. К упражнению 22.3

4. Один моль газа, имевший начальную температуру $T = 300 \text{ К}$, изобарно расширился, совершив работу $A = 12,5 \cdot 10^3 \text{ Дж}$. Во сколько раз при этом увеличится объем газа?
5. Некоторое количество вещества массой $m = 220 \text{ г}$ нагревают до температуры $t_1 = 330 \text{ °С}$ и затем помещают в алюминиевую чашку калориметра массой $m = 90 \text{ г}$, содержащую $m_3 = 150 \text{ г}$ воды при температуре $t_2 = 11,5 \text{ °С}$. Конечная температура, измеренная стеклянным термометром массой $m_4 = 17 \text{ г}$, равна $t_3 = 33,8 \text{ °С}$. Какова удельная теплоемкость этого вещества? Начальная температура термометра $t_1 = 20 \text{ °С}$.

§ 23. Первый закон термодинамики. Применение первого закона термодинамики к изопроцессам. Адиабатный процесс, уравнение Пуассона

Ожидаемый результат

Прочитав параграф, вы сможете:

- применять первый закон термодинамики к изопроцессам и адиабатному процессу.

I. Первый закон термодинамики

Сформулируем первый закон термодинамики с учетом двух способов передачи энергии.

Изменение внутренней энергии ΔU тела при переходе из одного состояния в другое равно сумме совершенной над телом работы A' и полученного им количества теплоты Q .

$$\Delta U = A' + Q. \quad (1)$$

Первый закон термодинамики является законом сохранения и превращения энергии для тепловых процессов. Об изменении внутренней энергии тела можно судить по его состоянию. Об увеличении внутренней энергии свидетельствуют увеличение температуры тела, его размельчение или разбрызгивание, плавление, кипение, испарение, увеличение объема. Если для изменения состояния тела или нескольких тел была затрачена энергия, то их внутренняя энергия возрастает.

Работа газа и совершенная над телом работа имеют противоположные знаки: $A = -A'$. Используя последнее соотношение, запишем первый закон термодинамики для газов:

$$Q = A + \Delta U. \quad (2)$$

Количество теплоты, полученное газом, расходуется на изменении внутренней энергии и на совершение газом работы.

Для твердых тел, в связи с малым изменением их объема при расширении, количество теплоты, переданное телу, определяет изменение его внутренней энергии:

$$Q = \Delta U.$$

II. Первый закон термодинамики для изохорного процесса

При изохорном процессе объем газа не меняется, следовательно, работа газом не совершается. Первый закон термодинамики примет вид:

$$Q_V = \Delta U \text{ при } V = \text{const}. \quad (3)$$

Подставим в полученное выражение (3) формулы расчета количества теплоты и изменения внутренней энергии:

$$Q_V = c_V m \Delta T, \quad \Delta U = \frac{i}{2} \cdot \frac{m}{M} R \Delta T, \quad \text{тогда } c_V m \Delta T = \frac{i}{2} \cdot \frac{m}{M} R \Delta T.$$

Поделим обе части уравнения на выражение $m\Delta T$, получим формулу расчета удельной теплоемкости газа при постоянном объеме:

$$c_V = \frac{i}{2} \cdot \frac{R}{M}. \quad (4)$$

Для идеального газа удельная теплоемкость при постоянном объеме равна: для одноатомного –

$$c_V = \frac{3}{2} \cdot \frac{R}{M}, \text{ для двухатомного – } c_V = \frac{5}{2} \cdot \frac{R}{M}.$$

В решении ряда задач термодинамики используют *молярную теплоемкость вещества*, которая равна произведению удельной теплоемкости вещества на его молярную массу. Молярная теплоемкость газа при постоянном объеме равна:

$$C_{MV} = c_V M = \frac{i}{2} \cdot \frac{R}{M} \cdot M$$

$$C_M = \frac{i}{2} R. \quad (5)$$

Молярная теплоемкость – это теплоемкость одного моля вещества.

Единица измерения:

$$[C_M] = 1 \frac{\text{Дж}}{\text{кг} \cdot \text{К}} \cdot \frac{\text{кг}}{\text{моль}} = 1 \frac{\text{Дж}}{\text{моль} \cdot \text{К}}.$$

III. Первый закон термодинамики для изобарного процесса

При изобарном процессе полученное количество теплоты идет на изменение внутренней энергии газа и совершение работы газом:

$$Q = \Delta U + A. \quad (6)$$

Подставим в первый закон термодинамики для изобарного процесса (6) формулы расчета количества теплоты Q , изменения внутренней энергии ΔU и работы:

$$A = p\Delta V = \frac{m}{M} R\Delta T,$$

получим:

$$c_p m \Delta T = \frac{i}{2} \cdot \frac{m}{M} R\Delta T + \frac{m}{M} R\Delta T. \quad (7)$$

Интересно знать!

Немецкий врач и естествоиспытатель Р. Майер в 1841 г. во время плавания в качестве корабельного врача на голландском судне на остров Яву открыл закон сохранения энергии в тепловых процессах. Открытие он совершил, сравнив различие цвета артериальной и венозной крови пациентов на северных и южных широтах.

Р. Майер рассмотрел применение закона сохранения энергии к процессам, происходящим в живых организмах. Он утверждал, что аккумуляторами солнечной энергии на Земле являются растения, а в других организмах происходят только ее превращения.



Ответьте на вопросы

1. Почему для газов введены несколько значений удельных теплоемкостей?
2. Почему удельная теплоемкость газа при изобарном процессе больше, чем при изохорном?



Обратите внимание!

Универсальная газовая постоянная показывает, какую работу необходимо совершить над одним молем газа, чтобы увеличить его температуру на 1 К при постоянном давлении.

Докажем это. Выразим универсальную газовую постоянную из формулы расчета работы газа:

$$A = \nu R\Delta T,$$

получим: $R = \frac{A}{\nu \Delta T}.$

При $\nu = 1$ моль, $\Delta T = 1$ К
 $R = A.$

Поделим уравнение (7) на выражение $m\Delta T$, получим формулу расчета удельной теплоемкости газа для изобарного процесса:

$$c_p = \frac{i}{2} \frac{R}{M} + \frac{R}{M} = c_v + \frac{R}{M} \quad \text{или} \quad c_p = \frac{R}{M} \left(\frac{i}{2} + 1 \right).$$

Молярная теплоемкость газа при постоянном давлении равна:

$$C_{Mp} = R \left(\frac{i}{2} + 1 \right). \quad (8)$$

Связь между молярными теплоемкостями газа при изохорном и изобарном процессах впервые установил немецкий ученый Р. Майер:

$$C_{Mp} = C_{Mv} + R. \quad (9)$$

IV. Первый закон термодинамики для изотермического процесса

Если температура газа не меняется, его внутренняя энергия остается величиной постоянной, тогда первый закон термодинамики будет иметь вид:

$$Q_T = A. \quad (10)$$

При изотермическом процессе меняется давление и объем газа, что затрудняет определение работы газа. В качественных задачах работу газа можно оценить по площади фигуры на pV -диаграмме. На рисунке 120 изображены два процесса: изобарное расширение $1 \rightarrow 2$ и изотермическое расширение $1 \rightarrow 2'$. В рассматриваемых процессах объем газа изменился на одно и то же значение $\Delta V = V_2 - V_1$. Как видно из графиков, работа, совершенная при изотермическом процессе, меньше работы, совершенной при изобарном процессе: $A_T < A_p$.

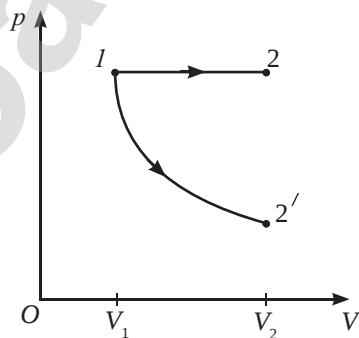


Рис. 120. При изобарном расширении работа газа больше, чем при изотермическом

V. Адиабатный процесс, уравнение Пуассона

Адиабатный процесс возможен в теплоизолированных газах.

Адиабатный процесс – это процесс, происходящий в термодинамической системе при отсутствии теплообмена с окружающими телами.



Возьмите на заметку

Процесс можно считать адиабатным, если он происходит за короткий промежуток времени, за который окружающая среда не может совершить теплообмен с газом.



Задание

1. Приведите примеры изопроцессов в природе, технике, быту.
2. Докажите, что молярная теплоемкость всех одноатомных газов одинаковая и имеет наименьшее значение при изохорном процессе.

Примерами адиабатного процесса с увеличением температуры могут быть процессы сжатия воздуха с парами горючего вещества в воздушном огне или бензиновой смеси в цилиндре ДВС. В результате адиабатного расширения воздуха, содержащего водяные пары, образуются облака.

Для адиабатного процесса $Q = 0$, следовательно, первый закон термодинамики примет вид:

$$\Delta U = A' \quad (11)$$

или

$$A = -\Delta U. \quad (12)$$

При адиабатном процессе работа внешних сил равна увеличению внутренней энергии газа (11). Работа газа при адиабатном процессе может быть совершена только за счет уменьшения внутренней энергии (12). Газ при этом охлаждается.

Работа газа при расширении на одно и то же значение меньше при адиабатном процессе в сравнении с изотермическим процессом. К этому выводу легко прийти, используя pV -диаграмму (рис. 121).

Для адиабатного процесса выполняется уравнение Пуассона:

$$p_1 V_1^\gamma = p_2 V_2^\gamma \quad \text{или} \quad p V^\gamma = \text{const},$$

где $\gamma = \frac{c_p}{c_v}$.

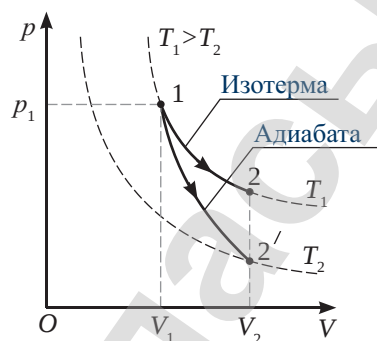


Рис. 121. Работа газа при адиабатном процессе меньше, чем при изотермическом

VI. Невозможность создания вечного двигателя

Создать вечный двигатель пытались многие изобретатели. Все попытки заканчивались неудачей, что стало экспериментальным доказательством выполнения первого закона термодинамики. Из первого закона термодинамики следует, что $A = Q - \Delta U$, следовательно, любой двигатель может совершить работу только за счет энергии Q , полученной извне, или за счет уменьшения своей внутренней энергии $A = -\Delta U$, если $Q = 0$.

Вечный двигатель первого рода – это воображаемая машина, которая совершала бы работу неограниченно долгое время, не заимствуя энергию извне.

ПРИМЕР РЕШЕНИЯ ЗАДАЧИ

Одноатомный идеальный газ, находящийся в цилиндре под поршнем, нагревают, газ совершает работу 600 Дж. Какое количество теплоты было передано газу?

Дано:

$$i = 3$$

$$A = 600 \text{ Дж}$$

$$Q = ?$$

Решение:

Запишем формулу первого закона термодинамики:

$$Q = \Delta U + A.$$

(1)

Внутренняя энергия одноатомного газа равна:

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

Работа газа:

$$A = p \Delta V. \quad (3)$$

Решая совместно уравнения (1), (2) и (3), получим:

$$Q = \frac{3}{2} A + A = \frac{5}{2} A.$$

Подставив численное значение работы, получим:

$$Q = \frac{5}{2} \cdot 600 \text{ Дж} = 1500 \text{ Дж}.$$

Ответ: $Q = 1500 \text{ Дж}$.

Контрольные вопросы

1. Сформулируйте первый закон термодинамики.
2. Сформулируйте первый закон термодинамики для изопроцессов.
3. При каком процессе теплоемкость газа больше?
4. Какая связь существует между теплоемкостями газа при изохорном и изобарном процессах? Кем установлена связь теплоемкостей?
5. Что такое молярная теплоемкость? В каких единицах она измеряется?
6. Каков физический смысл универсальной газовой постоянной?
7. При каком условии совершается адиабатный процесс?



Упражнение

23

1. Для изобарного нагревания 800 молей газа на 500 К сообщили 9,4 МДж теплоты. Определите работу газа и изменение внутренней энергии.
2. В закрытом сосуде находится $\nu = 4$ моль аргона при температуре $T = 300 \text{ К}$. На сколько процентов увеличится давление в сосуде, если газу сообщить количество теплоты $Q = 900 \text{ Дж}$?
3. Один киломоль гелия расширяется изобарно. Температура газа увеличивается на $\Delta T = 30 \text{ К}$. Определите изменение внутренней энергии газа, совершенную им работу и количество теплоты, полученное газом.
4. Для изобарного нагревания газа от температуры $T_1 = 288 \text{ К}$ до $T_2 = 340 \text{ К}$ потребовалось количество теплоты $Q = 5 \text{ кДж}$, для изохорного – $Q = 3,56 \text{ кДж}$. Какой объем занимает газ при температуре 288 К и давлении $p = 19,6 \text{ кПа}$?
5. При адиабатном расширении газ совершил работу $A = 400 \text{ Дж}$. Как и на сколько изменилась его внутренняя энергия?

Творческое задание

Подготовьте сообщение об ученых (на выбор): Р. Майер, Д. Джоуль, Г. Гельмгольц.

§ 24. Обратимые и необратимые процессы. Энтропия. Второй закон термодинамики. Круговые процессы и их коэффициент полезного действия, цикл Карно

Ожидаемый результат

Прочитав параграф, вы сможете:

- описать цикл Карно для идеального теплового двигателя;
- применять формулу коэффициента полезного действия теплового двигателя при решении задач.

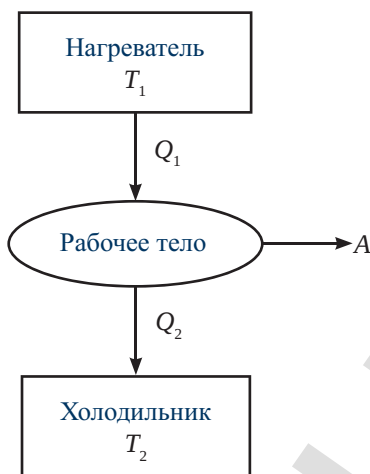


Рис. 122. Принципиальная схема тепловой машины

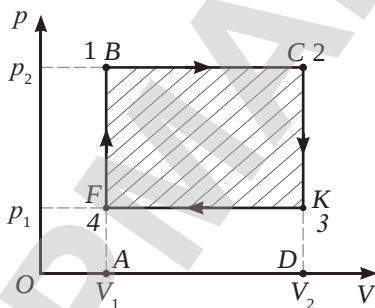


Рис. 123. Диаграмма циклического процесса из двух изобар и двух изохор

I. Принцип действия тепловых двигателей

Каждый тепловой двигатель состоит из трех частей: нагревателя, холодильника и рабочего тела, способного расширяться и сжиматься (рис. 122). Обычно роль рабочего тела выполняют газ или пар, заключенные в сосуд с поршнем. Техническая задача состоит в том, чтобы дать возможность рабочему телу попеременно приходить в соприкосновение с нагревателем и холодильником. При соприкосновении с нагревателем рабочее тело расширяется и совершает работу. Соприкосновение с холодильником заставляет рабочее тело сжиматься, поршень возвращается в исходное положение, и цикл начинается снова: рабочее тело, получив энергию от нагревателя, расширяется.

II. Циклический процесс. Работа газа за цикл

Рассмотрим круговой процесс, состоящий из двух изобар и двух изохор (рис. 123).

Из диаграммы видно, что газ, расширяясь, совершает положительную работу $A_1 > 0$, численно равную площади фигуры $ABCD$. При сжатии работа газа отрицательная $A_2 < 0$, численно равная площади фигуры $AFKD$. Следовательно, работа, совершенная газом за цикл равна площади фигуры $BCKF$, ограниченной графиками переходов газа по всем состояниям цикла:

$$A = A_1 - A_2. \quad (1)$$

Круговой процесс, или цикл, – это процесс, в результате которого система, пройдя через ряд промежуточных состояний, возвращается в исходное состояние.

III. Тепловые машины. КПД машины

Если круговой процесс происходит по прямому циклу: из состояния 1 переходит в состояние 3 и затем возвращается в исходное состояние 1 по часовой стрелке, то машину называют *тепловой*. В ней энергия, переданная рабочему телу от нагревателя, превращается в механическую энергию, совершается работа.

Тепловая машина – это устройство, предназначенное для преобразования внутренней энергии газа или пара в механическую энергию.



Задание 1

Используя дополнительные источники информации, выясните, из каких термодинамических процессов состоят циклы работ дизеля и ДВС.

Определим работу газа в тепловом двигателе. Запишем первый закон термодинамики для процесса расширения газа при переходе из первого состояния в третье состояние (рис. 123):

$$Q_1 = (U_3 - U_1) + A_1 \quad (2)$$

и для процесса сжатия при переходе из третьего состояния в первое:

$$-Q_2 = (U_1 - U_3) - A_2. \quad (3)$$

Сложим уравнения (2) и (3), получим:

$$Q_1 - Q_2 = A_1 - A_2.$$

Учитывая соотношение (1), получим:

$$Q_1 - Q_2 = A, \quad (4)$$

где Q_1 – количество теплоты переданное нагревателем газу;

Q_2 – количество теплоты, отданное газом холодильнику.

КПД теплового двигателя равен отношению работы газа к количеству теплоты, переданному нагревателем:

$$\eta_T = \frac{A}{Q_1} = \frac{Q_1 - Q_2}{Q_1} = 1 - \frac{Q_2}{Q_1}. \quad (5)$$

IV. Цикл Карно.

Идеальная тепловая машина

Французский инженер Сади Карно в 1824 году установил основные закономерности работы тепловых двигателей и предложил цикл с максимальным значением КПД. Машину, работающую по циклу Карно, называют *идеальной машиной*.

Круговой процесс Карно состоит из двух изотерм и двух адиабат (рис. 124). При изотермическом расширении $1 \rightarrow 2$ рабочее тело двигателя получает от нагревателя с постоянной температурой T_1 количество теплоты Q_1 . При изотермическом сжатии $3 \rightarrow 4$ рабочее тело отдает холодильнику, имеющему постоянную температуру T_2 , количество теплоты Q_2 . При адиабатном расширении $2 \rightarrow 3$ энергия к рабочему телу не поступает. Работа происходит за счет внутренней энергии рабочего тела, его температура уменьшается. При адиабатном сжатии $4 \rightarrow 1$ внутренняя энергия и температура рабочего тела возрастают.



Николя Леонар Сади Карно (1796–1832) – французский физик и инженер. Свои исследования изложил в сочинении «О движущей силе огня и о машинах, способных развивать эту силу». Придумал идеальную тепловую машину с максимальным КПД.

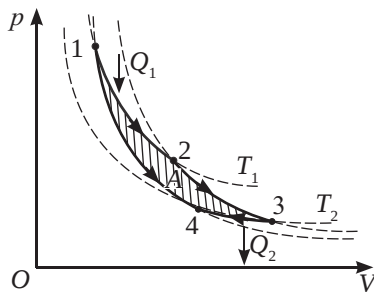


Рис. 124. Диаграмма циклического процесса идеальной машины

В своих расчетах С. Карно пришел к выводу, что КПД идеального двигателя не может быть равным 100 % или 1, он имеет предел, который определяется температурой нагревателя и холодильника:

$$\eta = \frac{T_1 - T_2}{T_1} \quad \text{или} \quad \eta = 1 - \frac{T_2}{T_1}. \quad (6)$$

Из полученной формулы (6) следует, что для повышения коэффициента полезного действия тепловых двигателей возможны два пути: повышение температуры нагревателя или понижение температуры холодильника T_2 до абсолютного нуля. Для реальных тепловых двигателей наиболее приемлемыми холодильниками являются атмосферный воздух или вода, температура которых в летнее время около 300 К. Повышение температуры нагревателя ограничено температурой плавления вещества, из которого изготовлен двигатель. Учитывая указанные ограничения температур, несложно убедиться, что КПД идеальной тепловой машины составляет около 70 %.



Обратите внимание!

Энергия любого вида: механическая, химическая, электрическая – могут полностью превратиться в любой другой вид энергии.

Внутренняя энергия превращается в любой другой вид энергии лишь частично. Молекулы тела не могут, полностью отдав энергию, прекратить движение.



Задание 2

Приведите примеры обратимых и необратимых термодинамических процессов.

V. Второй закон термодинамики. Обратимые и необратимые процессы

Из формулы $\eta = \frac{Q_1 - Q_2}{Q_1}$ следует, что $\eta = 1$ при $Q_2 = 0$. Но при этом условии двигатель не сможет повторить цикл. Даже в идеальной машине рабочее тело должно передать холодильнику часть энергии, чтобы, охладившись, вернуться в исходное состояние. При $Q_2 = 0$ в работе двигателей нарушается второй закон термодинамики.

В циклически действующей тепловой машине невозможен процесс, единственным результатом которого было бы преобразование в механическую работу всего количества теплоты, полученного от нагревателя.

Эта формулировка второго закона термодинамики была дана Кельвином. Воображаемый механизм, превращающий все количество теплоты в работу, называют *вечным двигателем второго рода*. Существование такого механизма невозможно.

В результате исследования тепловых процессов Р. Клаузиус сформулировал второй закон термодинамики следующим образом:

Теплота передается самопроизвольно от тел с более высокой температурой к телам с более низкой.

Физический смысл второго закона термодинамики заключается в том, что энергия теплового движения молекул в отличие от других видов энергии – механической, электрической,

ядерной – не может полностью превращаться в другой вид энергии. Любой физический процесс, в котором происходит превращение различных видов энергии в тепловую, является необратимым процессом. Он не может быть полностью осуществлен в обратном направлении. Для возвращения термодинамической системы в первоначальное состояние необходимы энергетические затраты, следовательно, изменения в окружающей среде.

VI. Энтропия

О возможном направлении процессов в термодинамике можно судить по энтропии S .

Энтропия – это физическая величина, являющаяся мерой необратимого рассеяния энергии.

Изменение энтропии определяется отношением количества теплоты, полученной или отданной системой, к температуре, при которой происходил процесс:

$$\Delta S = \frac{\Delta Q}{T},$$

где ΔS – изменение энтропии; ΔQ – количество теплоты; T – температура процесса в кельвинах.

Единица измерения энтропии в СИ:

$$1 \frac{\text{Дж}}{\text{К}}.$$

Исследования показали, что для обратимых процессов энтропия остается постоянной, изменение энтропии равно нулю. Для необратимых процессов изменение энтропии больше нуля, она возрастает. Это свидетельствует о том, что в природе в реальных необратимых процессах преобладает превращение всех видов энергии во внутреннюю энергию. Изолированные термодинамические системы стремятся к максимальному значению энтропии, при которой системы достигают абсолютно устойчивого равновесия.

VII. Холодильные машины. КПД холодильной машины

Устройство, которое совершает замкнутый цикл в обратном направлении, против часовой стрелки, называют *холодильной машиной*. В холодильной машине за счет работы внешних сил рабочее тело отнимает у холодильника количество теплоты Q_2 и передает нагревателю количество теплоты Q_1 , которое больше на величину работы, совершенной внешними силами: $Q_1 = Q_2 + A'$.

КПД холодильной машины равен:

$$\eta_x = \frac{Q_2}{A'} \text{ или } \eta_x = \frac{Q_2}{Q_1 - Q_2},$$

Интересно знать!

Планета Земля вместе с живой и неживой природой представляет собой сложнейшую самостоятельную экосистему. Для обеспечения жизни на Земле необходим источник энергии с низким значением энтропии – это солнечное излучение. Оно обеспечивает жизнедеятельность биосферы, протекание различных неравновесных процессов, включая фотосинтез и другие биохимические и биофизические реакции.

Интересно знать!

Все горячие тела отдают энергию более холодным. Энтропия во всем мире возрастает. Когда все температуры уравниваются и энтропия достигнет максимума, в мире останется только энергия беспорядочного движения молекул. Все процессы прекратятся. Наступит тепловая смерть Вселенной. Эта проблема серьезно волновала ученых в конце XIX в.

где Q_2 – количество теплоты, отнятое у холодильника, Q_1 – количество теплоты, переданное нагревателю, A' – работа внешних сил.

$$\text{КПД идеальной холодильной машины: } \eta_x = \frac{T_2}{T_1 - T_2}.$$

Контрольные вопросы

1. Какой процесс называют круговым?
2. Назовите основные части любой тепловой машины.
3. Какие машины работают по прямому циклу? Какие – по обратному?
4. Какой процесс назван циклом Карно?
5. Сформулируйте второй закон термодинамики.
6. Мерой какого процесса является энтропия?

★ Упражнение

24

1. Тепловая машина работает по замкнутому циклу. Подведенное за цикл количество теплоты $Q_1 = 0,1$ МДж, отданное холодильнику – $Q_2 = 80$ кДж. Определите полезную работу за цикл и КПД тепловой машины.
2. КПД автомобиля $\eta = 22\%$. Какое количество теплоты выделяется в камере сгорания двигателя автомобиля каждую секунду, если двигатель автомобиля развивает мощность $N = 22,5$ кВт?
3. Определите КПД цикла, если известно, что максимальная и минимальная температуры в цикле отличаются в 3 раза (рис. 125). Рабочее тело – идеальный одноатомный газ.
4. Определите КПД идеальной тепловой машины, если температуры нагревателя и холодильника $t_1 = 200^\circ\text{C}$ и $t_2 = 17^\circ\text{C}$ соответственно. Во сколько раз нужно увеличить температуру нагревателя, чтобы увеличить КПД цикла в $n = 2$ раза?
5. Идеальная тепловая машина совершает за один цикл работу $A = 73,5$ кДж. Температура нагревателя $t_1 = 100^\circ\text{C}$, температура холодильника $t_2 = 0^\circ\text{C}$. Определите КПД цикла и количество теплоты, отданное за один цикл холодильнику.

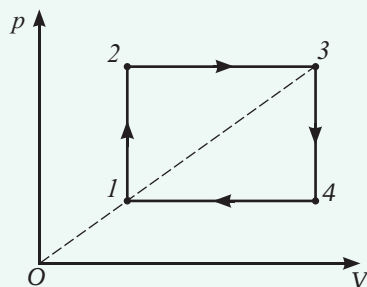


Рис. 125. К упражнению 24.3.

Творческое задание

Подготовьте сообщения по темам (на выбор):

1. «Энтропия Земли и Вселенной».
2. «Тепловые двигатели и охрана окружающей среды».

Итоги главы 8

Внутренняя энергия, изменение внутренней энергии	Работа газа	Количество теплоты
$U = \frac{i}{2} \cdot \frac{m}{M} RT$ $U = \frac{i}{2} pV$ $i = 3$ – для одноатомного газа $i = 5$ – для двухатомного газа $i = 6$ – для многоатомного газа $\Delta U = \frac{i}{2} \nu R \Delta T$	$A = p \Delta V$ $A = \frac{m}{M} R \Delta T$ Связь работы внешних сил и работы газа $A' = -A$	При нагревании (охлаждении) $Q = cm(t_2 - t_1)$ $Q = C_T(t_2 - t_1)$ При плавлении (отвердевании) $Q = \lambda m$ При кипении (конденсации) $Q = rm$ При сгорании топлива $Q = qm$
I закон термодинамики	КПД машин	Теплоемкости, связь теплоемкостей
$\Delta U = A' + Q$ $Q = A + \Delta U$ Для изохорного процесса $Q_V = \Delta U$ Для изобарного процесса $Q_p = A + \Delta U$ Для изотермического процесса $Q_T = A$ Для адиабатного процесса $Q = 0$ $\Delta U = A'$ $A = -\Delta U$	Тепловая машина $\eta_T = \frac{A}{Q_1} = \frac{Q_1 - Q_2}{Q_1} = 1 - \frac{Q_2}{Q_1}$ Идеальная тепловая машина $\eta = \frac{T_1 - T_2}{T_1}; \eta = 1 - \frac{T_2}{T_1}$ Холодильная машина $\eta_x = \frac{Q_2}{A'}; \eta_x = \frac{Q_2}{Q_1 - Q_2}$ Идеальная холодильная машина $\eta_x = \frac{T_2}{T_1 - T_2}$	Теплоемкость тела $C_T = cm$ Удельные теплоемкости газов $c_V = \frac{i}{2} \cdot \frac{R}{M}$ $c_p = \frac{R}{M} \left(\frac{i}{2} + 1 \right)$ $c_p = c_V + \frac{R}{M}$ Молярные теплоемкости газов $C_{MV} = \frac{i}{2} R$ $C_{Mp} = R \left(\frac{i}{2} + 1 \right)$ $C_{Mp} = C_{MV} + R$
Уравнение теплового баланса для теплоизолированной системы		
$Q_1 + Q_2 + \dots + Q_n = 0$		

Законы термодинамики

Первый закон термодинамики

Изменение внутренней энергии ΔU тела при переходе из одного состояния в другое равно сумме совершенной над телом работы A' и полученного им количества теплоты Q .

Количество теплоты, полученное газом, расходуется на изменении внутренней энергии и на совершении газом работы.

Второй закон термодинамики

Формулировка Кельвина: «В циклически действующей тепловой машине невозможен процесс, единственным результатом которого было бы преобразование в механическую работу всего количества теплоты, полученного от нагревателя».

Формулировка Клаузиуса: «Теплота передается самопроизвольно от тел с более высокой температурой к телам с более низкой».

Глоссарий

Адиабатный процесс – процесс, происходящий в термодинамической системе при отсутствии теплообмена с окружающими телами.

Вечный двигатель первого рода – воображаемая машина, которая совершала бы работу неограниченно долгое время, не заимствуя энергии извне.

Вечный двигатель второго рода – воображаемый механизм, превращающий все количество теплоты в работу.

Внутренняя энергия тела – сумма потенциальной энергии взаимодействия частиц, из которых состоит тело, и средней кинетической энергии их теплового движения.

Количество теплоты – количественная мера изменения внутренней энергии при теплообмене.

Круговой процесс, или цикл, – процесс, в результате которого система, пройдя через ряд промежуточных состояний, возвращается в исходное состояние.

Молярная теплоемкость – теплоемкость одного моля вещества.

Теплоемкость тела – количество теплоты, которое получает или отдает тело массой m при изменении его температуры на 1 К.

Тепловая машина – устройство, предназначенное для преобразования внутренней энергии газа или пара в механическую энергию.

Термодинамика – раздел физики, который рассматривает явления, связанные с взаимным превращением механической и внутренней энергий и передачей внутренней энергии от одного тела к другому.

Удельная теплота сгорания топлива – количество теплоты, которое выделяется при полном сгорании 1 кг топлива.

Универсальная газовая постоянная – величина, которая показывает, какую работу необходимо совершить над одним молем газа, чтобы увеличить его температуру на 1 К при постоянном давлении.

ГЛАВА 9

ЖИДКИЕ И ТВЕРДЫЕ ТЕЛА

Свойства жидкостей и твердых тел зависят от внутренней структуры вещества: расстояния между частицами и порядка их расположения. Благодаря особенностям взаимодействия молекул жидкости с молекулами твердых тел мы наблюдаем капиллярные явления, смачивание жидкостями твердых тел. Различия в строении позволяют объяснить такие свойства твердых тел, как упругость, пластичность, хрупкость, прочность, твердость, текучесть.

Над поверхностью жидкостей и твердых тел в результате испарения образуются пары, свойства которых зависят от внешних условий.

В данной главе мы рассмотрим некоторые свойства жидкостей, твердых тел и их паров.

Изучив главу, вы сможете:

- определять относительную влажность воздуха с помощью гигрометра и психрометра;
- определять коэффициент поверхностного натяжения жидкости различными способами;
- различать структуры кристаллических и аморфных тел на примере различных твердых тел;
- определять модуль Юнга при упругой деформации.

§ 25. Насыщенный и ненасыщенный пар, влажность воздуха. Фазовые диаграммы, тройная точка, критическое состояние вещества

Ожидаемый результат

Прочитав параграф, вы сможете:

- определять относительную влажность воздуха с помощью гигрометра и психрометра.



Вспомните!

Процесс перехода вещества из жидкого состояния в газообразное называют парообразованием.

Конденсация – это процесс превращения пара в жидкость.



Ответьте на вопросы

1. Какие два способа парообразования существуют? Дайте им определения.
2. От каких факторов зависит скорость испарения?
3. При каком условии жидкость кипит?

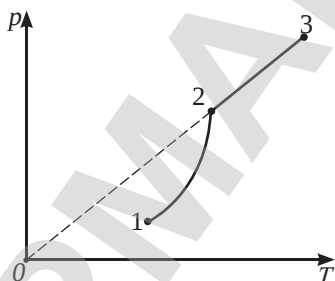


Рис. 126. График зависимости давления насыщенного пара от температуры и концентрации (1→2).

I. Насыщенный и ненасыщенный пар

Если процесс парообразования происходит в закрытом сосуде при неизменной температуре, то увеличение концентрации пара жидкости через некоторое время прекратится. Устанавливается динамическое равновесие между процессами испарения и конденсации.

Динамическое равновесие – это состояние термодинамической системы, при котором за одно и то же время число молекул, покидающих жидкость, становится равным числу молекул, возвращающихся в нее.

Пар, находящийся в состоянии динамического равновесия со своей жидкостью, называют насыщенным паром.

Давление пара зависит от температуры и концентрации молекул:

$$p = nkT. \quad (1)$$

Из уравнения (1) следует, что при $T = \text{const}$ давление пара зависит только от концентрации молекул. При изменении температуры давление определяется двумя параметрами: температурой и концентрацией молекул.

Пар, не находящийся в состоянии динамического равновесия со своей жидкостью, называют ненасыщенным паром.

Если пар над жидкостью ненасыщен, то испарение преобладает над конденсацией.

II. Связь термодинамических параметров P , V , T для насыщенных паров

При сжатии насыщенного пара концентрация молекул увеличивается, равновесие между процессами испарения и конденсации нарушается – часть пара превращается в жидкость. Давление насыщенного пара принимает значение в соответствии с его температурой. При увеличении объема пара над жидкостью концентрация молекул уменьшается. В результате

испарение преобладает над конденсацией до тех пор, пока давление не станет равным давлению насыщенного пара при данной температуре. Таким образом, *давление насыщенного пара не зависит от его объема*. Значения давлений насыщенного пара при различных значениях температуры даны в таблице 7 Приложения.

Опыты показывают, что зависимость давления насыщенных паров над жидкостью от температуры при постоянном объеме не линейная. График зависимости представляет собой квадратичную функцию до тех пор, пока в сосуде присутствует жидкость. На графике, изображенном на *рисунке 126*, переход 1→2 соответствует зависимости давления насыщенного пара от его температуры и концентрации. При переходе пара из состояния 2 в состояние 3 (*рис. 126*) концентрация остается величиной постоянной, поскольку жидкость полностью превратилась в пар. Зависимость давления от температуры линейная.

III. Абсолютная влажность воздуха. Точка росы

Окружающий нас воздух всегда содержит в себе водяные пары.

Количество водяного пара, содержащегося в 1 м³ воздуха, называют абсолютной влажностью воздуха.

Если в воздухе объемом V содержится пар массой m , то в каждой единице объема воздуха содержание водяного пара будет равно:

$$\rho = \frac{m}{V}, \quad (2)$$

где ρ – абсолютная влажность.

Водяные пары, находящиеся в воздухе, являются, как правило, ненасыщенными.

Температуру, при которой водяной пар, находящийся в атмосферном воздухе, становится насыщенным, называют точкой росы.

IV. Относительная влажность

Интенсивность испарения воды зависит от степени насыщения водяных паров, которая характеризуется относительной влажностью.



Ответьте на вопросы

1. Назовите параметры, от которых зависит давление насыщенных паров.
2. Почему для перехода 2→3 на *рисунке 126* применим закон Шарля?
3. Почему газовые законы для насыщенного газа неприемлемы?



Возьмите на заметку

Для насыщенного пара можно использовать уравнение состояния Менделеева – Клапейрона при определении одного из неизвестных параметров пара.



Запомните!

Единица измерения абсолютной влажности в СИ:

$$[\rho] = 1 \frac{\text{кг}}{\text{м}^3}.$$

Наиболее часто употребляется единица измерения

$$1 \frac{\text{г}}{\text{см}^3}.$$



Возьмите на заметку

1. В метеорологии абсолютной влажностью называют давление водяного пара, содержащегося в воздухе, выраженное в мм рт.ст.
2. Молярная масса водяного пара равна:

$$M = 18 \cdot 10^{-3} \frac{\text{кг}}{\text{моль}}.$$

Относительная влажность воздуха – это отношение абсолютной влажности воздуха к количеству пара, которое необходимо для насыщения 1 м³ воздуха при данной температуре, выраженное в процентах.

$$\varphi = \frac{\rho}{\rho_H} \cdot 100\%, \quad (3)$$

где φ – относительная влажность, ρ – абсолютная влажность пара, ρ_H – плотность насыщенного пара при данной температуре.

Нами было доказано, что отношение абсолютных влажностей равно отношению давлений, следовательно:

Отношение давления водяного пара, содержащегося в воздухе при данной температуре, к давлению насыщенного водяного пара при той же температуре, выраженное в процентах, называют относительной влажностью воздуха.

$$\varphi = \frac{p}{p_H} \cdot 100\%, \quad (4)$$

где p – давление водяного пара, p_H – давление насыщенного пара при той же температуре.

V. Конденсационный гигрометр. Определение влажности воздуха по точке росы

Приборы для определения влажности воздуха называют *гигрометрами* (от древнегреч. «гигрос» – «влажный»).

Конденсационный гигрометр используют для определения точки росы. Он представляет собой металлическую камеру, укрепленную на штативе (рис. 127, а). В камере два отверстия: одно для термометра, второе для продувания воздуха (рис. 127, б). Передняя стенка камеры (2) и кольцевая рамка (3) зеркально отполированы. Рамка и камера разделены друг от друга теплоизоляционным материалом (4). Камеру (1) наполовину заполняют эфиром или спиртом и продувают воздух над поверхностью жидкости с помощью резиновой груши (5). Испаряясь, жидкость охлаждается, на стенках коробки конденсируется пар. Отполированная поверхность коробки тускнеет в сравнении с поверхностью рамки. В момент появления росы снимают показание термометра – точку росы.

По точке росы определяют влажность воздуха в помещении. Для этого в таблице 7 плотностей насыщенного пара находят значение абсолютной влажности ρ , соответствующее точке росы. Определив по той же таблице плотность насыщенного пара ρ_H при температуре окружающей среды, рассчитывают относительную влажность по формуле (3).



Задание 1

1. Докажите на основании уравнения состояния Менделеева – Клапейрона, что между давлением пара и абсолютной влажностью существует прямая зависимость.
2. Изобразите график зависимости давления водяного пара от абсолютной влажности при температуре 20 °С.
3. Приведите примеры конденсации водяных паров из атмосферы при температуре, равной точке росы.

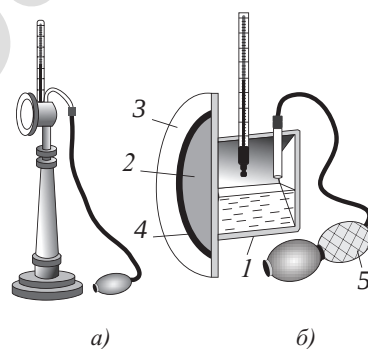


Рис. 127. Конденсационный гигрометр



Задание 2

1. Составьте алгоритм определения относительной влажности воздуха с использованием конденсационного гигрометра и психрометра.
2. Определите влажность воздуха в кабинете физики.

VI. Психрометр

Психрометр служит для определения относительной влажности воздуха. Он состоит из двух одинаковых термометров, укрепленных на корпусе (рис. 128). Резервуар одного из термометров обмотан марлей и опущен в сосуд с водой. Для определения относительной влажности по психрометру определяют температуру воздуха и разность температур между показаниями сухого и влажного термометров. По психрометрической таблице (таблица 9 Приложения) определяют относительную влажность воздуха.

VII. Сублимация. Десублимация.

Тройная точка

Переход вещества из твердого состояния в газообразное, минуя жидкое, называют *сублимацией*, или *возгонкой*. Сублимация происходит с поглощением энергии.

Обратным процессом является *десублимация*.

Тройная точка – это значение температуры и давления, при котором вещество может равновесно находиться в трех агрегатных состояниях: твердом, жидком и газообразном.

Тройная точка – это одна из характеристик химического вещества. В этой точке на фазовой диаграмме сходятся линии фазовых переходов: плавления, кипения и сублимации (рис. 129).

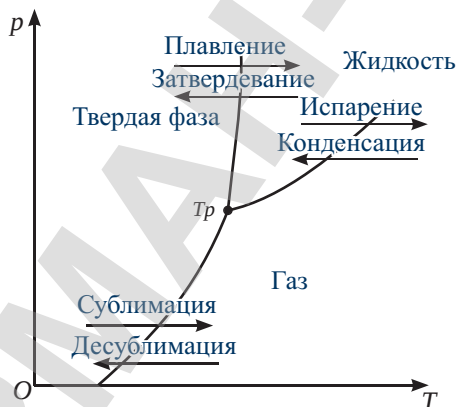


Рис. 129. Диаграмма фазовых переходов

Для воды температура в тройной точке равна 273,16 К, давление 611,657 Па.

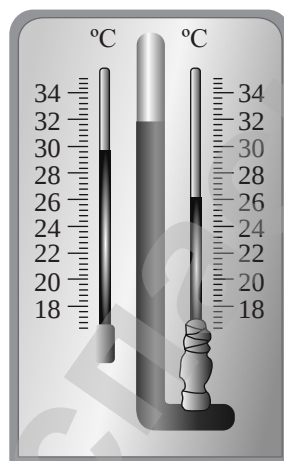


Рис. 128. Психрометр



Ответьте на вопрос

Как изменится показание психрометра, если влажность воздуха увеличится?



Ответьте на вопросы

1. Какие явления изображены на рисунках 130, 131.
2. Почему белье, вывешенное зимой на улице, сохнет?



Рис. 130. Озеро Боровое



Рис. 131. Зимнее утро в Каркаралинских горах

VIII. Кипение. Зависимость температуры кипения от внешнего давления

Пузырьки внутри жидкости расширяются и всплывают на поверхность, если давление насыщенного пара внутри пузырьков равно внешнему давлению или превышает его. При нормальном атмосферном давлении водяные пары достигают насыщения при температуре $100\text{ }^{\circ}\text{C}$.

Кипение жидкости наступает когда давление насыщенного пара равно внешнему давлению на ее свободную поверхность, а температура всех слоев жидкости одинаковая.

Закипание жидкости может произойти при более низких температурах, если уменьшить давление газа над поверхностью жидкости. Повышение давления газов, наоборот, приведет к закипанию жидкости при более высокой температуре (рис. 132).



Вспомните!

Процесс парообразования, происходящий в объеме всей жидкости, называют кипением.

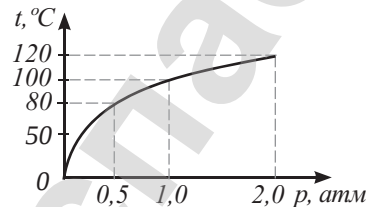


Рис. 132. График зависимости температуры кипения жидкости от внешнего давления



Ответьте на вопросы

1. Почему перед закипанием жидкость шумит?
2. Почему при увеличении давления над свободной поверхностью жидкости температура кипения возрастает?
3. Почему вода в кастрюле, плавающей в другой кастрюле с кипящей водой, не закипает?



Задание 3

Приведите примеры закипания жидкости при низкой и высокой температурах.

Таблица 10

Вещество	Критическая температура $t\text{ }^{\circ}\text{C}$
Вода	374
Эфир	197
Хлор	146
Кислород	-118
Азот	-146
Водород	-240
Гелий	-263

IX. Критическое состояние вещества

При нагревании жидкости в закрытом сосуде плотность жидкости уменьшается, плотность насыщенного пара возрастает (рис. 133). В некоторый момент плотности жидкости и пара становятся равными и граница, разделяющая два состояния вещества, исчезает. Вещество находится в критическом состоянии. В этом состоянии удельная теплота парообразования жидкости принимает значение, равное нулю $r = 0$.

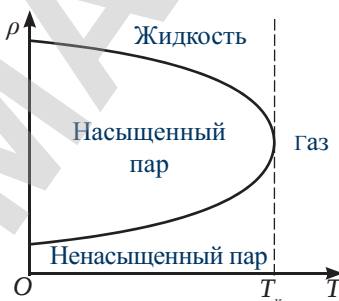


Рис. 133. Фазовый переход при температуре выше критической невозможен



Возьмите на заметку

Газообразное состояние вещества при температуре ниже критической называют паром.



Ответьте на вопросы

1. Почему на Земле нет кислородных и азотных озер?
2. При каком условии можно получить жидкий азот?

Температуру, при которой различие в значениях плотности жидкости и ее насыщенного пара исчезает, называют критической температурой данного вещества. При температурах более высоких, чем критическая, вещество находится только в газообразном состоянии, простым сжатием получить из него жидкость невозможно. Если температура вещества ниже критической температуры, то сжатием его можно перевести в жидкое состояние.

Контрольные вопросы

1. Какой пар называют насыщенным?
2. Как температура кипения жидкости зависит от внешнего давления?
3. Какую температуру называют критической?
4. В чем различие понятий газ и пар?
5. Что называют абсолютной влажностью воздуха? В каких единицах ее измеряют?
6. Какую температуру называют точкой росы?
7. Что называют относительной влажностью?
8. Какими приборами и как определяют влажность воздуха?



Упражнение

25

1. Определите плотность насыщенных паров воды при температуре 50 °С.
2. Насыщенный водяной пар, имевший начальную температуру 20 °С, отделили от жидкости и нагрели до 30 °С при постоянном объеме. Определите давление пара. Как называют такой пар?
3. Определите абсолютную влажность воздуха при температуре 50 °С, если давление водяного пара 8 кПа.
4. Абсолютная влажность воздуха при температуре 300 К равна 12,9 г/м³. Чему равна относительная влажность воздуха?
5. Сосуд разделен перегородкой на две части так, что объем первой части больше второй в $n = 3$ раза. В первой части находится воздух с относительной влажностью $\varphi_1 = 20\%$, во второй – с относительной влажностью $\varphi_2 = 80\%$. Какой будет относительная влажность в сосуде, если, не изменяя температуру, убрать перегородку?

Экспериментальное задание

Определите влажность воздуха в комнатах квартиры, используя два комнатных термометра. Сравните результаты.

Творческое задание

Подготовьте сообщение на тему: «Современные гигрометры».

§ 26. Свойства поверхностного слоя жидкости.

Смачивание, капиллярные явления

Ожидаемый результат

Прочитав параграф, вы сможете:

- определять коэффициент поверхностного натяжения жидкости различными способами.

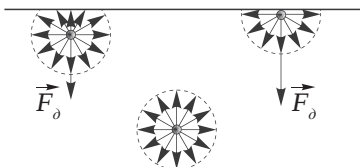


Рис. 134. Сила молекулярного давления – результирующая сила

Интересно знать!

Для уменьшения объема жидкости необходимо создать внешнее давление, сравнимое с молекулярным. Для воды это давление, порядка 2400 атм. Такое давление невозможно создать технически, жидкости в земных условиях несжимаемы. На максимальной глубине Тихого океана гидростатическое давление составляет около 1100 атм. Предельная глубина, на которую могут спуститься подводные лодки, не превышает 600 м.



Ответьте на вопросы

1. Почему жидкости практически несжимаемы?
2. Почему мокрые волосы слипаются, если человек всплывает на поверхность воды, и легко отделяются друг от друга под водой?
3. Почему шарик из мокрого песка рассыпается под водой?

I. Свойства поверхностного слоя.

Силы молекулярного давления

Каждая молекула жидкости взаимодействует с другими молекулами в пределах радиуса сферы молекулярного взаимодействия, который составляет порядка 1 нм. Геометрическая сумма сил, действующих на молекулы в глубине жидкости, равна нулю (рис. 134). У молекул, находящихся на поверхности жидкости, сфера молекулярного взаимодействия частично заполнена молекулами воздуха, силами взаимодействия которых можно пренебречь. Результирующую сил взаимодействия молекул поверхностного слоя жидкости называют *силой молекулярного давления*.

Сила молекулярного давления – это результирующая сил, действующих на молекулы поверхностного слоя жидкости, направленная перпендикулярно ее свободной поверхности.

Сила давления поверхностного слоя действует только на молекулы самой жидкости.

II. Силы поверхностного натяжения

Составляющие сил молекулярного взаимодействия, параллельные свободной поверхности жидкости, стремятся сблизить молекулы поверхностного слоя. В результате действия этих сил поверхностный слой оказывается в состоянии натяжения. На границе жидкости и твердого тела силы поверхностного натяжения действуют на твердое тело перпендикулярно его поверхности (рис. 135). Действие сил поверхностного натяжения можно наблюдать на простых опытах. Опустим в мыльный раствор проволочное кольцо, к сторонам которого без натяжения подвязана нить. Внутри кольца образуется мыльная пленка, в которой нить расположится произвольно (рис. 135, а). Силы поверхностного натяжения, действующие с обеих сторон нити, компенсируют друг друга. Проколем пленку по одну сторону нити. Под действием сил поверхностного натяжения оставшаяся пленка сокращается и, натягивая нить, придает ей форму дуги окружности (рис. 135, б). Повторим опыт, подвязав к рамке петлю из нити (рис. 135, в).

Проколем пленку внутри петли, в результате мыльная пленка, сокращаясь под действием сил поверхностного натяжения, растянёт петлю, придав ей форму кольца (рис. 135, з).

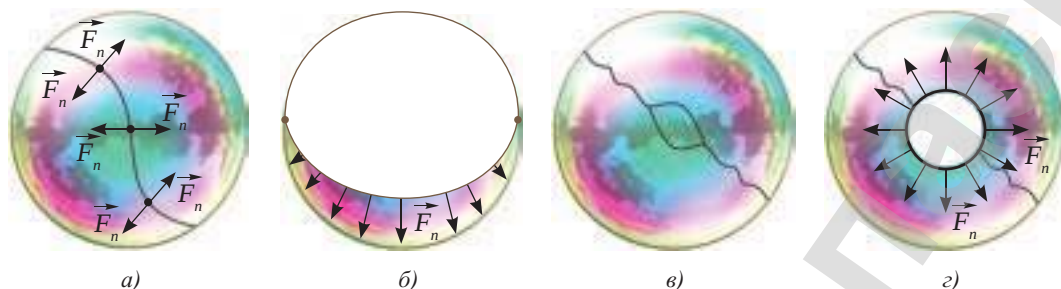


Рис. 135. Наблюдение действия силы поверхностного натяжения

Силы поверхностного натяжения – это силы взаимного притяжения молекул поверхностного слоя жидкости, направленные по касательной к поверхности и стремящиеся уменьшить ее площадь.



Эксперимент

Проведите опыт с проволочным кольцом (рис. 135).



Ответьте на вопросы

Почему границей двух сред в проведенном опыте становится дуга окружности или окружность? При каком условии это возможно?

III. Коэффициент поверхностного натяжения. Определение коэффициента поверхностного натяжения методом отрыва капли

Для количественной характеристики явления поверхностного натяжения введен коэффициент поверхностного натяжения.

Коэффициент поверхностного натяжения – это отношение силы поверхностного натяжения к длине границы поверхностного слоя жидкости.

Коэффициент поверхностного натяжения обозначают буквой σ (сигма). По определению:

$$\sigma = \frac{F_n}{l}, \quad (1)$$

где l – длина поверхностного слоя, F_n – сила поверхностного натяжения.

Для капли жидкости, отрывающейся от трубки малого диаметра, границей поверхностного слоя является длина окружности, радиус которой равен внутреннему радиусу трубки (рис. 136, а):

$$l = 2\pi r = \pi d. \quad (2)$$

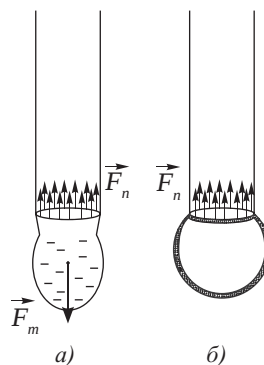


Рис. 136. Границей поверхностного слоя является длина внутренней окружности трубки

Капля отрывается в момент, когда вес капли становится равным силе натяжения:

$$P = F_n. \quad (3)$$

Из формул (1), (2), (3) следует, что $\sigma = \frac{mg}{\pi d}$. (4)

В случае выдувания из трубки мыльного пузыря образуются две поверхностные пленки (рис. 136, б), следовательно, мыльный пузырь отрывается от трубки в момент, когда внешняя сила становится равной силе поверхностного натяжения, созданного по двум границам поверхностного слоя:

$$F_{\text{внеш}} = 2F_n. \quad (5)$$

Коэффициент поверхностного натяжения зависит от рода жидкости, ее температуры и наличия в ней примесей. При повышении температуры и при наличии примесей коэффициент поверхностного натяжения уменьшается.

IV. Энергия поверхностного слоя жидкости

Переход молекул из нижних слоев в поверхностный слой связан с совершением работы по преодолению сил молекулярного давления. При совершении работы кинетическая энергия молекул превращается в потенциальную энергию молекул поверхностного слоя. За счет энергии поверхностного слоя при уменьшении ее площади совершается работа.

Опустим изогнутую проволоку с подвижной перемычкой в мыльный раствор. На рамке образуется пленка с двумя поверхностями. Под действием сил поверхностного натяжения пленка сокращается, потенциальная энергия пленки уменьшается, совершается работа по перемещению подвижной перемычки (рис. 137). Работа сил поверхностного натяжения равна:

$$A = 2F_n h \quad (6), \quad \text{где} \quad F_n = \sigma L. \quad (7)$$

Подставим уравнение (7) в (6), получим:

$$A = 2\sigma Lh, \quad (8)$$

где $\Delta S_1 = Lh$ – изменение площади одного слоя. Обозначим изменение площади двух поверхностей $\Delta S = 2\Delta S_1$. Формула (8) с учетом последней, примет вид:

$$A = \sigma \Delta S, \quad (9) \quad \text{откуда} \quad \sigma = \frac{A}{\Delta S}. \quad (10)$$



Эксперимент

Проведите опыт, изображенный на рисунке 136. Выясните, как влияют на качество опыта температура раствора и его концентрация.

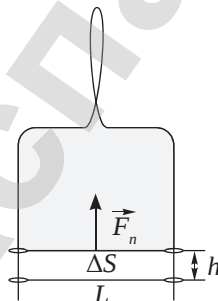


Рис. 137. Сокращение площади пленки под действием силы поверхностного натяжения



Запомните!

Единица измерения коэффициента поверхностного натяжения:

$$[\sigma] = 1 \frac{\text{Дж}}{\text{м}^2} = 1 \frac{\text{Н}}{\text{м}}.$$

Коэффициент поверхностного натяжения – это величина, равная работе молекулярных сил при уменьшении свободной поверхности жидкости на единицу площади.

V. Смачивание. Краевой угол

Молекулы жидкости, находящиеся на границе с твердым телом, взаимодействуют как с молекулами жидкости, так и с частицами твердого тела. Если силы притяжения со стороны частиц твердого тела больше сил притяжения между молекулами самой жидкости, то жидкость смачивает тело. Свободная поверхность жидкости искривляется и принимает вогнутую форму (рис. 138, а).

Если жидкость не смачивает твердое тело, то свободная поверхность жидкости принимает выпуклую форму (рис. 138, б). Искривленную свободную поверхность жидкости называют мениском.

Угол между поверхностью твердого тела и касательной к мениску в точке его пересечения с твердым телом называют краевым углом θ .

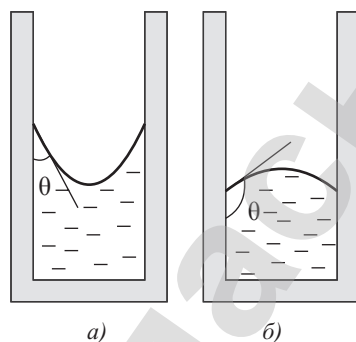


Рис. 138. Свободная поверхность жидкости в капиллярах искривляется

VI. Капиллярные явления

Взаимодействие жидкости со смачиваемыми и не смачиваемыми поверхностями твердых тел является причиной капиллярных явлений.

Капилляры – это трубки с очень малым внутренним диаметром.

В переводе с латыни «капиллус» – «волос». Уровень жидкости в капиллярной трубке поднимается в сравнении с уровнем жидкости в сосуде, если она смачивает стенки трубки. Подъем жидкости происходит до тех пор, пока сила тяжести, действующая на столб жидкости в капилляре, не станет равной силе поверхностного натяжения:

$$F_T = F_n, \quad (11) \text{ где } F_T = mg = \rho Shg = \rho \cdot \pi r^2 hg, \quad (12)$$

$$F_n = \sigma l = \sigma 2\pi r. \quad (13)$$

Подставив формулы (12) и (13) в (11), получим:

$$\rho \pi r^2 hg = \sigma 2\pi r, \text{ откуда:}$$

$$h = \frac{2\sigma}{\rho g r} \quad (14) \quad \text{или} \quad h = \frac{4\sigma}{\rho g d}. \quad (15)$$



Задание

Приведите примеры практического использования смачивания и капиллярных явлений.



Эксперимент

Убедитесь в том, что:

- 1) свободная поверхность воды в стеклянном капилляре становится вогнутой;
- 2) в трубке с меньшим диаметром искривление поверхности значительнее. Объясните наблюдаемые явления на основе МКТ.



Ответьте на вопросы

1. Почему в капиллярных трубках, опущенных в сосуд с жидкостью, уровень свободной поверхности выше или ниже уровня в сосуде?
2. Почему при строительстве дома фундамент изолируют от стен специальными прокладками, не содержащими капилляры?

Контрольные вопросы

1. Какие силы называют силами молекулярного давления?
2. Какие силы называют силами поверхностного натяжения?
3. Как направлены силы поверхностного натяжения на границе жидкости и твердого тела?
4. Какую величину называют коэффициентом поверхностного натяжения? В каких единицах его измеряют?
5. Какое явление называют смачиванием? Какое – капиллярным?



Упражнение

26

1. Спичка длиной $l = 4$ см плавает на поверхности воды. Если по одну сторону от спички налить касторовое масло, то она придет в движение. Определите силу, действующую на спичку, и ее направление. Коэффициенты поверхностного натяжения воды и масла $\sigma_1 = 72$ мН/м и $\sigma_2 = 33$ мН/м соответственно.
2. Чему равен коэффициент поверхностного натяжения воды, если с помощью пипетки, имеющей кончик диаметром $d = 0,4$ мм, можно дозировать воду с точностью до $m = 0,01$ г.
3. Какую работу нужно совершить, чтобы выдуть мыльный пузырь радиусом $R = 4$ см?
4. Определите разность уровней ртути в двух сообщающихся капиллярах с диаметром каналов $d = 1$ мм и $d = 2$ мм.
5. В двух капиллярных трубках разного диаметра, опущенных в воду, установилась разность уровней $\Delta h_1 = 2,6$ см. При опускании этих же трубок в спирт разность уровней оказалась $\Delta h = 1$ см. Определите коэффициент поверхностного натяжения спирта, если коэффициент поверхностного натяжения воды $\sigma = 7,3 \cdot 10^{-2}$ Н/м.

Экспериментальное задание

Опытным путем выясните, при каком соотношении жидкого мыла и воды мыльные пузыри имеют наиболее прочные стенки. С помощью капиллярной трубки определите коэффициент поверхностного натяжения полученного раствора.

Творческое задание

Подготовьте сообщение по темам (на выбор):

1. «Как моющие средства удаляют пятна и грязь?»
2. «Использование капилляров в легкой и тяжелой промышленности».
3. «Капиллярные явления в природе».

§ 27. Кристаллические и аморфные тела.

Механические свойства твердых тел

Ожидаемый результат

Прочитав параграф, вы сможете:

- различать структуры кристаллических и аморфных тел на примере различных твердых тел;
- определять модуль Юнга при упругой деформации.



Рис. 139. Монокристаллы горного хрусталя и дымчатого кварца

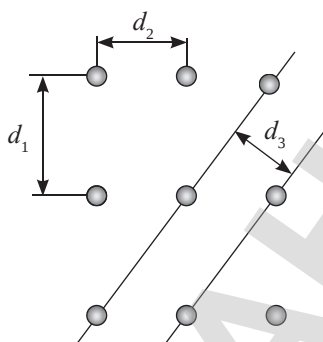


Рис. 140. Монокристаллы анизотропны



Ответьте на вопросы

1. Почему у аморфных тел нет определенной температуры плавления?
2. В чем различие четырех типов решеток: ионной, атомной, молекулярной и металлической?

I. Кристаллические и аморфные тела.

Изотропность и анизотропность твердых тел

В физике все предметы делят на кристаллические и аморфные тела. Кристаллические тела могут быть монокристаллическими и поликристаллическими.

Аморфные тела отличаются от кристаллических тем, что у них нет определенной температуры плавления. В физике аморфные тела рассматривают как вязкую жидкость. К аморфным телам можно отнести воск, пластилин, янтарь, стекло, затвердевшую смолу. У аморфных тел нет кристаллической решетки, они изотропны.

Изотропность – это независимость физических свойств вещества от выбранного в нем направления.

Кристаллические тела, представляющие собой монокристалл, анизотропны.

Анизотропность – это зависимость физических свойств вещества от выбранного в них направления.

В естественных условиях крупные монокристаллы с геометрически правильными формами образуют, к примеру, кварц (рис. 139), топаз, алмаз, горный хрусталь, графит.

Анизотропию механических, тепловых, электрических и оптических свойств кристаллов легко объяснить тем, что сила взаимодействия между частицами вещества зависит от выбора направления в кристаллической решетке. Расстояние между ними в различных направлениях отличается $d_1 > d_2 > d_3$ (рис. 140).

Поликристаллическое тело представляет собой совокупность сросшихся друг с другом хаотически ориентированных монокристаллов, размер которых колеблется от 1–2 мкм до нескольких мм (рис. 141). В целом поликристаллическое тело изотропно. Примерами поликристаллических тел являются металлы, поликристаллические алмазы, керамика.

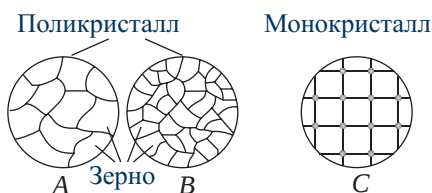


Рис. 141. Структура поликристалла

II. Кристаллическая решетка. Дефекты в кристаллах

Для наглядного представления внутренней структуры кристалла его изображают в виде кристаллической решетки.

Кристаллическая решетка – это пространственное периодическое расположение атомов или ионов в кристалле. Точки кристаллической решетки, в которых расположены атомы или ионы, называются узлами кристаллической решетки.

Картину расположения узлов в кристаллической решетке можно получить с помощью ионного микроскопа.

Все кристаллические решетки разделяют на четыре типа: ионные, атомные, молекулярные и металлические.

III. Прочность и твердость кристаллических тел

Способность тела противостоять разрушению под действием внешних сил называют прочностью. Прочность кристаллов, в которых обнаруживают дефекты, в десятки и даже в сотни раз уступает прочности чистых кристаллов. Различают точечные и линейные дефекты. К точечным дефектам относят замещение собственного атома чужеродным (рис. 142, а), внедрение атома в пространство между узлами решетки (рис. 142, б), отсутствие атома в одном из узлов кристаллической решетки (рис. 142, в). Линейные дефекты возникают при нарушении порядка расположения атомов в плоскости кристалла (рис. 142, г).

В технике все материалы кроме прочности различают по твердости. **Твердость – это свойство материала разрушать поверхность других материалов.** Материал, который царапает поверхность другого материала, является более твердым. Резцы и сверла для резки металла должны обладать большей твердостью, чем обрабатываемый металл.

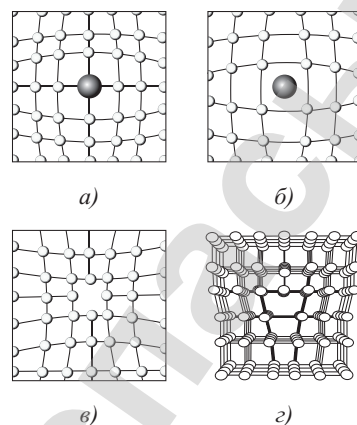


Рис. 142. Виды дефектов

Интересно знать!

Для повышения прочности кристалла в них создают специальные дефекты, которые, напротив, увеличивают прочность кристалла. Они препятствуют разрыву связей по линии случайных дефектов. Например, прочность стали повышается примерно в три раза при введении в нее хрома, вольфрама.

Эксперимент

Сравните твердость алюминия, стали, стекла.

Вспомните!

Деформация, которая полностью исчезает после прекращения действия внешних сил, называется упругой деформацией. Деформация, которая не исчезает после прекращения действия внешних сил, называется пластической.

IV. Упругая и пластическая деформация тел

Свойство материала восстанавливать свою форму называют *упругостью материала*. Упругими свойствами обладают все кристаллические тела, резина.

Свойство сохранять приобретенную под действием внешних сил форму называют *пластичностью*. Аморфные тела, как правило, обладают пластичными свойствами.

V. Абсолютное и относительное удлинение. Механическое напряжение

Деформацию сжатия и растяжения характеризуют абсолютным удлинением Δl . *Абсолютное удлинение – величина, равная разности длин образца до деформации l_0 и после нее l :*

$$\Delta l = l - l_0. \quad (1)$$

При растяжении Δl – положительно, при сжатии – отрицательно.

Отношение абсолютного удлинения к длине тела до деформации l_0 называют относительным удлинением:

$$\varepsilon = \frac{\Delta l}{l_0}. \quad (2)$$

При деформации тела в каждом его сечении в результате изменения расстояния между молекулами действуют электромагнитные силы, которые называют силами упругости или силами внутреннего напряжения. Распределение сил характеризует механическое напряжение.

Механическое напряжение – это физическая величина, равная силе внутреннего напряжения $F_{\text{упр}}$, действующей на единицу площади поперечного сечения S .

$$\sigma = \frac{F_{\text{упр}}}{S}, \quad (3)$$

где σ – механическое напряжение. За единицу механического напряжения в СИ принят паскаль:

$$[\sigma] = 1 \text{ Па} = 1 \frac{\text{Н}}{\text{м}^2}.$$



Задание 1

Приведите примеры пластической и упругой деформации.



Вспомните!

В зависимости от направления и точек приложения внешних сил деформации твердых тел подразделяются на четыре основных вида: растяжение или сжатие, изгиб, сдвиг и кручение.



Задание 2

Укажите направление и точку приложения внешних сил при каждом виде деформации.



Задание 3

Приведите примеры тел, испытывающих различные виды упругой деформации.

VI. Закон Гука. Модуль Юнга

Опытным путем английский физик Р. Гук пришел к следующему выводу:

Механическое напряжение упругого деформированного тела прямо пропорционально модулю упругости и относительному удлинению.

$$\sigma = E \cdot |\varepsilon| \quad (4)$$

или с учетом (2)

$$\sigma = \frac{E |\Delta l|}{l_0}, \quad (5)$$

где E – модуль Юнга.

Единица измерения модуля Юнга $[E]$ – 1 Па.

Подставим в (5) формулу (3) и получим:

$$\frac{F_{\text{упр}}}{S} = \frac{E}{l_0} |\Delta l|,$$

откуда

$$F_{\text{упр}} = \frac{ES}{l_0} |\Delta l| \quad (6)$$

или

$$F_{\text{упр}} = k |\Delta l|, \quad (7)$$

где k – коэффициент жесткости.

Из выражений (6) и (7) следует, что:

$$k = \frac{ES}{l_0}. \quad (8)$$

Коэффициент жесткости зависит от размеров тела и упругих свойств вещества. Чем короче тело и чем больше площадь его поперечного сечения, тем оно жестче.

Таблица 11

Вид соединения		Формула
Параллельное	Разные по жесткости	$k = k_1 + k_2 + \dots + k_n$ <i>n – число пружин</i>
	Одинаковые по жесткости	$k = nk_1$ <i>n – число пружин</i>
Последовательное	Разные по жесткости	$\frac{1}{k} = \frac{1}{k_1} + \frac{1}{k_2} + \dots + \frac{1}{k_n}$
	Две разные пружины	$k = \frac{k_1 k_2}{k_1 + k_2}$
	Одинаковые по жесткости пружины	$k = \frac{k_1}{n}$ <i>n – число пружин</i>

ПРИМЕР РЕШЕНИЯ ЗАДАЧИ

Резиновый шнур длиной l_0 и коэффициентом жесткости k_0 сложили вдвое. Каким стал коэффициент жесткости шнура?

Дано:

$$\frac{l_0}{k_0}$$

$k = ?$

Решение:

$k_0 = \frac{ES}{l_0}$ – коэффициент жесткости шнура сечением S_0 и длиной l_0 .

При сложении шнура вдвое площадь сечения системы увеличивается в 2 раза $S = 2S_0$, а длина уменьшается в 2 раза, $l = l_0/2$. Следовательно,

$$k = \frac{ES}{l} = 4 \frac{ES_0}{l_0} = 4k_0.$$

Ответ: $k = 4k_0$.

Контрольные вопросы

1. В чем отличие аморфных тел от кристаллических?
2. Что называют кристаллической решеткой? Какие виды решеток вам известны?
3. Каким способом увеличивают прочность кристаллов?
4. Что называют механическим напряжением? Модулем Юнга?
5. Охарактеризуйте процессы, происходящие с твердым телом при деформации, по диаграмме растяжений.



Упражнение

27

1. Под действием какой силы, направленной вдоль оси стержня, в нем возникает напряжение $15 \cdot 10^7 \frac{H}{m^2}$? Диаметр стержня 0,40 см.
2. Каково напряжение у основания кирпичной стены высотой 20 м? Одинаковой ли должна быть прочность кирпича у основания стены и в верхней ее части?
3. Какую минимальную нагрузку должна испытать латунная проволока длиной 4,0 м и сечением 20 мм^2 , чтобы появилась остаточная деформация? Каким будет при этом относительное удлинение проволоки? Предел упругости латуни $\sigma_{упр} = 1,1 \cdot 10^8 \frac{H}{m^2}$. Массой проволоки можно пренебречь.
4. Под действием силы в 100 Н проволока длиной 5,0 м и сечением $2,5 \text{ мм}^2$ удлинилась на 1,0 мм. Определите напряжение, испытываемое проволокой, и модуль Юнга.
5. Какое сечение должен иметь медный стержень длиной 5,0 м, чтобы при нагрузке 480 Н он удлинился не более чем на 1,0 мм? Выдержит ли стержень такое напряжение, если предел прочности меди при растяжении $2,2 \cdot 10^8 \text{ Н/м}^2$? Массу стержня не учитывать.

Итоги главы 9

Влажность воздуха	Коэффициент поверхностного натяжения	Высота подъема жидкости в капилляре
Абсолютная влажность $\rho = \frac{m}{V}$ Относительная влажность $\varphi = \frac{\rho}{\rho_H} \cdot 100\%$ $\varphi = \frac{p}{p_H} \cdot 100\%$	$\sigma = \frac{F_n}{l}$ $\sigma = \frac{A}{\Delta S}$	При полном смачивании $h = \frac{2\sigma}{\rho g r}$ $h = \frac{4\sigma}{\rho g d}$
Закон Гука	Удлинение тела, механическое напряжение	Коэффициент жесткости
Закон Гука $F_{упр} = k \Delta l $ $\sigma = E \cdot \varepsilon $	Абсолютное удлинение $\Delta l = l - l_0$ Относительное удлинение $\varepsilon = \frac{\Delta l}{l_0}$ Механическое напряжение $\sigma = \frac{F_{упр}}{S}$	$k = \frac{ES}{l_0}$ Последовательное соединение пружин $\frac{1}{k} = \frac{1}{k_1} + \frac{1}{k_2} + \dots + \frac{1}{k_n}$ $k = \frac{k_1 k_2}{k_1 + k_2}$ Параллельное соединение $k = k_1 + k_2 + \dots + k_n$

Законы

Закон Гука

Механическое напряжение упругого деформированного тела прямо пропорционально модулю упругости и относительному удлинению.

Сила упругости, возникающая в теле при его деформации, прямо пропорциональна величине этой деформации.

Глоссарий

Абсолютная влажность воздуха – количество водяного пара, содержащегося в 1 м³ воздуха.

Абсолютное удлинение – величина, равная разности длин образца до деформации l_0 и после l .

Анизотропность – зависимость физических свойств вещества от выбранного в них направления.

Гигрометр – прибор для определения влажности воздуха.

Деформация тела – изменение размеров и формы тела.

Динамическое равновесие – состояние термодинамической системы, при котором за одно и то же время число молекул, покидающих жидкость, становится равным числу молекул, возвращающихся в нее.

Изотропность – независимость физических свойств вещества от выбранного в нем направления.

Испарение – парообразование, со свободной поверхности жидкости происходящее при любой температуре.

Капилляры – трубки с очень малым внутренним диаметром.

Кипение – процесс парообразования, происходящий в объеме всей жидкости при определенной температуре.

Конденсация – процесс превращения пара в жидкость.

Коэффициент поверхностного натяжения – величина, равная работе молекулярных сил при уменьшении свободной поверхности жидкости на единицу площади.

Коэффициент поверхностного натяжения – отношение силы поверхностного натяжения к длине границы поверхностного слоя жидкости.

Краевой угол – угол между поверхностью твердого тела и касательной к мениску в точке его пересечения с твердым телом.

Кристаллическая решетка – пространственное периодическое расположение атомов или ионов в кристалле.

Критическая температура – температура, при которой различие в значениях плотности жидкости и ее насыщенного пара исчезает.

Мениск – это искривленная свободная поверхность жидкости.

Механическое напряжение – физическая величина, равная силе внутреннего напряжения $F_{\text{упр}}$, действующей на единицу площади поперечного сечения S .

Насыщенный пар – пар, находящийся в состоянии динамического равновесия со своей жидкостью.

Ненасыщенный пар – пар, не находящийся в состоянии динамического равновесия со своей жидкостью.

Относительная влажность воздуха – отношение абсолютной влажности воздуха к количеству пара, которое необходимо для насыщения 1 м^3 воздуха при данной температуре, выраженное в процентах.

Относительная влажность воздуха – отношение давления p водяного пара, содержащегося в воздухе при данной температуре, к давлению насыщенного водяного пара при той же температуре, выраженное в процентах.

Парообразование – процесс перехода вещества из жидкого состояния в газообразное.

Пластическая деформация – деформация, которая не исчезает после прекращения действия внешних сил.

Пластичность – свойство тела сохранять форму, приобретенную под действием внешних сил.

Прочность – способность тела противостоять разрушению под действием внешних сил.

Сила молекулярного давления – результирующая сил, действующих на молекулы поверхностного слоя жидкости, направленная перпендикулярно ее свободной поверхности.

Силы поверхностного натяжения – силы взаимного притяжения молекул поверхностного слоя жидкости, направленные по касательной к поверхности и стремящиеся уменьшить ее площадь.

Сублимация, или возгонка, – переход вещества из твердого состояния в газообразное, минуя жидкое.

Твердость – свойство материала разрушать поверхность других материалов.

Точка росы – температура, при которой водяной пар находящийся в атмосферном воздухе, становится насыщенным.

Тройная точка – значение температуры и давления, при котором вещество может равновесно находиться в трех агрегатных состояниях: твердом, жидком и газообразном.

Упругая деформация – деформация, которая полностью исчезает после прекращения действия внешних сил.

Упругость – свойство материала восстанавливать свою форму после прекращения действия внешних сил.

Основным содержанием раздела «Электричество и магнетизм» является описание свойств электромагнитного поля и его взаимодействия с заряженными телами. В электродинамике рассматривают электрическое и магнитное взаимодействие между заряженными телами. Любые взаимодействия, которые происходят посредством электромагнитных полей, являются предметом электродинамики.

ГЛАВА 10

ЭЛЕКТРОСТАТИКА

Электростатикой называют раздел электродинамики, в котором изучаются взаимодействие неподвижных зарядов. Заряд может принимать как положительные, так и отрицательные значения. Впервые понятие «электрический заряд» было введено в 1785 году в законе Кулона.

Изучив главу, вы сможете:

- применять закон сохранения электрического заряда и закон Кулона при решении задач;
- применять принцип суперпозиции для определения напряженности электрического поля;
- применять теорему Гаусса для определения напряженности электрического поля заряженной бесконечной плоскости, шара, сферы и бесконечной нити;
- рассчитывать потенциал и работу электрического поля точечных зарядов;
- применять формулу, связывающую силовую и энергетическую характеристики электростатического поля, при решении задач;
- сравнивать силовые и энергетические характеристики гравитационного и электростатического полей;
- проводить сравнительный анализ явлений электростатической индукции в проводниках и поляризации в диэлектриках;
- исследовать зависимость емкости конденсатора от его параметров;
- применять формулу последовательного и параллельного соединения конденсаторов при решении задач;
- рассчитывать энергию электрического поля.

§ 28. Электрический заряд. Поверхностная и объемная плотность заряда. Закон сохранения заряда. Закон Кулона

Ожидаемый результат

Прочитав параграф, вы сможете:

- применять закон сохранения электрического заряда и закон Кулона при решении задач.

Вспомните!

Атом нейтрален.
Атом, потерявший часть электронов, становится положительным ионом.
Атом с избыточным количеством электронов называют отрицательным ионом.

Задание

Используя таблицу Менделеева, назовите число электронов, протонов и нейтронов в составе атомов кислорода и алюминия.

Эксперимент

Наэлектризуйте пластмассовую пластину трением. Поднесите ее к мелким кусочкам бумаги. Повторите опыт с металлической пластиной.
Почему в первом случае листочки притягиваются, во втором – нет?
Объясните, как происходит электризация диэлектрика.
Почему проводник невозможно наэлектризовать трением?

I. Электризация тел. Способы электризации тел

При электризации двух тел трением на них появляются заряды, равные по модулю, противоположные по знаку, атомы превращаются в ионы.

Наэлектризовать тело можно *электризацией трением* и *электризацией через влияние*.

Метод электризации трением используют для диэлектриков. В диэлектриках заряд остается там, где он возник, он связан и не может перейти на другие участки наэлектризованного тела.

Наэлектризовать металлы таким методом невозможно. В момент отрыва металлических тел друг от друга все избыточные электроны с одного металлического тела перетекут на другое, оба тела окажутся незаряженными. Наэлектризовать металлические тела очень просто другим способом, который называют *электризацией через влияние*. Приблизим к двум соприкасающимся незаряженным проводникам наэлектризованное тело. Тела при этом должны быть расположены на изолирующих подставках (рис. 143). Легкие лепестки, закрепленные вдоль проводников *A* и *B*, отклоняются только на их концах. Следовательно, накопление избыточных зарядов происходит благодаря смещению электронов под действием электрического поля заряженного тела *K*.

С помощью пробного заряда, который представляет собой положительно заряженное тело малых размеров, легко убедиться, что в точке *a* накопился отрицательный заряд. Поднесем пробный заряд к точке *a*, лепестки притянутся к нему. В точке *b* накопился положительный заряд, лепестки отталкиваются от пробного заряда. Отдалим проводники *A* и *B* друг от друга. Электроны из тела *A* не могут перейти в тело *B* в момент отрыва, так как они притягиваются электрическим полем *K*. После удаления внешнего поля, созданного телом *K*, заряды на телах *A* и *B* распределяются по всей поверхности, о чем свидетельствует отклонение всех лепестков, прикрепленных к телам *A* и *B* (рис. 144).

Процесс зарядки проводника через влияние называют *электрической индукцией*.

Созданный при этом заряд называют *индукционным, или наведенным, зарядом*.

II. Элементарный заряд.

Дискретность заряда

Минимально возможным электрическим зарядом обладает электрон, его называют *элементарным зарядом*. Заряды тел обусловлены избытком или недостатком электронов, следовательно, их заряд кратен *элементарному заряду*. Любая свободная заряженная частица несет лишь целое число элементарных зарядов:

$$q = N|e|.$$

Единица измерения заряда в СИ $|q| = 1$ Кл.

Кулон – это электрический заряд, проходящий через поперечное сечение проводника при силе тока 1 А за время 1 с.

Малое значение заряда электрона $e \approx 1,60 \cdot 10^{-19}$ Кл объясняет, почему не была обнаружена в течение длительного времени дискретность электрического заряда.

Дискретность означает «прерывность», «раздельность», существование в виде отдельных порций.

Дискретность электрического заряда проявляется только в том случае, когда заряды тел малы, сравнимы с элементарным зарядом. Поэтому Р. Милликен в своих экспериментах использовал микроскопические капельки, заряды которых составляли несколько элементарных зарядов.

III. Поверхностная и объемная плотность зарядов

Заряды могут образоваться как на поверхности тела, так и во всем объеме. Распределение зарядов характеризуется *поверхностной или объемной плотностью зарядов*:

$$\sigma = \frac{q}{S},$$

где σ – *поверхностная плотность*, q – заряд тела, S – площадь поверхности заряженного тела.

$$\rho = \frac{q}{V},$$

где ρ – *объемная плотность зарядов*, V – объем.

IV. Закон сохранения заряда

В системе заряженных тел могут образовываться новые заряженные частицы, например, электроны и ионы вследствие явления ионизации атомов или



Ответьте на вопрос

Как убедиться в том, что одноименные заряды отталкиваются друг от друга, а разноименные – притягиваются?

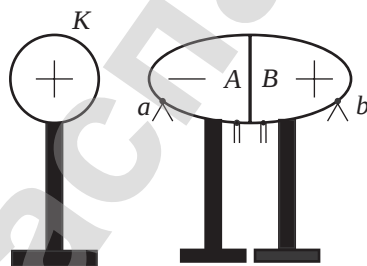


Рис. 143. Электризация через влияние – электрическая индукция

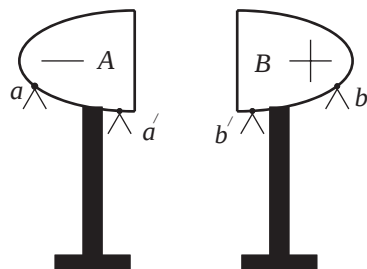


Рис. 144. Заряды на проводниках равны по значению, но противоположны по знаку.



Запомните!

$$[\sigma] = 1 \frac{\text{Кл}}{\text{м}^2}.$$

$$[q] = 1 \text{ Кл}.$$

$$[S] = 1 \text{ м}^2.$$

$$[\rho] = 1 \frac{\text{Кл}}{\text{м}^3}.$$

$$[V] = 1 \text{ м}^3.$$

молекул. В 1843 г. английским физиком Фарадеем был установлен закон сохранения заряда:

Алгебраическая сумма электрических зарядов любой замкнутой системы остается неизменной, какие бы процессы ни происходили внутри этой системы.

$$q_1 + q_2 + q_3 + \dots + q_n = \text{const}.$$

Закон сохранения заряда наряду с законами сохранения энергии и импульса является фундаментальным законом природы. Он применим как для тел макромира, так и микромира.

V. Закон Кулона

Закон взаимодействия двух точечных зарядов был установлен французским физиком Ш. Кулоном в 1785 году.

Точечные заряды – это заряженные тела, размеры которых намного меньше расстояния между ними.

Опытным путем Ш. Кулон установил, что:

Сила взаимодействия двух точечных зарядов направлена вдоль прямой линии, соединяющей заряды, прямо пропорциональна произведению модулей обоих зарядов и обратно пропорциональна квадрату расстояния между ними.

$$F_K = \frac{1}{4\pi\epsilon_0\epsilon} \frac{|q_1||q_2|}{r^2} \quad (1)$$

или

$$F_K = \frac{k|q_1||q_2|}{\epsilon r^2}, \quad (2)$$

где: $|q_1|, |q_2|$ – модули зарядов взаимодействующих тел;
 r – расстояние между точечными зарядами;

k – коэффициент пропорциональности;

ϵ_0 – электрическая постоянная;

ϵ – диэлектрическая проницаемость среды.

Диэлектрическая проницаемость характеризует электрические свойства среды и не имеет единиц измерения.

$$\epsilon = \frac{F_0}{F}.$$

Диэлектрическая проницаемость среды – это физическая величина, которая показывает, во сколько раз силы взаимодействия зарядов в диэлектрике меньше, чем в вакууме.



Ответьте на вопросы

1. Почему лепестки электроскопа, заряженные положительным зарядом, отклоняются сильнее, если к электроскопу приблизить положительно заряженное тело? Опадают, если приблизить отрицательно заряженное тело?
2. Почему заряженное тело, подвешенное на шелковой нити, всегда притягивается к руке экспериментатора независимо от знака избыточного заряда?



Возьмите на заметку

Первые измерения величины заряда электрона провел в 1909–1913 гг. американский физик Р. Милликен. Он наблюдал движение микроскопических капелек масла в электрическом поле. Ему удалось показать, что заряды капелек кратны элементарному заряду, и измерить величину этого заряда, он равен $e \approx 1,60 \cdot 10^{-19}$ Кл.



Запомните!

$$k = 9 \cdot 10^9 \frac{\text{Н} \cdot \text{м}^2}{\text{Кл}^2}.$$

$$\epsilon_0 = 8,85 \cdot 10^{-12} \frac{\text{Кл}^2}{\text{Н} \cdot \text{м}^2}.$$

$$k = \frac{1}{4\pi\epsilon_0}.$$

На рисунке 145 изображены силы взаимодействия двух точечных зарядов, на основании третьего закона Ньютона они равны:

$$\vec{F}_{12} = -\vec{F}_{21}.$$

Кулоновские силы являются *центральными*, они действуют вдоль прямой, соединяющей точечные заряды.

VI. Взаимодействие нескольких зарядов

При взаимодействии нескольких точечных зарядов равнодействующую сил, приложенных к любому из них, определяют как векторную сумму всех сил, действующих на него:

$$\vec{F}_R = \vec{F}_1 + \vec{F}_2 + \dots + \vec{F}_n.$$

Например, равнодействующая сил, действующих на заряд, расположенный в центре квадрата, со стороны зарядов, расположенных в углах квадрата (рис. 146), равна:

$$\vec{F}_5 = \vec{F}_{51} + \vec{F}_{52} + \vec{F}_{53} + \vec{F}_{54}.$$

Числовые значения сил рассчитывают по формуле (1) или (2), так как сила взаимодействия между двумя зарядами не зависит от присутствия других зарядов. Модули равнодействующей силы определяют из треугольников, полученных при векторном сложении сил, или координатным методом:

$$F_R = \sqrt{F_x^2 + F_y^2},$$

где

$$F_x = F_{1x} + F_{2x} + \dots + F_{nx},$$

$$F_y = F_{1y} + F_{2y} + \dots + F_{ny}.$$

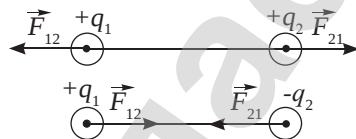


Рис. 145. Кулоновские силы центральные

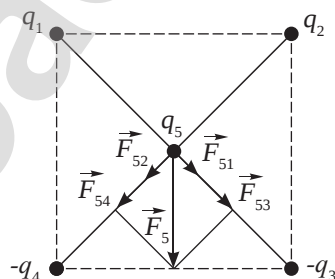


Рис. 146. Равнодействующая сила определяется векторным сложением

ПРИМЕР РЕШЕНИЯ ЗАДАЧИ

В вершинах квадрата находятся одинаковые положительные заряды, равные q . Какой должна быть величина заряда, помещенного в центр квадрата, чтобы вся система зарядов находилась в равновесии? Будет ли это равновесие устойчивым?

Дано:

$$q_1 = q_2 = q_3 = q_4 = q$$

$q_0 = ?$

Решение:

Рассмотрим условие равновесия заряда (см. рис.), находящегося в одной из вершин квадрата, например,

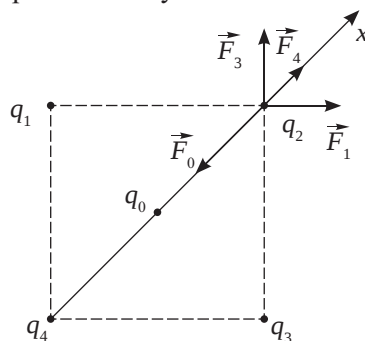
заряда в точке с зарядом q_2 : $\vec{F}_1 + \vec{F}_3 + \vec{F}_4 + \vec{F}_0 = 0$.

Запишем уравнение в проекции на ось x :

$$F_4 + F_1 \cos 45^\circ + F_3 \cos 45^\circ - F_0 = 0.$$

На основании закона Кулона запишем формулы

$$\text{расчета сил: } F_1 = F_3 = k \frac{q^2}{a^2}, \quad F_4 = k \frac{q^2}{2a^2},$$



где a – сторона квадрата.

$$F_0 = k \frac{q|q_0|}{\left(\frac{a}{\sqrt{2}}\right)^2} = k \frac{2q|q_0|}{a^2}, \text{ система может сохранять равновесие, если заряд } q_0 -$$

отрицательный, тогда: $k \frac{q^2}{2a^2} + k \frac{q^2}{a^2} \sqrt{2} - k \frac{2q|q_0|}{a^2} = 0 \Rightarrow |q_0| = \frac{q(1+2\sqrt{2})}{4}$.

Равновесие неустойчивое, так как при отклонении любого из зарядов от положения равновесия они не вернутся в исходное состояние.

Ответ: $q_0 = -\frac{q(1+2\sqrt{2})}{4}$.

Контрольные вопросы

1. Какое явление называют электризацией?
2. Каким методом электризуют диэлектрики? Проводники?
3. Сформулируйте закон сохранения заряда, закон Кулона.
4. Какой заряд называют точечным?



Упражнение

28

1. С какой силой взаимодействуют два точечных заряда 10 нКл и 15 нКл, находящиеся на расстоянии 5 см друг от друга?
2. Два одинаковых точечных заряда, находясь друг от друга на расстоянии 5 см, взаимодействуют силой 0,4 мН. Чему равен каждый из этих зарядов?
3. Два одинаковых шарика, заряженные один положительным зарядом 15 мКл, другой отрицательным –25 мКл, приводят в соприкосновение и вновь раздвигают на расстояние 10 см. Определите заряд каждого шарика и силу их взаимодействия после соприкосновения.
4. На нити висит заряженный шарик массой 20 г. Какой заряд q_2 нужно поместить на расстояние 5 см от шарика, чтобы вес шарика уменьшился в 2 раза? Заряд шарика 10^{-6} Кл.
5. Два маленьких шарика одинаковой массы, каждому из которых сообщили заряд $9 \cdot 10^{-7}$ Кл, подвешены на нитях длиной 1 м. Угол, на который они разошлись, равен 60° . Определите массы шариков.

Творческое задание

Подготовьте сообщение по темам (на выбор):

1. «Опыты Иоффе и Милликена».
2. «Использование электризации в технике».

§ 29. Электрическое поле. Однородное и неоднородное электрическое поле. Напряженность электрического поля. Принцип суперпозиции электростатических полей

Ожидаемый результат

Прочитав параграф, вы сможете:

- применять принцип суперпозиции для определения напряженности электрического поля.

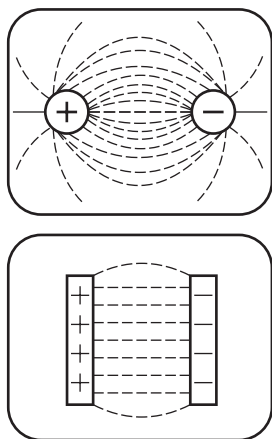


Рис. 147. Расположение волосинок, взвешенных в масле, вокруг заряженных тел

I. Электрическое поле

Пространство вокруг заряженных тел приобретает новое свойство: внесенные в него легкие или заряженные тела испытывают силу отталкивания или притяжения. Под действием силы тела перемещаются и располагаются в пространстве в строго определенном порядке (рис. 147).

Пространство вокруг заряженных тел называют *электрическим полем*. Понятие электрического поля впервые ввел английский физик Фарадей. Он был сторонником теории близкого действия во взаимодействии зарядов. Фарадей утверждал, что заряды отталкиваются или притягиваются посредством электрического поля.

Электрическое поле – это особый вид материи, посредством которого происходит взаимодействие заряженных тел.

Электрическое поле неподвижных и не меняющихся со временем зарядов называют *электростатическим полем*.

Сторонники теории дальнего действия были убеждены, что заряды взаимодействуют непосредственно друг с другом на любом расстоянии.

II. Напряженность электрического поля. Напряженность точечного заряда

Напряженность – это силовая характеристика электрического поля.

Напряженность электрического поля – это физическая величина, равная отношению силы, с которой поле действует на положительный пробный заряд, помещенный в данную точку пространства, к величине этого заряда.



Ответьте на вопрос

В чем принципиальное отличие теории дальнего действия и теории близкого действия в изучении взаимодействия заряженных тел?



Эксперимент

Используя пробный заряд, исследуйте электрическое поле металлического заряженного шара. Выясните, какой заряд был передан шару? Как изменяется электрическое поле при удалении от шара?

$$\vec{E} = \frac{\vec{F}}{q}. \quad (1)$$

Определим из формулы (1) силу, действующую на заряд, внесенный в поле точечного заряда q :

$$F = qE. \quad (2)$$

На основании закона Кулона сила взаимодействия между точечными зарядами Q и q равна:

$$F = \frac{k|Q||q|}{r^2}. \quad (3)$$

Из (2) и (3) следует, что:

$$E = \frac{kQ}{r^2}. \quad (4)$$

Нами получена формула для расчета напряженности поля точечного заряда. Напряженность в заданной точке пространства определяется зарядом тела Q , создавшего поле. Она не зависит от заряда q , внесенного в него. Напряженность является функцией расстояния: чем дальше расположена точка пространства от источника поля, тем модуль напряженности меньше (рис. 148). Единица измерения напряженности согласно формуле (1):

$$[E] = 1 \frac{\text{Н}}{\text{Кл}}.$$

III. Направление вектора напряженности и силовые линии

Напряженность электрического поля является векторной величиной. *Направление вектора напряженности в каждой точке пространства совпадает с направлением силы, действующей на положительный пробный заряд.*

Если поле создано положительным зарядом, то напряженность поля в любой точке пространства будет направлена от заряда вдоль радиальной прямой (рис. 149, а). В поле отрицательного заряда вектор напряженности направлен вдоль радиальной прямой к заряду (рис. 149, б). Радиальные прямые – это линии действия сил, следовательно, они являются силовыми линиями электрического поля (рис. 150). Впервые понятие «силовые линии» ввел Фарадей. Изображение поля стало наглядным и удобным. Силовые линии полей между двумя точечными зарядами противоположного знака и между двумя разноименно заряженными пластинами изображены на рисунке 151.

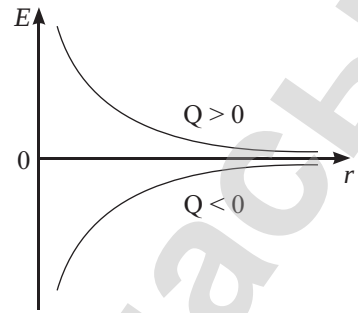


Рис. 148. График зависимости напряженности электрического поля от расстояния

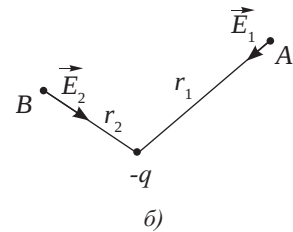
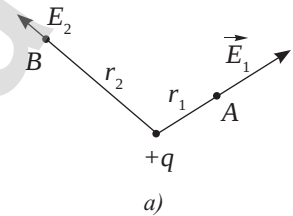


Рис. 149. Вектора напряженности полей точечных зарядов направлены вдоль радиальных прямых

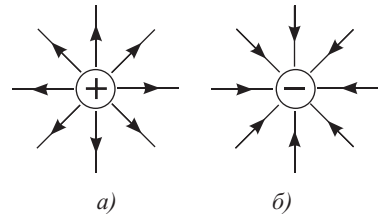


Рис. 150. Силовые линии полей положительного и отрицательного точечных зарядов

Силовые линии электрического поля – это линии, касательные к которым в каждой точке совпадают с направлением векторов напряженности в этих точках.

Картинны силовых линий показывают, что:

- 1) линии электрического поля не пересекаются, так как в любой точке пространства напряженность не может иметь несколько направлений;
- 2) линии электрического поля непрерывны, они исходят из положительного заряда и сходятся на отрицательном.

IV. Силовые линии однородного и неоднородного поля

Сравним картины силовых линий электрического поля на рисунках 150, 151. Силовые линии поля, созданного двумя пластинами, представляют собой равноудаленные параллельные линии, их плотность не меняется. Такое поле принято называть *однородным*. Для однородного поля во всех его точках вектор напряженности постоянный:

$$\vec{E} = \text{const}.$$

Для неоднородного поля, созданного точечными зарядами, плотность силовых линий около зарядов больше, вдали от зарядов меньше, что свидетельствует об изменении напряженности поля. Чем плотнее силовые линии, тем больше напряженность поля.

V. Принцип суперпозиции полей

При взаимодействии нескольких зарядов происходит наложение полей, в этом заключается принцип суперпозиции.

Напряженность электрического поля, созданного системой зарядов в данной точке пространства, равна векторной сумме напряженностей электрических полей каждого заряда в отдельности.

$$\vec{E} = \vec{E}_1 + \vec{E}_2 + \dots + \vec{E}_n.$$

Определим напряженность поля, созданного двумя точечными зарядами в точке A (рис. 152):

$$\vec{E} = \vec{E}_1 + \vec{E}_2.$$

Модуль вектора напряженности рассчитаем по теореме Пифагора (рис. 152, а):

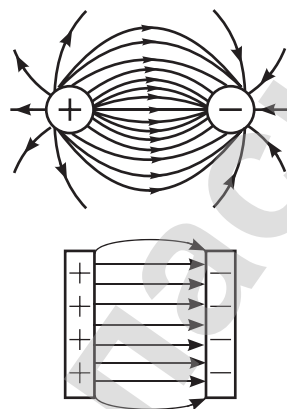


Рис. 151. Силовые линии полей между точечными разноименными зарядами и разноименными пластинами

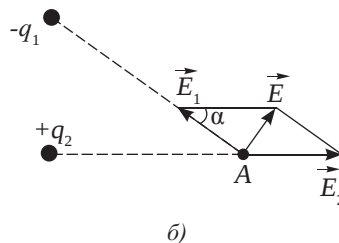
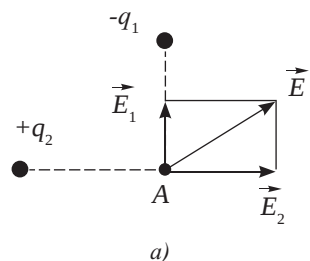


Рис. 152. Напряженность поля, созданного несколькими зарядами, равна геометрической сумме напряженностей

$$E = \sqrt{E_1^2 + E_2^2}$$

или по теореме косинусов (рис. 152, б):

$$E = \sqrt{E_1^2 + E_2^2 - 2E_1E_2 \cos \alpha}.$$

При большом количестве зарядов вектора складываются поочередно или с использованием координатного метода (рис. 153). Совместив начало координат с указанной точкой, определяют сумму проекций векторов напряженностей на выбранные оси:

$$E_x = E_{1x} + E_{2x} + E_{3x},$$

$$E_y = E_{1y} + E_{2y} + E_{3y},$$

тогда модуль суммы всех векторов равен:

$$E = \sqrt{E_x^2 + E_y^2}.$$

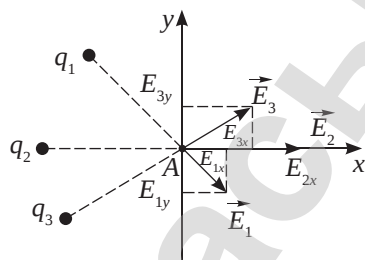


Рис. 153. Координатный метод определения напряженности поля нескольких зарядов



Ответьте на вопросы

1. Почему силовые линии электрического поля не пересекаются?
2. Почему легкие незаряженные тела, внесенные в электрическое поле, притягиваются заряженным телом, создавшим это поле?
3. Почему изменение положения точечного заряда, внесенного в однородное поле, не влияет на значение действующей на него силы?

ПРИМЕР РЕШЕНИЯ ЗАДАЧИ

Диагонали ромба $d_1 = 96$ см и $d_2 = 32$ см. На концах длинной диагонали расположены точечные заряды $q_1 = 64$ нКл и $q_2 = 352$ нКл, на концах короткой – точечные заряды: $q_3 = 8$ нКл, $q_4 = 40$ нКл. Определите модуль и направление напряженности электрического поля в центре ромба относительно короткой диагонали.

Дано:

$$d_1 = 96 \text{ см}$$

$$d_2 = 32 \text{ см}$$

$$q_1 = 64 \text{ нКл}$$

$$q_2 = 352 \text{ нКл}$$

$$q_3 = 8 \text{ нКл}$$

$$q_4 = 40 \text{ нКл}$$

$$E - ? \quad \alpha - ?$$

Решение:

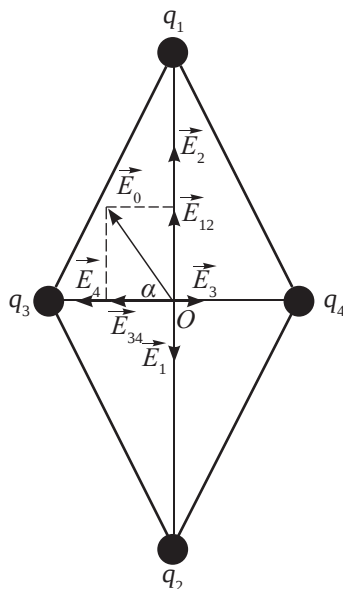
Изобразим вектора напряженности, созданные зарядами q_1, q_2, q_3, q_4 полей в центре ромба (см. рис). Модули напряженности электрических полей равны: $E_1 = \frac{4kq_1}{d_1^2}$,

$$E_2 = \frac{4kq_2}{d_1^2},$$

$$E_3 = \frac{4kq_3}{d_2^2},$$

$$E_4 = \frac{4kq_4}{d_2^2}.$$

На основании принципа суперпозиции запишем: $\vec{E} = \vec{E}_1 + \vec{E}_2 + \vec{E}_3 + \vec{E}_4$.



Просуммировав силы попарно, определим напряженность поля в центре ромба по теореме Пифагора:

$$E = \sqrt{(E_2 - E_1)^2 + (E_4 - E_3)^2} = \\ = \left(\frac{4k}{d_1^2 d_2^2} \right) \sqrt{(q_2 - q_1)^2 d_2^4 + (q_4 - q_3)^2 d_1^4} = 15,9 \text{ кВ/м}$$

Угол α между направлением этой напряженности и короткой диагональю ромба определяется выражением

$$\operatorname{tg} \alpha = \frac{E_2 - E_1}{E_4 - E_3} = \frac{(q_2 - q_1) d_2^2}{(q_4 - q_3)^2 d_1^2} = 1, \text{ т.е. } \alpha = 45^\circ.$$

Ответ: $E = 15,9 \text{ кВ/м}$; $\alpha = 45^\circ$.

Контрольные вопросы

1. Что называют электрическим полем?
2. Что такое напряженность электрического поля? Как она определяется? Куда направлена?
3. В чем заключается принцип суперпозиции полей?
4. Какое поле называют однородным? Какое – неоднородным?



Упражнение

29

1. С каким ускорением движется электрон в поле с напряженностью 10 В/м ?
2. Заряды по $0,1 \text{ мкКл}$ расположены на расстоянии 6 см друг от друга. Определите напряженность поля в точке, удаленной на 5 см от каждого из зарядов. Решить эту задачу для случаев: а) оба заряда положительные; б) один заряд положительный, другой – отрицательный.
3. Заряженный металлический шарик, подвешенный на шелковой нити, внесли в однородное электрическое поле. Нить отклонилась от вертикали на угол 45° . Как изменится угол отклонения нити при стекании с шарика $0,1$ доли его заряда? Линии напряженности поля направлены горизонтально.
4. Определите напряженность электрического поля в точке, удаленной от точечного заряда на 2 м , если на расстоянии, равном 20 см от него, напряженность поля равна $4 \cdot 10^{-4} \text{ В/м}$. Определите также заряд, создающий поле.
5. Три заряда $q_1 = q_2 = 4 \cdot 10^{-8} \text{ Кл}$ и $q_3 = -8 \cdot 10^{-8} \text{ Кл}$ поместили в вершинах треугольника со стороной $a = 30 \text{ см}$. Определите напряженность поля в центре треугольника.

§ 30. Поток вектора напряженности электрического поля. Теорема Гаусса

Ожидаемый результат

Прочитав параграф, вы сможете:

- применять теорему Гаусса для определения напряженности электрического поля заряженной бесконечной плоскости, шара, сферы и бесконечной нити.



Возьмите на заметку

Для определения потока вектора напряженности в случаях, когда поверхность не плоская или поле неоднородное, поверхность разбивается на небольшие участки, которые можно считать плоскими, а поле в пределах каждого из них – однородным.

Затем находят элементарные потоки вектора напряженности Φ_i через малые площадки S_i .

Полный поток через поверхность равен алгебраической сумме элементарных потоков через все ее участки (формула 2).

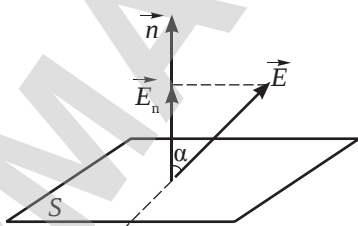


Рис. 154. Нормальная составляющая зависит от угла между направлением линий напряженности и нормалью

I. Поток вектора напряженности электрического поля

Пусть плоская поверхность площадью S находится в однородном электрическом поле напряженностью $\vec{E}$ (рис. 154). Вектор $\vec{n}$ – нормаль к поверхности, угол между направлением линий напряженности и нормалью равен α .

Поток вектора напряженности равен произведению нормальной составляющей вектора напряженности на площадь поверхности:

$$\Phi_E = E_n S = ES \cos \alpha, \quad (1)$$

где Φ_E – поток вектора напряженности.

Для неоднородного поля поток напряженности определяют по формуле:

$$\Phi_E = \sum_{i=1}^n \Phi_{Ei} = \sum_{i=1}^n E_i S_i \cos \alpha_i. \quad (2)$$

II. Поток напряженности поля точечного заряда

Определим поток напряженности поля точечного заряда через сферическую поверхность S_1 по рисунку 155, используя формулу (2).

Вектор напряженности поля точечного заряда направлен вдоль радиуса, следовательно, он перпендикулярен сферической поверхности и образует с ее внешней нормалью угол $\alpha = 0$, $\cos \alpha = 1$. Напряженность поля точечного заряда в каждой точке сферы

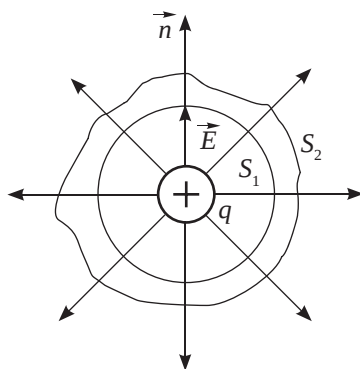


Рис. 155. Поток напряженности через поверхности S_1 и S_2 одинаковый

будет иметь одно и то же значение, которое определяется формулой

$$E = \frac{q}{4\pi\epsilon\epsilon_0 r^2},$$

где r – радиус сферы. Полный поток напряженности Φ_E через площадь сферы $S = 4\pi r^2$ будет равен:

$$\Phi_E = \sum_{i=1}^n \Phi_{Ei} = E \sum_{i=1}^n S_i = \frac{q}{4\pi\epsilon\epsilon_0 r^2} \cdot 4\pi r^2 = \frac{q}{\epsilon\epsilon_0},$$

$$\Phi_E = \frac{q}{\epsilon\epsilon_0}. \quad (3)$$

Из полученного выражения следует, что *поток напряженности не зависит от площади замкнутой поверхности. Он определяется зарядом, расположенным внутри нее, и диэлектрической проницаемостью среды.* Следовательно, поток напряженности через произвольную поверхность S_2 (рис. 155) будет иметь то же значение, что и поток через сферическую поверхность S_1 .

При увеличении радиуса сферы плотность силовых линий и напряженность электрического поля уменьшаются.

Поток напряженности заряда, находящегося за пределами замкнутой поверхности, равен нулю, поскольку, пронизывая поверхность дважды, он имеет противоположные знаки.

III. Теорема Гаусса

Если внутри замкнутой поверхности расположен не один, а несколько точечных зарядов, или он распределен по некоторой поверхности или объему, то полученное выражение (3) на основе принципа суперпозиции полей примет вид:

$$\Phi_E = \frac{\sum_{i=1}^n q_i}{\epsilon\epsilon_0}. \quad (4)$$

Поток напряженности не зависит ни от формы поверхности, ни от расположения зарядов внутри нее. Он определяется суммой всех зарядов $q = \sum_{i=1}^n q_i$ внутри замкнутой поверхности.

Полученные соотношения были установлены немецким математиком Карлом Фридрихом Гауссом и получили название *теоремы Гаусса*:

Поток напряженности через замкнутую поверхность произвольной формы численно равен алгебраической сумме свободных электрических зарядов, заключенных внутри этой поверхности, поделенной на $\epsilon\epsilon_0$.



Задание 1

1. Определите поток напряженности через сферическую поверхность, охватывающую три шара с зарядами, находящихся в воздушном пространстве:
 $q_1 = -2 \cdot 10^{-5}$ Кл,
 $q_2 = 4 \cdot 10^{-5}$ Кл,
 $q_3 = 4 \cdot 10^{-5}$ Кл.
2. Как изменится поток электрической индукции при увеличении радиуса сферической поверхности в 2 раза?
3. Увеличится или уменьшится поток напряженности, если сферу вытянуть в эллипсоид?
4. Как изменится поток напряженности, если заряды опустить в воду?
5. Как изменится поток напряженности, если заряды расположить вне замкнутой поверхности?



Задание 2

Докажите, что для проводящего шара напряженность поля определяется так же, как и для заряженной сферы.

IV. Напряженность поля проводящего заряженного шара и сферы

Определим поток напряженности поля заряженной сферы радиусом R через сферу большего радиуса $R_1 > R$ (рис. 156):

$$\Phi_E = E \cdot 4\pi R_1^2. \quad (5)$$

Внутри выбранной поверхности размещена заряженная сфера, следовательно, применима теорема Гаусса: $\Phi_E = \frac{q}{\varepsilon\varepsilon_0}$. Решая уравнение (5) совместно с уравнением Гаусса, выразим напряженность поля заряженной сферы:

$$E = \frac{q}{4\pi\varepsilon\varepsilon_0 R_1^2} \quad (6)$$

или

$$E = \frac{kq}{\varepsilon R_1^2}. \quad (7)$$

Для расчета напряженности поля заряженной сферы нами получены такие же формулы, как и для поля точечного заряда. Для сферы меньшего радиуса $R_2 < R$ напряженность поля равна нулю. Внутри этой поверхности нет заряда, следовательно $\Phi_E = 0$.

V. Напряженность поля равномерно заряженной бесконечной плоскости

Силовые линии электрического поля бесконечной плоскости перпендикулярны к ее поверхности (рис. 157). Под действием кулоновских сил заряд распределен по ее поверхности равномерно с поверхностной плотностью:

$$\sigma = \frac{q}{S} \quad (8)$$

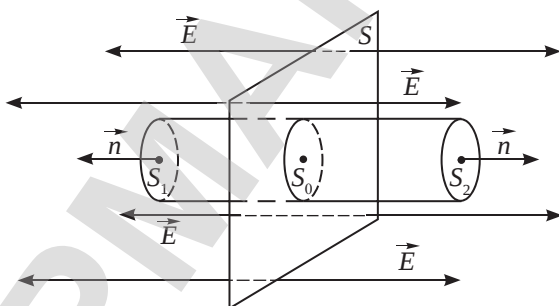


Рис. 157. Напряженность поля бесконечной плоскости во всех точках пространства имеет одно и то же значение. Поле однородное

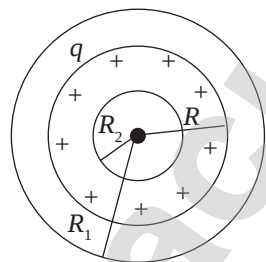


Рис. 156. Внутри заряженной сферы радиусом R поля нет $E = 0$. За сферой напряженность поля определяется так же, как и для точечного заряда, размещенного в центр сферы



Ответьте на вопросы

1. Почему внутри заряженной сферы напряженность поля равна нулю?
2. Почему сила, действующая на заряд, расположенный вблизи заряженной бесконечной пластины, не зависит от расстояния между ними?
3. Почему у заряженных пластин малых размеров поле неоднородное?

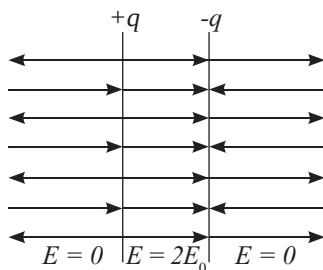


Рис. 158. Электрическое поле, созданное двумя бесконечными плоскостями, сосредоточено в пространстве между пластинами

Выделим площадку S_0 , заряд которой равен $q = \sigma S_0$, и определим поток напряженности, созданный этим зарядом через любую замкнутую поверхность. Выберем поверхность цилиндрической формы, боковые поверхности которой параллельны векторам напряженности. Таким образом мы исключим поток через боковую поверхность, и задача будет сводиться к определению потока напряженности через основания цилиндра S_1 и S_2 . Вектор напряженности и нормаль к основаниям цилиндра совпадают по направлению. Решая совместно уравнения $\Phi_E = E_n \cdot 2S$ и $\Phi_E = \frac{q}{\varepsilon \varepsilon_0}$, получим формулу расчета для напряженности электрического поля заряженной пластины:

$$E = \frac{q}{2\varepsilon \varepsilon_0 S} \quad (9) \quad \text{или} \quad E = \frac{\sigma}{2\varepsilon \varepsilon_0} \quad (10)$$

Из полученной формулы следует, что *напряженность поля заряженной бесконечной плоскости остается постоянной на любом расстоянии от нее, электрическое поле пластины однородное.*

VI. Поле равномерно заряженной бесконечной нити (цилиндра)

Пусть бесконечная нить радиусом R заряжена равномерно (рис. 159). Линейная плотность заряда равна $\tau = \frac{\Delta q}{\Delta l}$, где Δq – заряд на участке нити длиной Δl . Выразим заряд нити длиной l через линейную плотность:

$$q = \tau \Delta l \quad (11)$$

Линии напряженности перпендикулярны поверхности нити, они направлены вдоль радиальных прямых. Выберем замкнутую поверхность цилиндрической формы, ось которой совпадает с осью нити $00'$. Поток через боковую поверхность цилиндра площадью $S = 2\pi r \cdot l$, будет равен:

$$\Phi_E = E \cdot S = E \cdot 2\pi r \cdot l \quad (12)$$

Используя теорему Гаусса и формулы (11) и (12),

получим:
$$E \cdot 2\pi r \cdot l = \frac{\tau \cdot l}{\varepsilon \cdot \varepsilon_0},$$

откуда выразим напряженность поля, созданного бесконечной заряженной нитью:

$$E = \frac{\tau}{2\pi \varepsilon \varepsilon_0 r},$$

где r – расстояние от оси нити (цилиндра) до заданной точки.

Внутри проводящей нити поля нет.



Задание 3

1. Докажите, что между разноименно заряженными пластинами напряженность поля возрастает в 2 раза (рис. 158):
$$E = \frac{\sigma}{\varepsilon \varepsilon_0}.$$
2. Докажите, что напряженность поля за пределами двух пластин равна нулю $E = 0$ (рис. 158).



Задание 4

Составьте алгоритм вывода формулы для расчета напряженности электрических полей с использованием теоремы Гаусса.



Задание 5

Докажите, что поток напряженности через верхнюю и нижнюю поверхность цилиндра равен нулю (рис. 159).

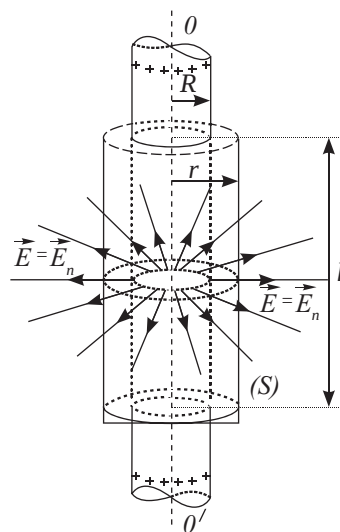


Рис. 159. Вектора напряженности через боковую поверхность образуют угол с нормалью к поверхности в каждой точке, равный нулю

Контрольные вопросы

1. Как определяют поток напряженности через элементарную площадку?
2. Что характеризует поток напряженности?
3. В чем заключается теорема Гаусса?
4. В каких случаях применение теоремы Гаусса значительно упрощает решение задачи?

★ Упражнение

30

1. Определите поток напряженности через боковую поверхность куба, внутри которого размещены заряды $q_1 = 15$ нКл, $q_2 = -25$ нКл и $q_3 = 1$ нКл.
2. Заряженный проводящий шар радиусом r расположен внутри металлической сетки (рис. 160), радиус которой равен R . Определите значение напряженности поля в точках A, B, C , удаленных от центра шара на расстояния R_A, R_B, R_C . Поверхностные плотности зарядов на шаре и сетке равны σ .

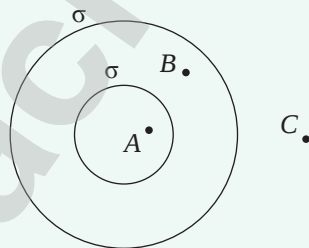


Рис. 160. К упражнению 30.2

3. Проводящая сфера радиусом R заряжена с поверхностной плотностью заряда σ и окружена проводящей оболочкой, внутренний радиус которой равен R_1 , а внешний – R_2 . Определите зависимость напряженности поля от r радиуса и постройте график этой зависимости.
4. Две заряженные параллельные пластины имеют поверхностные плотности $-\sigma$ и $+\sigma$. Расстояние между пластинами d . Постройте кривую зависимости напряженности поля от координаты x , если ось Ox проведена перпендикулярно плоскости пластин.
5. Напряженность поля вблизи большой заряженной пластины в ее центре $E = 10^4$ В/м. Линии напряженности направлены к пластине. Оцените поверхностную плотность зарядов на пластине, если она заряжена равномерно.
6. На нити висит шарик массой $m = 10$ г и зарядом $q = 10^{-6}$ Кл. Определите поверхностную плотность зарядов, переданных на горизонтальную пластину под шариком, если сила натяжения нити уменьшилась вдвое.

§ 31. Работа электрического поля по перемещению заряда. Потенциал, разность потенциалов электрического поля

Ожидаемый результат

Прочитав параграф, вы сможете:

- рассчитывать потенциал и работу электрического поля точечных зарядов.

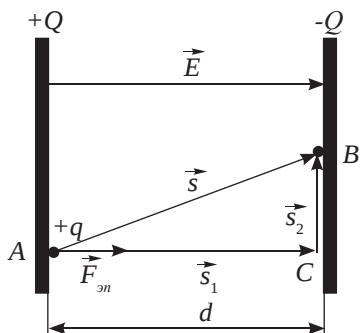


Рис. 161. Работа однородного электрического поля не зависит от траектории движения



Задание 1

Докажите, что при перемещении заряда из точки A в точку C, затем в точку B (рис. 161) совершается работа $A = qEd$.

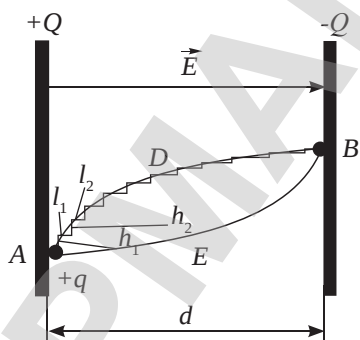


Рис. 162. Работа электрического поля по замкнутому контуру равна нулю

На заряд, внесенный в электрическое поле, действует сила, под влиянием которой заряд движется. Определим работу однородного и неоднородного поля по перемещению заряда.

I. Работа поля по перемещению заряда в однородном поле

Пусть положительный заряд q под действием силы электрического поля заряженных пластин переместился из точки A одной пластины в точку B другой пластины, расстояние между пластинами d (рис. 161). Работа, совершенная полем по перемещению заряда, будет равна:

$$A = FScos\alpha.$$

Учтем, что $F = qE$, $Scos\alpha = d$, получим:

$$A = qEd. \quad (1)$$

Рассмотрим перемещение заряда вдоль линии ADB (рис. 162). Любую траекторию, по которой движется заряд, можно представить, как сочетание малых горизонтальных $l_1, l_2, \dots, l_n$ и вертикальных $h_1, h_2, \dots, h_n$ участков пути. Просуммировав горизонтальные участки, получим: $l_1 + l_2, \dots, l_n = d$, следовательно, работа на горизонтальных участках равна:

$$A = qEd.$$

На вертикальных участках работа равна нулю, так как угол между вектором силы и перемещения на этих участках равен 90° , $\cos 90^\circ = 0$.

Работа однородного поля по перемещению заряда в нем из одной точки в другую не зависит от траектории движения. Она зависит только от положения этих точек в поле.

Мы пришли к выводу, который был получен ранее для гравитационного поля.

II. Потенциальная энергия заряженного тела в однородном электрическом поле

Рассмотрим движение заряда по замкнутому контуру ADBEA (рис. 162). При движении тела из точки B в точку A угол между направлением силы и перемещением на горизонтальных участках равен 180° , следовательно,

$$\cos \alpha = -1.$$

Электрическое поле совершает отрицательную работу: $A_{BEA} = -qEd$. Работа по замкнутому контуру $ADBEA$ равна нулю:

$$A = A_{ADB} + A_{BEA} = qEd - qEd = 0.$$

Поля, работа которых по перемещению тела по замкнутому контуру равна нулю, называют потенциальными.

Таковыми полями являются гравитационное поле и электрическое поле, созданное неподвижным зарядом. Работу потенциального поля можно определить по изменению потенциальной энергии тела:

$$A = -(W_{p2} - W_{p1}). \quad (2)$$

Пусть точки A и B – это произвольные точки поля, которые находятся на расстоянии d_1 и d_2 от пластины (рис. 163). Выразим отрезок d через эти расстояния:

$$d = d_1 - d_2,$$

тогда $A = -(qEd_2 - qEd_1).$ (3)

Из формул (2) и (3) следует, что потенциальная энергия заряженного тела в однородном поле равна:

$$W_p = qEd. \quad (4)$$

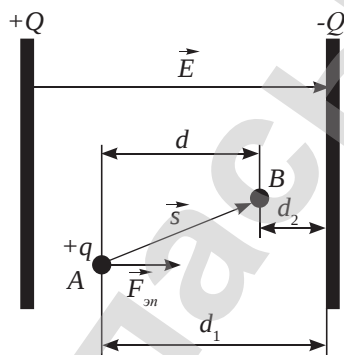


Рис. 163. Определение расстояния между точками электрического поля A и B относительно отрицательно заряженной пластины

III. Работа по перемещению заряда в неоднородном электрическом поле. Потенциальная энергия тела в поле точечного заряда

Пусть заряд q перемещается вдоль силовой линии поля, созданного положительным зарядом Q , из точки A в точку B (рис. 164).

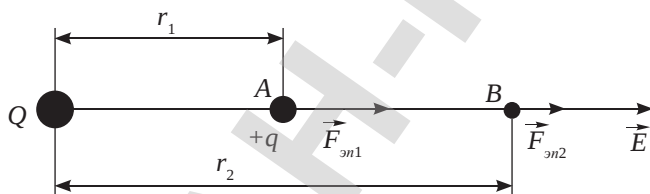


Рис. 164. Работа электрического поля по перемещению заряда q в поле, созданном зарядом Q

Сила, перемещающая заряд, обратно пропорционально зависит от квадрата расстояния:

$$F_A = \frac{kQq}{\varepsilon \cdot r_1^2}, \quad F_B = \frac{kQq}{\varepsilon \cdot r_2^2}$$

и является величиной переменной. Используя аналогию с неоднородным гравитационным полем, запишем формулу расчета работы электрического поля по перемещению заряда:

$$A = F_{cp} (r_1 - r_2) = \frac{kqQ}{\varepsilon \cdot r_1} - \frac{kqQ}{\varepsilon \cdot r_2}. \quad (5)$$



Запомните!

Работа неоднородного электрического поля по перемещению заряда равна:

$$A = \frac{kqQ}{\varepsilon \cdot r_1} - \frac{kqQ}{\varepsilon \cdot r_2}.$$



Запомните!

Потенциал поля – это энергетическая характеристика поля. Он характеризует потенциальную энергию, которой обладал бы положительный единичный заряд, помещенный в данную точку поля.

Единица измерения потенциала

$$[\varphi] = \frac{1 \text{ Дж}}{1 \text{ Кл}} = 1 \text{ В}.$$

В полученном выражении

$$W_p = \frac{kqQ}{\varepsilon \cdot r} \quad (6)$$

является потенциальной энергией заряда q в электрическом поле неподвижного заряда Q или энергией взаимодействия точечных зарядов Q и q , находящихся на расстоянии r в пространстве с диэлектрической проницаемостью ε .

Потенциальная энергия заряженного тела в некоторой точке равна работе поля по перемещению заряда из этой точки поля в бесконечность.

Подставив (6) в (5), получим:

$$A = -(W_{p2} - W_{p1}). \quad (7)$$

Работа по перемещению заряда в неоднородном электрическом поле равна изменению потенциальной энергии заряженного тела, взятого со знаком минус.

IV. Потенциал однородного электрического поля

Потенциал поля равен отношению потенциальной энергии заряда к этому заряду:

$$\varphi = \frac{W_p}{q}. \quad (8)$$

Он может принимать положительные или отрицательные значения.

Физический смысл имеет разность потенциалов поля, так как через нее выражается работа сил поля по перемещению заряда.

Для однородного электрического поля потенциал точки поля равен:

$$\varphi = \frac{qEd}{q} = Ed. \quad (9)$$

Подставив (9) в (3), получим известную вам из курса 8 класса связь между начальным и конечным потенциалом точек:

$$A = -(q\varphi_2 - q\varphi_1)$$

или

$$A = q(\varphi_1 - \varphi_2). \quad (10)$$

V. Потенциал неоднородного электрического поля, созданного точечным зарядом

Выразим потенциал поля точечного заряда, используя формулы (6) и (8):

$$\varphi = \frac{kQ}{\varepsilon \cdot r}, \quad (11)$$

где Q – точечный заряд, создавший поле.



Вспомните!

Разность потенциалов двух точек поля называют напряжением U :

$$U = \varphi_1 - \varphi_2.$$

Работа поля и напряжение связаны соотношением:

$$A = qU.$$



Задание 2

Определите потенциал в точке O поля, созданного равными по модулю зарядами, расположенными в вершинах квадрата (рис. 165). Каким станет потенциал этой точки, если все заряды будут положительными?

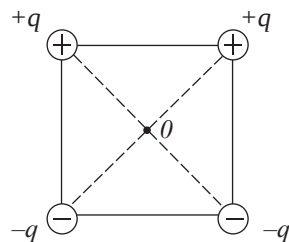


Рис. 165. Для нескольких зарядов выполняется принцип суперпозиции

VI. Потенциал поля, созданного несколькими точечными зарядами

Потенциал поля, созданного несколькими зарядами, равен алгебраической сумме потенциалов полей каждого из них.

$$\varphi = \varphi_1 + \varphi_2 + \dots + \varphi_n. \quad (12)$$

Уравнение (12) является выражением принципа суперпозиции полей для энергетической характеристики. Потенциал поля положительного заряда – положительный, отрицательного заряда – отрицательный.

VII. Выбор нулевого уровня потенциала для расчета потенциальной энергии

Потенциальная энергия взаимодействия заряженных частиц стремится к нулю при удалении одного из зарядов в бесконечность. В теоретических расчетах за нулевую точку потенциала принимают бесконечно удаленную точку. В решении практических задач большое значение имеет разность потенциалов между точками поля. Значение разности потенциалов не зависит от выбора нулевого уровня. Нулевым уровнем потенциала может стать любая точка пространства, удобная для расчетов. В электротехнике за нулевой уровень потенциала, как правило, принимают любую точку поверхности Земли.

ПРИМЕР РЕШЕНИЯ ЗАДАЧИ

Внутри тонкостенной металлической сферы радиусом $R = 20$ см концентрически помещен металлический шар радиусом $r = 10$ см. Через отверстие в сфере шар соединен с землей с помощью тонкого длинного провода. На внешнюю сферу помещают заряд $Q = 10^{-8}$ Кл. Определите потенциал φ этой сферы.

Дано:

$R = 20$ см

$r = 10$ см

$Q = 10^{-8}$ Кл

$\varepsilon = 1$

$\varphi = ?$

Решение:

Потенциалы всех точек внутри заряженной сферы равны потенциалу на ее поверхности:

$$\varphi_1 = \frac{Q}{4\pi\varepsilon_0 R}.$$

На заземленном внутреннем шаре $\varphi_0 = 0$, на нем индуцируется заряд q противоположного знака. Потенциал внутреннего шара равен сумме потенциалов полей, созданных зарядами q и Q :

$$\varphi_0 = \frac{1}{4\pi\varepsilon_0} \left(\frac{Q}{R} - \frac{q}{r} \right). \quad (1)$$

Так как $\varphi_0 = 0$, то из (1) следует, что:

$$q = \frac{Qr}{R}. \quad (2)$$

На поверхности большой сферы потенциал с учетом индуцированного заряда станет равным $\varphi = \frac{1}{4\pi\varepsilon_0} \left(\frac{Q}{R} - \frac{q}{R} \right) = \frac{Q - q}{4\pi\varepsilon_0 R}.$

С учетом (2) получим расчетную формулу:

$$\varphi = \frac{Q(R-r)}{4\pi\epsilon_0 R^2} = 225 \text{ В}.$$

Ответ: $\varphi = 225 \text{ В}$.

Контрольные вопросы

1. Как определяется работа по перемещению заряда в однородном электрическом поле? В поле точечного заряда?
2. Какие поля называют потенциальными?
3. Чему равна потенциальная энергия заряда, внесенного в однородное поле? В поле точечного заряда?
4. Какую величину называют потенциалом электрического поля?
5. Как определяют потенциал поля, созданного несколькими зарядами?
6. Что принимают за нулевой уровень при определении потенциалов точек поля?

★ Упражнение

31

1. Два точечных заряда $q_1 = 6,6 \cdot 10^{-9}$ Кл и $q_2 = 1,32 \cdot 10^{-8}$ Кл находятся на расстоянии $r_1 = 40$ см. Какую работу необходимо совершить, чтобы сблизить их до расстояния $r_2 = 25$ см?
2. Какую работу необходимо совершить для того, чтобы переместить заряд q из точки A в точку B в поле двух точечных зарядов q_1 и q_2 (рис. 166)?

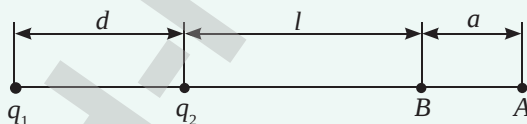


Рис. 166. К упражнению 31.2

3. Между двумя вертикальными пластинами, находящимися на расстоянии $d = 1$ см друг от друга, висит заряженный бузиновый шарик массой $m = 0,1$ г. После того как на пластины было подано напряжение, равное $U = 1000$ В, нить с шариком отклонилась на угол $\alpha = 10^\circ$. Определите заряд шарика q .
4. Три капли ртути, заряженные до $q_1 = 4 \cdot 10^{-12}$ Кл, $q_2 = 5 \cdot 10^{-12}$ Кл, $q_3 = 6 \cdot 10^{-12}$ Кл соответственно и имеющие радиусы $r_1 = 2$ мм, $r_2 = 5$ мм, $r_3 = 3$ мм, сливают в одну каплю. Определите потенциал большой капли.
5. Какая работа совершается при переносе точечного заряда $q = 2 \cdot 10^{-8}$ Кл из бесконечности в точку, находящуюся на расстоянии $d = 1$ см от поверхности шара радиусом $r = 1$ см с поверхностной плотностью заряда $\sigma = 10^{-9}$ Кл/см²?

§ 32. Эквипотенциальные поверхности. Связь между напряженностью и разностью потенциалов для однородных электрических полей

Ожидаемый результат

Прочитав параграф, вы сможете:

- применять формулу, связывающую силовую и энергетическую характеристики электростатического поля при решении задач;
- сравнивать силовые и энергетические характеристики гравитационного и электростатического полей.

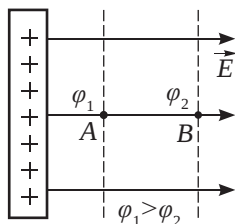


Рис. 167. Линии напряженности направлены от точки с большим потенциалом к точке с меньшим потенциалом

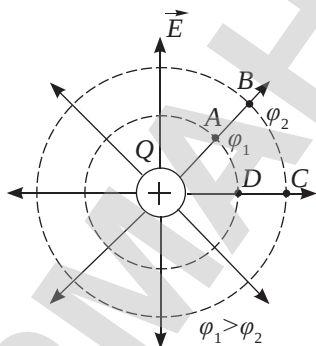


Рис. 168. Линии напряженности и эквипотенциальные поверхности неоднородного поля, созданного точечным зарядом Q

I. Эквипотенциальные поверхности

Напряженность однородного электрического поля – величина постоянная. Из формулы, полученной в §31:

$$\varphi = Ed \quad (1)$$

следует, что все точки, отстоящие от поверхности на одно и то же расстояние, имеют равный потенциал. Они лежат в плоскости, параллельной заряженной пластине.

Поверхность, во всех точках которой потенциал поля одинаковый, называют эквипотенциальной.

Линии напряженности перпендикулярны эквипотенциальным поверхностям (рис. 167).

Эквипотенциальными поверхностями однородного поля являются плоскости, которые пронизываются линиями напряженности под прямым углом.

Потенциал поля, созданного точечным зарядом, равен $\varphi = \frac{kQ}{\varepsilon \cdot r}$, следовательно, эквипотенциальной поверхностью для поля точечного заряда является сфера. На рисунке 168 изображены силовые линии и эквипотенциальные поверхности неоднородного поля, созданного положительным точечным зарядом Q . Вектора напряженности перпендикулярны эквипотенциальным поверхностям.

При перемещении заряда по эквипотенциальной поверхности работа поля равна нулю:

$$A = q(\varphi_1 - \varphi_2) = q(\varphi - \varphi) = 0,$$

так как все точки эквипотенциальной поверхности имеют один и тот же потенциал.



Задание 1

Докажите, что:

- вектора напряженности перпендикулярны эквипотенциальным поверхностям (рис. 168);
- работа по замкнутому контуру $A B C D A$ равна нулю.

II. Связь между напряженностью и разностью потенциалов для однородного электрического поля

Определим разность потенциалов между точками A и B (рис. 167) однородного электрического поля, используя связь потенциала с напряженностью поля:

$$\varphi_1 - \varphi_2 = Ed_1 - Ed_2 = E(d_1 - d_2),$$

где d_1 и d_2 – расстояния от точек A и B электрического поля до уровня с нулевым потенциалом, расположенного справа от выбранных точек.

Заменяем $d_1 - d_2$ на d – расстояние между A и B , получим: $\varphi_1 - \varphi_2 = Ed$ или $U = Ed$.

Чем больше напряженность поля и расстояние между эквипотенциальными поверхностями, к которым принадлежат точки поля, тем больше разность потенциалов между ними.

III. Связь потенциала с напряженностью

При перемещении положительного заряда по направлению силовых линий поле совершает положительную работу. При движении в обратном направлении работа поля отрицательная.

Рассмотрим рисунки 167 и 168. Поскольку потенциалы точек однородного поля определяются по формуле $\varphi = Ed$ и неоднородного поля – по формуле

$\varphi = \frac{kQ}{\varepsilon \cdot r}$, то не сложно прийти к следующему выводу: *напряженность поля направлена от точки с большим потенциалом в точку с меньшим потенциалом.*



Задание 2

Сравните работы, совершенные электрическим полем по перемещению положительного заряда q из точки A в точки B , C и D (рис. 169).

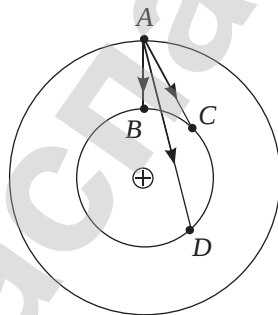


Рис. 169. Перемещение заряда в поле, созданном точечным зарядом



Задание 3

1. Укажите точки с наибольшим потенциалом на рисунках 170 и 171.
2. В каких точках напряженность поля наименьшая?

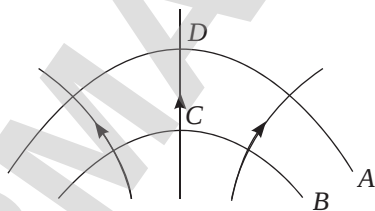


Рис. 170. Силовые линии и эквипотенциальные поверхности неоднородного поля

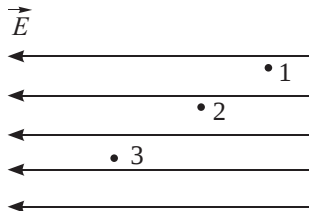


Рис. 171. Линии напряженности однородного поля

IV. Силовые и энергетические характеристики гравитационного и электростатического полей

Сравним силовые линии гравитационного поля около поверхности Земли с линиями напряженности однородного электрического поля, созданного разноименно заряженными пластинами (рис. 172), а также силовые линии гравитационного поля Земли на расстоянии, сравнимом с радиусом Земли, и неоднородным полем, созданным точечным отрицательным зарядом (рис. 173).

Сравнение силовых линий и формул расчета основных характеристик полей позволяет установить аналогию величин, которая представлена в таблице.

Гравитационное и электрическое поля являются потенциальными, или консервативными, полями. Работа консервативных сил по замкнутому контуру равна нулю. Работа не зависит от траектории движения тела, она зависит только от положения тела в начальный и конечный моменты времени. Работа сил *консервативного поля* определяется уменьшением потенциальной энергии тела.

Для консервативных полей выполняется закон сохранения энергии. Уменьшение потенциальной энергии приводит к увеличению кинетической энергии движущегося тела.



Рис. 172. Силовые линии гравитационного поля у поверхности земли и однородного электрического поля между разноименно заряженными пластинами

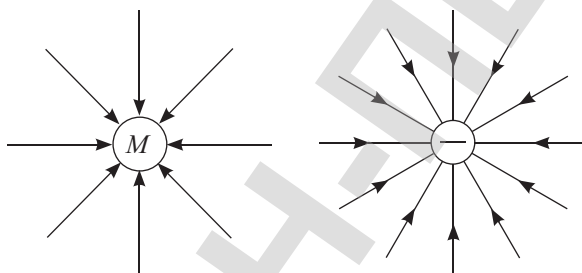


Рис. 173. Силовые линии гравитационного поля земли на расстоянии, сравнимом с радиусом земли и неоднородного электрического поля, созданного отрицательным зарядом



Возьмите на заметку

Потенциальная энергия системы зарядов равна алгебраической сумме энергий взаимодействия каждой из взаимодействующих пар зарядов.

Таблица. 12. Аналогия величин, характеризующих гравитационное и электрическое поля

Величины	Гравитационное поле	Электрическое поле
Напряженность	g	E
Гравитационная постоянная	G	
Коэффициент пропорциональности		k

Величины	Гравитационное поле	Электрическое поле
Масса	m	
Заряд		q
Потенциал	gh	φ
Сила	$F=mg$	$F=qE$
Потенциальная энергия однородного поля	$W_p=mgh$	$W_p=qEd$
Потенциальная энергия неоднородного поля	$W_p = \frac{GMm}{r}$	$W_p = \frac{kQq}{r}$
Работа поля	$A = -(W_{p2} - W_{p1})$	
Однородного поля	$A = -mg(h_2 - h_1)$	$A = -qE(d_2 - d_1)$
Неоднородного поля	$A = -\left(\frac{GMm}{r_2} - \frac{GMm}{r_1}\right)$	$A = -\left(\frac{kQq}{r_2} - \frac{kQq}{r_1}\right)$

Контрольные вопросы

1. Что называют эквипотенциальной поверхностью?
2. Как направлены вектора напряженности по отношению к эквипотенциальной поверхности?
3. Сравните характеристики гравитационного и электрического поля.



Упражнение

32

1. Напряжение между двумя точками, лежащими на одной линии напряженности однородного поля, равно 2 кВ. Определите напряженность, если расстояние между точками 4 см.
2. Во сколько раз кулоновские силы отталкивания между двумя электронами больше силы гравитационного притяжения?
3. Заряд 5 нКл перемещен на 20 см в однородном электрическом поле напряженностью 60 кВ/м. Вектор перемещения образует угол 60° с направлением силовой линии. Определите работу, совершенную полем, изменение потенциальной энергии заряда, напряжение между начальной и конечной точками перемещения.
4. Три точечных заряда $q_1 = 2$ нКл, $q_2 = 3$ нКл и $q_3 = -4$ нКл расположены в вершинах равностороннего треугольника со стороной $a = 10$ см. Определите потенциальную энергию этой системы.

§ 33. Проводники и диэлектрики в электрическом поле

Ожидаемый результат

Прочитав параграф, вы сможете:

- проводить сравнительный анализ явлений электростатической индукции в проводниках и поляризации в диэлектриках.

Вспомните!

Проводники – это вещества, в которых есть свободные носители зарядов.

Диэлектрик – это вещества, в которых нет свободных заряженных частиц.

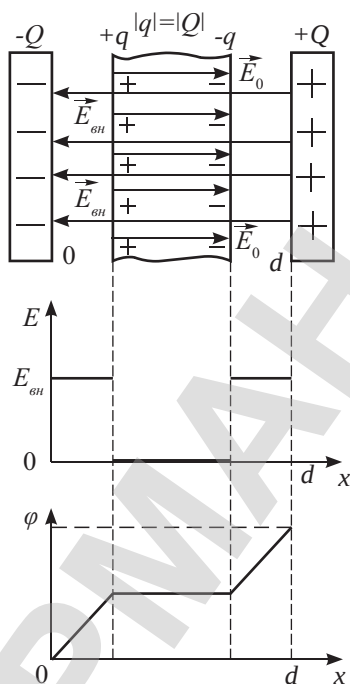


Рис. 174. Проводящая пластина в однородном электрическом поле

I. Проводящая пластина в однородном электрическом поле

В проводнике, размещенном в однородном электрическом поле (рис. 174), свободные электроны смещаются вдоль силовых линий. Происходит электризация через влияние: внутри проводника появляется поле, созданное индуцированными зарядами. Его направление противоположно внешнему полю, поэтому под воздействием поля индуцированных зарядов движение электронов замедляется и прекращается полностью, когда напряженность индуцированного поля достигнет напряженности внешнего. На основании принципа суперпозиции, напряженность внутри проводника равна сумме напряженностей внешнего и индуцированного поля:

$$\vec{E} = \vec{E}_{\text{вн}} + \vec{E}_0.$$

С учетом направления векторов получим:

$$E = E_{\text{вн}} - E_0 = 0.$$

Это значит, что *электрическое поле внутри проводника отсутствует*. Следовательно, *поверхностные плотности зарядов σ на пластинах, создавших внешнее поле и на поверхностях проводника, имеют одно и то же значение, заряды на поверхностях равны по модулю: $|Q| = |q|$* .

II. Потенциалы точек внутри проводника и на его поверхности

Поверхность проводника является эквипотенциальной, так как вектора напряженности всегда перпендикулярны поверхности проводника. Определим потенциал поверхности проводника по формуле для однородного поля:

$$\varphi = Ed,$$

где d – расстояние поверхности от произвольно выбранного уровня, например расстояние между отрицательно заряженной пластиной и поверхностью проводника.

Для двух произвольно выбранных точек проводника выполняется соотношение:

$$\Delta\varphi = E\Delta d, \quad \varphi_1 - \varphi_2 = E(d_1 - d_2).$$

Поскольку внутри проводника $E = 0$, то $\varphi_1 - \varphi_2 = 0$, следовательно:

$$\varphi_1 = \varphi_2.$$

Потенциалы всех точек проводника имеют одно и то же значение. На рисунке 174 представлены графики зависимости напряженности и распределения потенциала

от координаты точек однородного электрического поля, внутри которого размещен проводник. За нулевой уровень выбрана отрицательно заряженная пластина.

III. Проводники в электрическом поле

Поверхность любого проводника является эквипотенциальной.

Силовые линии перпендикулярны эквипотенциальной поверхности (рис. 176), они сгущаются около острых частей поверхности. Это свидетельствует о том, что на острие плотность заряда больше. В этой части проводника возможно «стекание» зарядов. Для сохранения заряда на проводнике его поверхность необходимо сгладить.

IV. Механизм поляризации диэлектриков.

Диэлектрики состоят из нейтральных атомов или молекул. В зависимости от состава вещества различают *полярные* и *неполярные диэлектрики*.

Молекулы, в которых центры расположения отрицательных и положительных зарядов смещены относительно друг друга, называют полярными.

Эти молекулы представляют собой диполь (рис. 177).

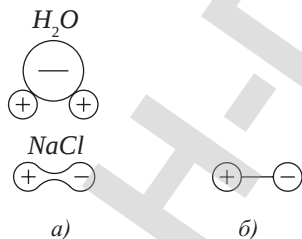


Рис. 177. а) молекулы полярных диэлектриков: воды, поваренной соли; б) изображение диполя на рисунке

Диполь – это система смещенных относительно друг от друга связанных зарядов, образующих собственное поле.

Диэлектрики поляризуются в электрическом поле. Процесс смещения зарядов в диэлектрике, помещенном в электрическое поле, называют поляризацией, а сам диэлектрик – поляризованным.



Ответьте на вопросы

1. Какие частицы являются носителями электрических зарядов в металлах?
2. В каком направлении движутся свободные частицы металла под воздействием внешнего электрического поля?



Эксперимент

Зарядите проводящий цилиндр с заостренным концом (рис. 175). С помощью электрометра определите потенциал всех точек поверхности относительно Земли, перемещая подвижный контакт электрометра по поверхности проводника.

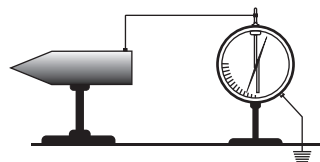


Рис. 175. Определение потенциала точек поверхности цилиндрического проводника

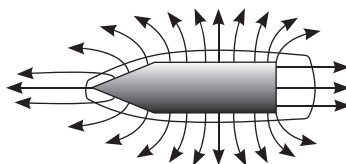


Рис. 176. Линии напряженности перпендикулярны поверхности проводника



Ответьте на вопрос

Почему вектора напряженности всегда направлены перпендикулярно поверхности проводника?

Процесс поляризации для полярных и неполярных диэлектриков отличается.

- 1) **Поляризация диэлектриков, состоящих из полярных молекул.** В обычном состоянии в результате теплового движения молекулы в веществе ориентированы произвольно, вокруг такого диэлектрика поле отсутствует (рис. 178, а). Если диэлектрик внести во внешнее поле, то на каждый диполь будет действовать пара сил, под действием которых молекулы разворачиваются, оси диполей располагаются вдоль силовых линий внешнего поля (рис. 178, б, в), диэлектрик поляризуется. В результате суперпозиции собственных полей молекул с внешним полем напряженность поля внутри диэлектрика уменьшается. В любой части диэлектрика суммарный заряд будет равен нулю. При этом на одной поверхности диэлектрика будет избыток отрицательных зарядов, на другой – избыток положительных зарядов.

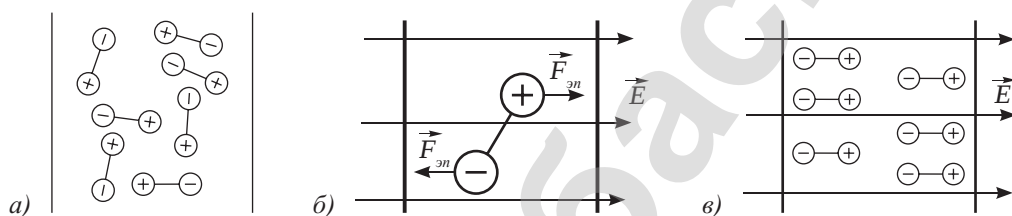


Рис. 178. Поляризация полярных диэлектриков

- 2) **Поляризация неполярных диэлектриков.** Неполярные диэлектрики состоят из атомов. Центром расположения отрицательных зарядов в атоме в виду быстрого вращения электронов вокруг ядра, можно считать центр электронного облака. Таким образом, центр расположения отрицательного заряда совпадает с центром положительного заряда ядра (рис. 179, а). Под воздействием внешнего поля электронная оболочка вытягивается вдоль линий напряженности. Центры положительных и отрицательных зарядов смещаются относительно друг друга, образуется диполь, поле которого $\vec{E}_0$ ослабляет внешнее поле $\vec{E}_{вн}$ (рис. 179, б).

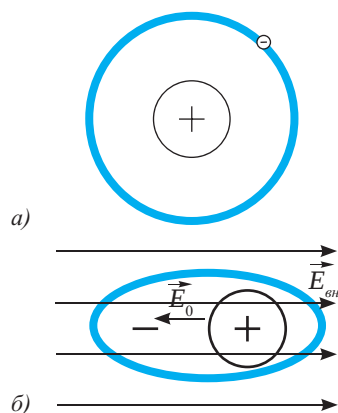


Рис. 179. Поляризация неполярных диэлектриков

В рассмотренных случаях на поверхностях поляризованных диэлектриков появляются заряды противоположного знака. Они не могут так же свободно перемещаться по диэлектрику, как электроны по проводнику, поэтому их называют *связанными зарядами*.



Эксперимент

Поочередно внесите в пространство между двумя заряженными металлическими пластинами различные диэлектрики (рис. 180). По показанию электрометра выясните, как они влияют на поле. По таблице 12 сравните диэлектрические проницаемости диэлектриков, сделайте выводы.

V. Диэлектрики в однородном электрическом поле

Напряженность поля внутри диэлектрика уменьшается в результате поляризации (рис. 181). На основании принципа суперпозиции полей запишем:

$$\vec{E} = \vec{E}_{\text{вн}} + \vec{E}_0 \quad \text{или} \quad E = E_{\text{вн}} - E_0.$$

При известном значении диэлектрической проницаемости среды напряженность поля внутри диэлектрика равна: $E = \frac{E_{\text{вн}}}{\epsilon}$.

На рисунке 181 представлен график зависимости напряженности поля от координаты точки пространства между двумя заряженными бесконечными пластинами. Потенциал точки в однородном поле связан с напряженностью формулой $\varphi = Ed$. На графике (рис. 181, в) зависимость φ от d представляет собой прямую с углом наклона к оси $0x$, тангенс которого равен напряженности поля:

$$\operatorname{tg} \alpha_1 = \frac{\Delta \varphi_1}{d_1} = E_{\text{вн}},$$

$$\operatorname{tg} \alpha_2 = \frac{\Delta \varphi_2}{d_2} = \frac{E_{\text{вн}}}{\epsilon}.$$

Интересно знать!

Электростатическая защита

Фарадей впервые предложил использовать металлические сетки и корпуса в качестве электростатической защиты. Во время опыта по исследованию свойств проводников он вошел в покрытый фольгой куб, вокруг которого создавалось поле высокого напряжения. Попытка обнаружить с помощью электрометра наличие заряда внутри куба не удалась. Электростатическая защита получила широкое применение в электротехнике. Все чувствительные к внешним полям приборы имеют металлические корпуса. Иллюзионисты используют это свойство проводников в аттракционах, они зрелищны и вызывают большой интерес (рис. 182).



Рис. 182. Американский иллюзионист Дэвид Блейн под напряжением 1000 000 В

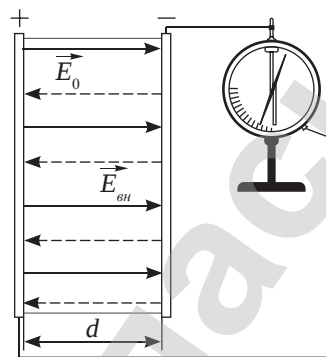


Рис. 180. Исследование влияния диэлектрика на электрическое поле



Ответьте на вопрос

Почему при измерении потенциала поверхности проводника корпус электрометра необходимо заземлить?

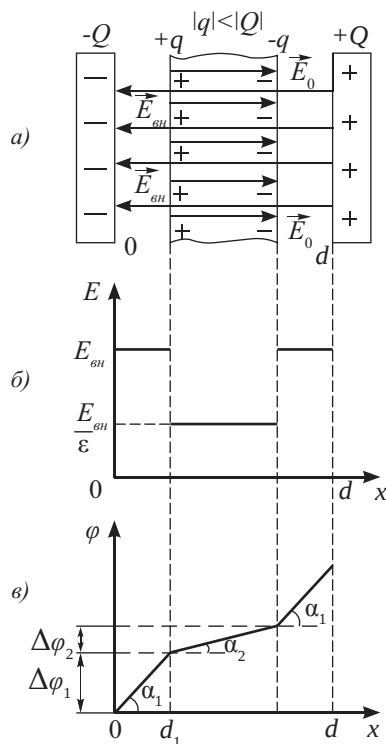


Рис. 181. Диэлектрик в однородном электрическом поле

Контрольные вопросы

1. Почему внутри проводника, внесенного в электрическое поле, напряженность поля равна нулю?
2. Почему поверхности проводников являются эквипотенциальными поверхностями?
3. Как создают электростатическую защиту для приборов, чувствительных к электрическим полям?
4. Укажите основные отличия между проводниками и диэлектриками.
5. В чем различие полярного диэлектрика от неполярного?
6. Какой диэлектрик называют полярным? Почему заряды на поверхности поляризованного диэлектрика называют связанными?
7. Почему электрическое поле внутри диэлектрика, внесенного во внешнее поле, уменьшается, а в проводнике полностью исчезает?

★ Упражнение

33

1. Одной из двух параллельных металлических пластин, которые расположенных на небольшом расстоянии друг от друга, сообщают заряд $q = 4$ нКл. Какие заряды будут индуцированы на каждой стороне другой пластины? Какова напряженность поля между пластинами?
2. Определите изменение силы взаимодействия двух шаров, центры которых находятся на расстоянии l , после того как их соединят тонкой проволокой (рис. 183). Заряды шаров равны q_1 и $q_2 = 2q_1$, радиусы шаров равны r_1 и $r_2 = 2r_1$.
3. С какой силой взаимодействуют два точечных заряда $q_1 = 6,6$ мкКл и $q_2 = 1,2$ мкКл в керосине на расстоянии $R = 10$ см друг от друга? На каком расстоянии их следует поместить в вакууме, чтобы сила взаимодействия осталась прежней?
4. Заряженный шарик погрузили в масло. На каком расстоянии от шарика напряженность поля будет такой же, какой была до погружения на расстоянии $R = 40$ см.
5. Две большие пластины расположены горизонтально на небольшом расстоянии друг от друга. На нижней непроводящей пластине лежит маленький шарик с зарядом $q = 20$ мкКл. На сколько изменится вес шарика, если пространство между пластинами заполнить жидкостью плотностью $\rho = 800$ кг/м³ с диэлектрической проницаемостью ϵ ? Объем шарика $V = 1$ см³, напряженность электрического поля, созданного верхней положительно заряженной пластиной, $E = 100$ В/м.

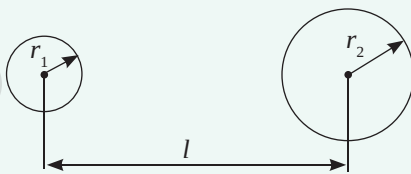


Рис. 183. К упражнению 2

Творческое задание

Изучите основные характеристики электрического поля, созданного нашей планетой. Подготовьте краткое сообщение.

§ 34. Емкость. Конденсаторы.

Соединение конденсаторов

Ожидаемый результат

Прочитав параграф, вы сможете:

- исследовать зависимость емкости конденсатора от его параметров;
- применять формулу последовательного и параллельного соединения конденсаторов при решении задач.

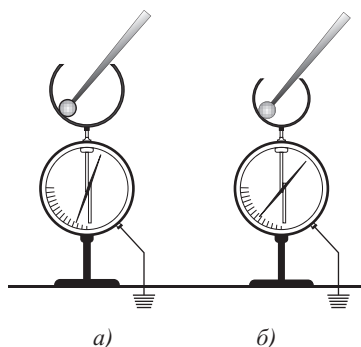


Рис. 184. Емкость сферы большего радиуса больше

I. Электрическая емкость уединенных проводников

Благодаря подвижности свободных электронов проводники используют в качестве накопителей зарядов. Они легко электризуются через влияние или накапливают избыточный заряд при контакте с наэлектризованным телом. Опытным путем установлено, что между потенциалом уединенного проводника и переданным ему зарядом существует прямо пропорциональная зависимость. Передадим один и тот же заряд q сфере, касаясь ее внутренней поверхности заряженным шаром малых размеров несколько раз. При каждом касании стрелка электрометра будет отклоняться на одно и то же значение (рис. 184, а). Следовательно, между зарядом и потенциалом шара существует прямо пропорциональная зависимость:

$$q = C\varphi,$$

где C – коэффициент пропорциональности.

Выясним, зависит ли потенциал поля от размеров проводника. Для этого повторим опыт со сферой меньшего радиуса. При таком же значении переданного заряда стрелка электрометра отклонится на больший угол (рис. 184, б). Следовательно, потенциал сферы меньшего радиуса выше: $\varphi_2 > \varphi_1$. Из результатов опыта следует, что коэффициент C является характеристикой проводящих сфер, его назвали **емкостью**.

Емкость уединенного проводника – это физическая величина, равная отношению заряда проводника к его потенциалу.

Вспомните!

$$k = \frac{1}{4\pi\epsilon_0}.$$

Ответьте на вопрос

Почему емкость шара определяют так же, как и емкость сферы:

$$C = 4\pi\epsilon_0\epsilon r^2$$

$$C = \frac{q}{\varphi}. \quad (1)$$

Подставим в (1) формулу расчета потенциала проводящей сферы $\varphi = \frac{kq}{\epsilon \cdot r}$, получим:

$$C = \frac{\epsilon \cdot r}{k} \quad (2)$$

или

$$C = 4\pi\epsilon_0\epsilon r. \quad (3)$$

Чем больше радиус уединенной сферы, тем больше ее электроемкость. Полученные выводы верны и для шара, так как внутри проводников нет свободных зарядов и электрическое поле отсутствует.

За единицу измерения электрической емкости принят фарад. Она названа в честь Фарадея:

Фарад – это емкость проводника, потенциал которого возрастает на 1 вольт при изменении заряда на 1 кулон.

$$C = 1\Phi = \frac{1\text{ Кл}}{1\text{ В}}.$$

В практике используют единицы измерения емкости с дольными приставками:

$$1 \text{ мкФ} = 10^{-6} \text{ Ф}, 1 \text{ пФ} = 10^{-12} \text{ Ф}, 1 \text{ нФ} = 10^{-9} \text{ Ф}.$$

II. Конденсатор

Приблизим ладони рук к заряженной сфере (рис. 184), показание электромметра уменьшится, следовательно и потенциал сферы уменьшится. Уменьшение потенциала сферы происходит при внесении в ее поле любого проводника. Мысленно поместим сферу внутрь заземленной сферы большего радиуса (рис. 185). На поверхности внешней сферы появится индуцированный заряд. Потенциал внутренней сферы относительно внешней сферы, потенциал которой равен нулю, станет равным:

$$\Delta\varphi = \frac{kq}{\varepsilon r_1} - \frac{kq}{\varepsilon r_2} = \frac{kq}{\varepsilon} \left(\frac{1}{r_1} - \frac{1}{r_2} \right) = \frac{kq(r_2 - r_1)}{\varepsilon r_1 r_2}. \quad (4)$$

Уменьшение потенциала свидетельствует о том, что емкость двух проводников больше, чем уединенного.

Подставим (4) в (1), получим формулу расчета емкости для двух концентрических проводящих сфер:

$$C = \frac{\varepsilon r_1 r_2}{k(r_2 - r_1)} \quad (5)$$

или
$$C = \frac{4\pi\varepsilon_0\varepsilon r_1 r_2}{r_2 - r_1}. \quad (6)$$

Чем больше радиусы сфер и меньше расстояние между ними, тем больше их емкость. Две проводящие сферы разделенные диэлектриком, представляют собой сферический конденсатор.

Широкое применение получил плоский конденсатор, состоящий из двух плоских параллельных пластин, разделенных диэлектриком. Пластины конденсатора называют обкладками.



Интересно знать!

Радиус шара, обладающего емкостью 1 Ф, равен 9 млн км:

$$r = Ck = 1\Phi \cdot 9 \cdot 10^9 \frac{\text{Н} \cdot \text{м}^2}{\text{Кл}^2} = 9 \cdot 10^9 \text{ м}.$$

Радиус такого шара превышает радиус Земли в 1400 раз:

$$\frac{r}{R_3} = \frac{9 \cdot 10^9 \text{ м}}{6,4 \cdot 10^6 \text{ м}} \approx 1400.$$

Емкость нашей планеты без атмосферы составляет 0,71 мФ:

$$C_3 = \frac{6,4 \cdot 10^6 \text{ м}}{9 \cdot 10^9 \frac{\text{Н} \cdot \text{м}^2}{\text{Кл}^2}} = 0,71 \cdot 10^{-3} \text{ Ф} = 0,71 \text{ мФ}.$$

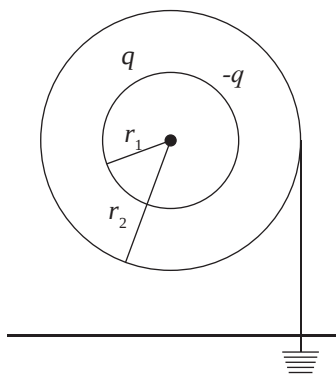


Рис. 185. Потенциал заземленной сферы равен нулю



Интересно знать!

Наша Земля представляет собой сферический конденсатор, внешней сферой которого является ионосфера, а диэлектриком – воздух.

Конденсатор – устройство для накопления заряда и энергии электрического поля. Состоит из двух пластин, разделенных диэлектриком, толщина которого мала по сравнению с размерами обкладок.

Напряженность однородного поля между пластинами:

$$E = \frac{q}{\varepsilon \varepsilon_0 S}.$$

Разность потенциалов между пластинами конденсатора или потенциал одной из обкладок относительно другой равен:

$$\Delta\varphi = Ed = \frac{qd}{\varepsilon \varepsilon_0 S}. \quad (7)$$

Подставив (7) в (1), получим емкость плоского конденсатора:

$$C = \frac{\varepsilon \varepsilon_0 S}{d}. \quad (8)$$

Из формулы (8) следует, что для увеличения емкости конденсатора необходимо увеличить площадь обкладок и, уменьшив расстояние между ними, внести диэлектрик.

III. Виды конденсаторов

Существуют конденсаторы постоянной и переменной емкости. Конденсаторы постоянной емкости состоят из двух или нескольких пластин, отделенных друг от друга диэлектриком (рис. 186). Пластины представляют собой металлическую фольгу, диэлектриком могут служить бумага, слюда, лак. В зависимости от использованного материала различают бумажные, слюдяные, электролитические конденсаторы (рис. 187). Конденсаторы переменной емкости состоят из двух групп пластин, соединенных осью (рис. 188). При вращении оси площадь перекрытия пластин и расстояние между ними изменяется. Такая конструкция позволяет плавно изменять емкость конденсатора.

IV. Параллельное соединение конденсаторов

Для получения различных значений емкостей используют различные соединения конденсаторов. В случае параллельного соединения все конденсаторы

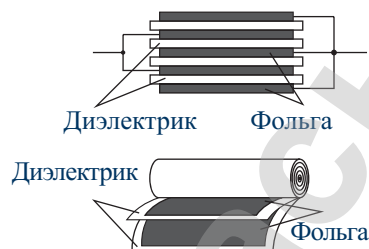


Рис. 186. Плоский конденсатор



Рис. 187. Металлобумажный и алюминиевый электролитический конденсаторы

Таблица 13. Диэлектрическая проницаемость материалов, используемых в конденсаторах

Вещество	ε
Воздух	1,0005
Бумага	от 2,5 до 3,5
Стекло	от 3 до 10
Слюда	от 5 до 7
Порошки оксидов металлов	от 6 до 20



Рис. 188. Конденсатор переменной емкости

заряжаются до одной и той же разности потенциалов (рис. 189).

$$U = \varphi_1 - \varphi_2.$$

Таким образом,

$$U = U_1 = U_2 = \dots = U_n \quad (9)$$

Если емкости конденсаторов отличаются, то на каждом из них накапливается разный по значению заряд:

$$q_1 = C_1 U; q_2 = C_2 U, \dots, q_n = C_n U. \quad (10)$$

Общий заряд определяется суммой зарядов на каждом конденсаторе:

$$q = q_1 + q_2 + \dots + q_n = \sum_{i=1}^n q_i. \quad (11)$$

Подставим (10) в (11) и, учитывая (9), получим:

$$C = C_1 + C_2 + \dots + C_n,$$

где n – число конденсаторов.

Емкость параллельно соединенных конденсаторов равна сумме емкостей отдельных конденсаторов.

Из (9) и (10) следует:

$$\frac{q_1}{q_2} = \frac{C_1}{C_2}.$$

Чем больше емкость конденсатора, тем больший заряд накапливается в нем при одном и том же значении напряжения.

V. Последовательное соединение конденсаторов

Рассмотрим последовательное соединение конденсаторов (рис. 190). Передадим заряд на обкладку первого конденсатора. Тогда на всех последующих обкладках будет индуцироваться заряд равного значения, но противоположного знака по отношению к предыдущей пластине. Сумма зарядов на всех пластинах будет равна заряду на одном конденсаторе, следовательно:

$$q = q_1 = q_2 = \dots = q_n. \quad (12)$$

Напряжение на каждом конденсаторе определяется его емкостью:

$$U_1 = \frac{q}{C_1}; U_2 = \frac{q}{C_2}; \dots U_n = \frac{q}{C_n}. \quad (13)$$

Общее напряжение всех конденсаторов равно сумме напряжений на каждом из них:

$$U = U_1 + U_2 + \dots + U_n. \quad (14)$$

Подставим (13) в (14) и, учитывая равенство зарядов в конденсаторах (12), получим:

$$\frac{1}{C} = \frac{1}{C_1} + \frac{1}{C_2} + \dots + \frac{1}{C_n}. \quad (15)$$

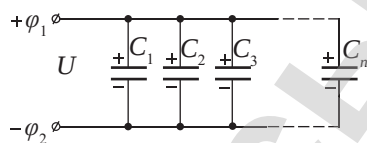


Рис. 189. Параллельное соединение конденсаторов

Возьмите на заметку

В случае равенства емкостей общая емкость конденсаторов при параллельном соединении равна:

$$C = nC_1.$$

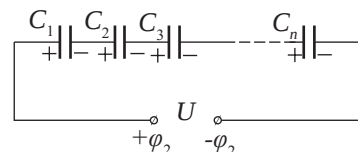


Рис. 190. Последовательное соединение конденсаторов

Возьмите на заметку

Для двух конденсаторов различной емкости из формулы (15) получим:

$$C = \frac{C_1 C_2}{C_1 + C_2}.$$

В случае равенства емкостей:

$$C = \frac{C_1}{n},$$

где n – число конденсаторов.

При параллельном соединении величина, обратная общей емкости конденсаторов, равна сумме величин, обратных емкостям отдельных конденсаторов.

Из (12) и (13) следует:

$$C_1 U_1 = C_2 U_2 \quad \text{или} \quad \frac{C_1}{C_2} = \frac{U_2}{U_1}.$$

Чем больше емкость конденсатора, тем меньше на нем напряжение при одном и том же значении заряда.



Ответьте на вопросы

1. Почему при параллельном соединении конденсаторов их общая емкость возрастает, а при последовательном – уменьшается?
2. Почему широкое применение получили плоские конденсаторы, а не сферические?
3. Почему на всех обкладках конденсаторов, соединенных последовательно, накапливается один и тот же по значению заряд?

Контрольные вопросы

1. Что такое электрическая емкость? В чем она измеряется?
2. Какой прибор служит для накопления зарядов? Из чего он состоит?
3. Какие виды конденсаторов вам известны?
4. Укажите основные закономерности последовательного и параллельного соединения конденсаторов.



Упражнение

34

1. Конденсатор, состоящий из двух пластин, имеет электроемкость 5 пФ. Какой заряд находится на каждой из его обкладок, если разность потенциалов между ними 1000 В?
2. Плоский конденсатор с размером пластин 25×25 см и расстоянием между ними 0,5 мм заряжен от источника напряжения до разности потенциалов 10 В и отключен от источника. Какова будет разность потенциалов, если пластины конденсатора раздвинуть на расстояние 5 мм?
3. Имеются три различных конденсатора. Электроемкость одного из них 2 мкФ. Когда все три конденсатора соединены последовательно, электроемкость соединения равна 1 мкФ. Когда конденсаторы соединены параллельно, то электроемкость цепи 11 мкФ. Определите электроемкость двух неизвестных конденсаторов.
4. Электрическая схема, состоящая из двух последовательно соединенных незаряженных конденсаторов электроемкостью 1 мкФ и 3 мкФ, присоединена к источнику постоянного напряжения 220 В. Определите напряжение на каждом конденсаторе сразу после их подключения.
5. Конденсатор электроемкостью 4 мкФ заряжен до напряжения 10 В. Какой заряд будет на обкладках этого конденсатора, если к нему подключить другой конденсатор электроемкостью 6 мкФ, заряженный до напряжения 20 В? Соединены обкладки, имеющие разноименные заряды.

§ 35. Энергия электрического поля

Ожидаемый результат

Прочитав параграф, вы сможете:

- рассчитывать энергию электрического поля.



Возьмите на заметку

Энергия электрического поля конденсатора аналогична потенциальной энергии деформированной пружины:

$$W = \frac{kx^2}{2} = \frac{F^2}{2k} = \frac{Fx}{2}.$$



Задание 1

Сравните формулы расчета энергии электрического поля с потенциальной энергией деформированной пружины. Установите аналогию величин.



Ответьте на вопрос

Почему энергия конденсатора локализована в пространстве между обкладками конденсатора? Для ответа воспользуйтесь формулой расчета плотности энергии электрического поля.

I. Энергия электрического поля

Заряженный конденсатор обладает запасом потенциальной энергии, равной работе, совершенной при его зарядке. Работу, которую необходимо совершить при зарядке, можно определить как работу по раздвижению пластин от нулевого расстояния до расстояния d . Рассмотрим движение одной пластины с зарядом q в поле другой пластины напряженностью E_1 , которая составляет половину напряженности поля между двумя пластинами $E_1 = \frac{E}{2}$. Сила по перемещению пластины равна $F = qE_1 = \frac{qE}{2}$, совершенная работа: $A = Fd = \frac{qEd}{2}$.

Учитывая, что $U = Ed$, получим $A = \frac{qU}{2}$. Следовательно, энергия поля, созданного между обкладками конденсатора, равна: $W = \frac{qU}{2}$. (1)

Используя формулу связи заряда и напряжения $q = CU$, запишем энергию поля в виде:

$$W = \frac{CU^2}{2} \quad (2)$$

и
$$W = \frac{q^2}{2C}. \quad (3)$$

Формула (2) используется в случае, когда конденсатор подключен к источнику тока и напряжение на его обкладках не меняется. Формула (3) удобна для расчетов в том случае, когда конденсатор отключен от источника тока и его заряд остается постоянным по величине.

II. Плотность энергии

Плотность энергии созданного поля равна:

$$\omega = \frac{W}{V}. \quad (4)$$

Получим связь плотности энергии с напряженностью поля:

$$\omega = \frac{CU^2}{2V} = \frac{\varepsilon\varepsilon_0 SE^2 d^2}{d \cdot 2V}.$$

Учитывая, что $Sd = V$, имеем:

$$\omega = \frac{\varepsilon\varepsilon_0 E^2}{2}. \quad (5)$$

Плотность энергии прямо пропорциональна квадрату напряженности.

III. Исследование зависимости энергии конденсатора от емкости и напряжения экспериментальным путем

Для проведения исследования необходимо из пробирки и трубки малого диаметра изготовить самодельный газовый термометр. В пробке от пробирки сделать сквозные отверстия для трубки с каплей подкрашенной воды и для двух концов проволоки. В пробирку поместить спираль из металла, концы которой вывести через отверстия в пробке. Закрыть пробирку пробкой. Через двухполюсный ключ подключить к спирали конденсатор. Для зарядки конденсатора можно использовать источник постоянного тока, подключенный к конденсатору через второй полюс ключа. Замер энергии конденсатора производится по тепловому действию при его разрядке. При разрядке конденсатора спираль и воздух в пробирке нагреваются, давление в пробирке повышается, капля в стеклянной трубке поднимается. Увеличение емкости конденсатора в два раза приводит к изменению высоты подъема капли в трубке в два раза. При замене конденсатора на конденсатор с вдвое большей емкостью перемещение увеличивается вдвое.

IV. Определение энергии по графику зависимости заряда, переданного конденсатору, от напряжения на его обкладках

На рисунке 191 дан график, построенный при исследовании зависимости напряжения на обкладках от переданного конденсатору заряда. На основании формулы $W = \frac{qU}{2}$ можно утверждать, что площадь фигуры под графиком численно равна энергии электрического поля конденсатора. В момент передачи заряда $q = 4 \cdot 10^{-4}$ Кл энергия электрического поля между обкладками конденсатора составила $W = 0,04$ Дж.

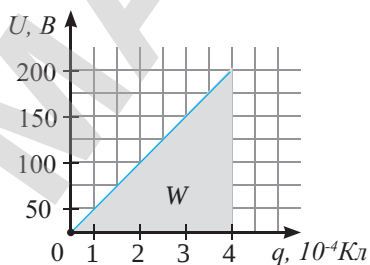


Рис. 191. График зависимости напряжения на обкладках конденсатора от переданного заряда



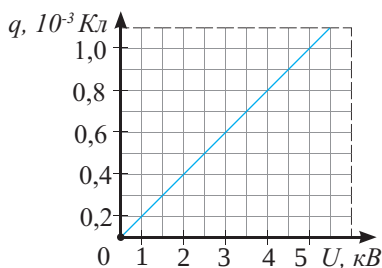
Задание 2

1. Изобразите силовые линии полей, созданных обкладками плоского конденсатора. Докажите, что напряженность электрического поля за пределами конденсатора равна нулю.
2. Используя формулу (4) запишите единицу измерения объемной плотности энергии. Какая величина имеет такую же единицу измерения?



Эксперимент

1. Изобразите схему установки для исследования зависимости энергии конденсатора от емкости и напряжения, описанной в III части параграфа.
2. Исследуйте зависимость энергии электрического поля конденсатора:
 - а) от емкости конденсатора при постоянном значении напряжения;
 - б) от напряжения на обкладках конденсатора при постоянном значении емкости.
3. Постройте графики зависимости энергии конденсатора от указанных величин по снятым результатам.
4. Сравните полученные результаты с теоретическими выводами.



Задание 3

По графику, изображенному на рисунке 192, определите энергию электрического поля и емкость конденсатора.

Рис. 192. График зависимости заряда на обкладках конденсатора от приложенного напряжения

ПРИМЕР РЕШЕНИЯ ЗАДАЧИ

Энергия плоского воздушного конденсатора $W_1 = 2 \cdot 10^{-7}$ Дж. Определите энергию конденсатора после заполнения его диэлектриком с диэлектрической проницаемостью $\varepsilon = 2$, если:

- 1) конденсатор отключен от источника питания;
- 2) конденсатор подключен к источнику питания.

Дано:

$$W_1 = 2 \cdot 10^{-7} \text{ Дж}$$

$$\varepsilon = 2$$

$$1) q = \text{const}$$

$$2) U = \text{const}$$

$$W_2 - ? \text{ при } q = \text{const}$$

$$W_3 - ? \text{ при } U = \text{const}$$

Решение:

Емкость конденсатора после заполнения диэлектриком увеличится в 2 раза:

$$C_2 = 2C_1.$$

В первом случае конденсатор отключен от источника, следовательно, его заряд не меняется, тогда энергию конденсатора определим по формуле:

$$W_2 = \frac{q^2}{2C_2} = \frac{q^2}{2 \cdot 2C_1} = \frac{W_1}{2}.$$

Энергия конденсатора уменьшилась в 2 раза:

$$W_2 = 10^{-7} \text{ Дж.}$$

Во втором случае, при подключенном к источнику конденсаторе, напряжение на обкладках конденсатора остается постоянной величиной. Энергия конденсатора равна:

$$W_3 = \frac{C_2 U^2}{2} = \frac{2C_1 U^2}{2} = 2W_1.$$

Энергия конденсатора увеличилась в 2 раза:

$$W_3 = 4 \cdot 10^{-7} \text{ Дж.}$$

Ответ: при $q = \text{const}$ $W_2 = 10^{-7}$ Дж;
при $U = \text{const}$ $W_3 = 4 \cdot 10^{-7}$ Дж.

Контрольные вопросы

1. Как определяется энергия электрического поля?
2. В какой части конденсатора сосредоточена вся энергия электрического поля?
3. Как определяется плотность энергии электрического поля?
4. Назовите единицы измерения плотности энергии электрического поля.

★ Упражнение

35

1. Конденсатору емкостью 20 мкФ сообщили заряд 5 мкКл. Какова энергия заряженного конденсатора?
2. Электроемкость конденсатора, подключенного к источнику постоянного напряжения $U = 1000$ В, равна $C_1 = 5$ пФ. Расстояние между его обкладками уменьшили в $n = 3$ раза. Определите изменение заряда на обкладках конденсатора и энергии электрического поля.
3. Пластины воздушного конденсатора отсоединили от источника тока, раздвинули вдвое и заполнили зазор диэлектриком с диэлектрической проницаемостью, равной 4. Во сколько раз уменьшилась энергия электрического поля в конденсаторе?
4. Пластины плоского конденсатора, площадью 200 см² каждая, расположены на расстоянии 1 см. Какова энергия поля, если его напряженность 500 кВ/м?
5. Конденсатору электроемкостью 2 мкФ сообщен заряд 10^{-3} Кл. Обкладки конденсатора соединили проводником. Определите количество теплоты, выделившееся в проводнике при разрядке конденсатора, и разность потенциалов между обкладками до и после разрядки.

Творческое задание

Подготовьте сообщение по темам (на выбор):

1. Производство конденсаторов на предприятиях РК.
2. Назначение силовых конденсаторов и конденсаторных установок (рис. 193).



Рис. 193. Конденсаторы казахстанского производства, г. Усть-Каменогорск

Итоги главы 10

Законы	Характеристики электрического поля	
	Напряженность	Потенциал
Закон сохранения заряда $q_1 + q_2 + q_3 + \dots + q_n = const$ $q = N e $ Закон Кулона $F_K = \frac{1}{4\pi\epsilon_0\epsilon} \frac{ q_1 q_2 }{r^2}$ $F_K = \frac{k q_1 q_2 }{\epsilon r^2}$ Принцип суперпозиции полей $\vec{E} = \vec{E}_1 + \vec{E}_2 + \dots + \vec{E}_n$ $\varphi = \varphi_1 + \varphi_2 + \dots + \varphi_n$ Теорема Гаусса $\Phi_E = \frac{\sum_{i=1}^n q_i}{\epsilon\epsilon_0}$	$\vec{E} = \frac{\vec{F}}{q}$ Напряженность поля точечного заряда $E = \frac{q}{4\pi\epsilon\epsilon_0 r^2}$ $E = \frac{kq}{\epsilon r^2}$ Напряженность поля бесконечной пластины $E = \frac{q}{2\epsilon\epsilon_0 S}$ $E = \frac{\sigma}{2\epsilon\epsilon_0}$ $\sigma = \frac{q}{S} - \text{поверхностная плотность заряда}$ Напряженность поля между двумя разноименными пластинами $E = \frac{q}{\epsilon\epsilon_0 S}$ $E = \frac{\sigma}{\epsilon\epsilon_0}$	$\varphi = \frac{W_p}{q}$ Потенциал поля точечного заряда $\varphi = \frac{q}{4\pi\epsilon\epsilon_0 r}$ $\varphi = \frac{kq}{\epsilon r}$ Потенциал однородного поля $\varphi = Ed$
Потенциальная энергия заряда в поле, работа по перемещению заряда		Работа и потенциал поля
в однородном поле	в неоднородном поле	
$W_p = qEd$ $A = -(qEd_2 - qEd_1)$	$W_p = \frac{kQq}{r}$ $A = \frac{kQq}{r_1} - \frac{kQq}{r_2}$	$A = q(\varphi_1 - \varphi_2)$ $U = \varphi_1 - \varphi_2$ $A = qU$

Емкость проводников	Основные закономерности соединения конденсаторов:	
	последовательного	параллельного
Емкость уединенного проводника $C = \frac{q}{\varphi}$	$U = U_1 + U_2 + \dots + U_n$ $q = q_1 = q_2 = \dots = q_n$ $\frac{1}{C} = \frac{1}{C_1} + \frac{1}{C_2} + \dots + \frac{1}{C_n}$	$U = U_1 = U_2 = \dots = U_n$ $q = q_1 + q_2 + \dots + q_n = \sum_{i=1}^n q_i$ $C = C_1 + C_2 + \dots + C_n$
Емкость уединенного шара $C = 4\pi\epsilon_0 r$	$C = \frac{C_1 C_2}{C_1 + C_2}$	$C = nC_1$
Емкость сферического конденсатора $C = \frac{4\pi\epsilon_0 r_1 r_2}{r_2 - r_1}$	$C = \frac{C_1}{n}$ $\frac{C_1}{C_2} = \frac{U_2}{U_1}$	$\frac{q_1}{q_2} = \frac{C_2}{C_1}$
Емкость плоского конденсатора $C = \frac{\epsilon\epsilon_0 S}{d}$		
Диэлектрическая проницаемость среды	Энергия и плотность энергии электрического поля конденсатора	
$\epsilon = \frac{F_0}{F}; \quad \epsilon = \frac{E_0}{E}$	$W = \frac{qU}{2}; \quad W = \frac{CU^2}{2}; \quad W = \frac{q^2}{2C}; \quad \omega = \frac{\epsilon\epsilon_0 E^2}{2}$	

Законы

Закон сохранения заряда

Алгебраическая сумма электрических зарядов любой замкнутой системы остается неизменной, какие бы процессы не происходили внутри этой системы.

Закон Кулона

Сила взаимодействия двух точечных зарядов направлена вдоль прямой линии, соединяющей заряды, прямо пропорциональна произведению обоих зарядов и обратно пропорциональна квадрату расстояния между ними.

Принцип суперпозиции полей

Напряженность электрического поля, созданного системой зарядов в данной точке пространства, равна векторной сумме напряженностей электрических полей каждого заряда в отдельности.

Потенциал поля, созданного несколькими зарядами, равен алгебраической сумме потенциалов полей каждого из них.

Теорема Гаусса

Поток напряженности через замкнутую поверхность произвольной формы численно равен алгебраической сумме свободных электрических зарядов, заключенных внутри этой поверхности, поделенной на $\epsilon\epsilon_0$.

Глоссарий

Диполь – система смещенных относительно друг от друга связанных зарядов, образующих собственное поле.

Диэлектрики – вещества, в которых нет свободных заряженных частиц.

Диэлектрическая проницаемость среды – физическая величина, которая показывает, во сколько раз напряженность поля в диэлектрике меньше, чем в вакууме.

Ион отрицательный – атом с избыточным количеством электронов.

Ион положительный – атом, потерявший часть электронов.

Конденсатор – устройство для накопления заряда и энергии электрического поля. Состоит из двух пластин, разделенных диэлектриком, толщина которого мала по сравнению с размерами обкладок.

Кулон – электрический заряд, проходящий через поперечное сечение проводника при силе тока 1 А за время 1 с.

Напряженность электрического поля – физическая величина, равная отношению силы, с которой поле действует на положительный пробный заряд, помещенный в данную точку пространства, к величине этого заряда.

Поток вектора напряженности – величина, равная полному числу силовых линий, пронизывающих площадку.

Потенциал поля – энергетическая характеристика поля. Он характеризует потенциальную энергию, которой обладал бы положительный единичный заряд, помещенный в данную точку поля.

Проводники – вещества, в которых есть свободные носители зарядов.

Силовые линии электрического поля – линии, касательные к которым в каждой точке совпадают с направлением векторов напряженности в этих точках.

Полярные молекулы – молекулы, в которых центры расположения отрицательных и положительных зарядов смещены относительно друг друга.

Поляризация – процесс смещения зарядов в диэлектрике, помещенном в электрическое поле.

Точечные заряды – заряженные тела, размеры которых намного меньше расстояния между ними.

Фарад – емкость проводника, потенциал которого возрастает на 1 вольт при изменении заряда на 1 кулон.

Электрический заряд – физическая величина, определяющая способность заряженных тел принимать участие во взаимодействии с другими телами.

Эквипотенциальная поверхность – поверхность точек равного потенциала.

Электродинамика – раздел физики, изучающий электромагнитное поле и его взаимодействие с телами, имеющими электрический заряд.

Электрическое поле – вид материи, посредством которого происходит взаимодействие заряженных тел.

Электростатическое поле – электрическое поле неподвижных и не меняющихся со временем зарядов.

Электростатика – раздел электродинамики, в котором изучается взаимодействие неподвижных электрических зарядов.

Электрическая индукция – электризация проводника через влияние.

ГЛАВА 11

ПОСТОЯННЫЙ ТОК

Впервые движение заряженных частиц обнаружил итальянский ученый-биолог Луиджи Гальвани. Он наблюдал импульсивное сокращение лапки мертвой лягушки при контакте с пластинами из разнородного металла. Исследования Гальвани были продолжены Александром Вольта. Опытным путем он доказал, что между разнородными металлическими пластинами возникает ток, если опустить их в раствор соли, кислоты или щелочи. Обнаруженное движение заряженных частиц привлекло внимание многих ученых-физиков. Законы, которым подчиняются движущиеся заряды в различных средах, в основном были открыты экспериментально. Результаты исследований ученых получили широкое применение во всех отраслях промышленности и в быту. Невозможно представить наш современный мир без различных приборов и устройств, потребляющих электрический ток.

Изучив главу, вы сможете:

- применять закон Ома для участка цепи со смешанным соединением проводников;
- исследовать смешанное соединение проводников;
- исследовать связь между электродвижущей силой и напряжением источника в различных режимах его работы (рабочий режим, холостой ход, короткое замыкание);
- применять закон Ома для полной цепи;
- экспериментально определять электродвижущую силу и внутреннее сопротивление источника тока;
- применять законы Кирхгофа к разветвленным электрическим цепям;
- применять формулы работы, мощности и коэффициента полезного действия источника тока при решении задач.

§ 36. Электрический ток. Закон Ома для участка цепи. Смешанное соединение проводников

Ожидаемый результат.

Прочитав параграф, вы сможете:

- применять закон Ома для участка цепи со смешанным соединением проводников.

I. Электрический ток. Сила тока. Плотность тока

Направленное движение заряженных частиц в проводниках происходит под воздействием внешнего электрического поля.

Электрический ток – это направленное движение электрических зарядов.

Для характеристики электрического тока в проводнике введены физические величины: сила тока и плотность тока.

Сила тока – это величина, равная количеству заряда, прошедшего через поперечное сечение проводника за единицу времени.



Ответьте на вопросы

Почему тепловое движение свободных зарядов в проводнике нельзя назвать электрическим током?
При каком условии свободные заряды в проводниках движутся направленно?



Вспомните!

Единица измерения силы тока 1 ампер:

$$[I] = \frac{1 \text{ Кл}}{1 \text{ с}} = 1 \text{ А}.$$



Ответьте на вопрос

Почему мощные электрические приборы, например, утюг и микроволновую печь, подключают к сети проводами большого сечения?

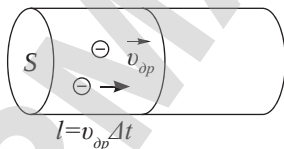


Рис. 194. Скорость дрейфа – скорость направленного движения заряженных частиц

$$I = \frac{\Delta q}{\Delta t}. \quad (1)$$

Заменим заряд произведением заряда одной частицы на их количество N:

$$\Delta q = |q_0| N, \quad (2)$$

где $|q_0|$ – заряд одной частицы. За время Δt через поперечное сечение пройдут заряды, расположенные в объеме V (рис. 194). Тогда при известном значении концентрации зарядов их число можно определить по следующей формуле:

$$N = nV, \quad (3)$$

где $V = Sl = S v_{dr} t.$ (4)

Подставив уравнения (2), (3) и (4) в (1), получим:

$$I = |q_0| n v_{dr} S. \quad (5)$$

В полученной формуле v_{dr} – скорость направленного движения заряженных частиц или *скорость дрейфа*.

Плотность тока – эта физическая величина, равная отношению силы тока к площади поперечного сечения проводника.

$$j = \frac{I}{S}. \quad (6)$$

Единица измерения плотности тока $[j] = 1 \frac{\text{А}}{\text{м}^2}.$

Плотность тока определяется концентрацией заряженных частиц, скоростью их дрейфа и величиной заряда:

$$j = |q_0| n v_{др}. \quad (7)$$

Мощные электронагревательные приборы, рассчитанные на значительные токи, подключают к сети проводами большего сечения. Это необходимо для уменьшения плотности тока в проводе во избежание его перегрева и воспламенения изоляции.

II. Закон Ома для участка цепи

На основе экспериментальных данных Г. Ом установил, что:

Сила тока на участке цепи прямо пропорциональна приложенному к нему напряжению и обратно пропорциональна сопротивлению.

$$I = \frac{\varphi_1 - \varphi_2}{R} \quad \text{или} \quad I = \frac{U}{R}. \quad (8)$$

Данную закономерность называют законом Ома для участка цепи (рис. 195).

III. Параллельное и последовательное соединение проводников

Соединение проводников называют последовательным, если начало следующего проводника соединяют с концом предыдущего (рис. 196).

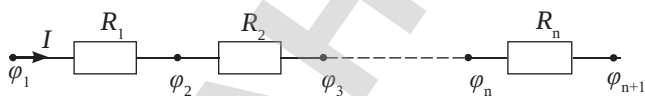


Рис. 196. Последовательное соединение проводников

При параллельном соединении начала проводников соединяют в один узел, концы – в другой (рис. 197).

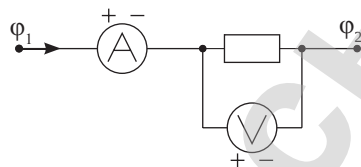


Рис. 195. Участок цепи с активным сопротивлением



Задание

Поясните правила подключения амперметра и вольтметра в электрическую цепь по рисунку 195.



Возьмите на заметку

Напряжение U – это разность потенциалов $\varphi_1 - \varphi_2$ между двумя точками цепи, не содержащих источников тока.

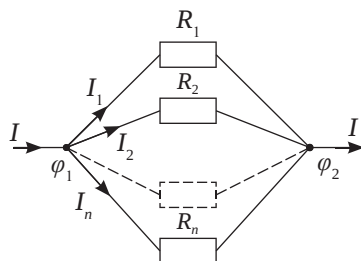


Рис. 197. Параллельное соединение проводников

Таблица 14. Формулы расчета основных характеристик электрической цепи

Соотношение величин	Вид соединения	
	последовательное	параллельное
Связь общего тока с токами на участках цепи	$I_{\text{общ.}} = I_1 = I_2 = \dots = I_n$	$I_{\text{общ.}} = I_1 + I_2 + \dots + I_n$
Связь общего напряжения с падением напряжения на участках цепи	$U_{\text{общ.}} = \varphi_1 - \varphi_{n+1};$ $U_{\text{общ.}} = U_1 + U_2 + \dots + U_n$	$U_{\text{общ.}} = \varphi_1 - \varphi_2;$ $U_{\text{общ.}} = U_1 = U_2 = \dots = U_n$
Общее сопротивление участка цепи	$R_{\text{общ.}} = R_1 + R_2 + \dots + R_n$	$\frac{1}{R_{\text{общ.}}} = \frac{1}{R_1} + \frac{1}{R_2} + \dots + \frac{1}{R_n}$
Общее сопротивление n равных по значению сопротивлений	$R_{\text{общ.}} = nR$	$R_{\text{общ.}} = \frac{R}{n}$
Сопротивление двух проводников	$R_{\text{общ.}} = R_1 + R_2$	$R = \frac{R_1 R_2}{R_1 + R_2}$
Соотношение переменных величин	$\frac{U_1}{U_2} = \frac{R_1}{R_2}$ $U_1 : U_2 : U_3 : \dots : U_n$ $R_1 : R_2 : R_3 : \dots : R_n$	$\frac{I_1}{I_2} = \frac{R_2}{R_1}$ $I_1 : I_2 : I_3 : \dots : I_n$ $\frac{1}{R_1} : \frac{1}{R_2} : \frac{1}{R_3} : \dots : \frac{1}{R_n}$

Отличить последовательное соединение от параллельного несложно, при последовательном соединении в цепи нет узлов.

Узел – это соединение трех и более проводников.

IV. Смешанное соединение проводников

Смешанное соединение проводников представляет собой сочетание последовательного и параллельного соединений. Расчет общего сопротивления цепи, распределения силы тока и напряжения по ее участкам производят с использованием формул как параллельного, так и последовательного соединения (рис. 198).

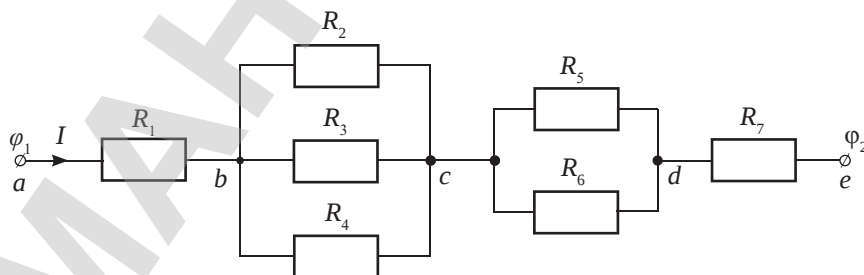


Рис. 198. Смешанное соединение проводников

На участках bc и cd соединение проводников параллельное, следовательно, расчет этих участков производится по законам параллельного соединения:

$$R_{bc} = \frac{R_2 R_3 R_4}{R_3 R_4 + R_2 R_4 + R_2 R_3}, \quad R_{cd} = \frac{R_5 R_6}{R_5 + R_6}.$$

Для удобства выполнения расчета цепи используют эквивалентные схемы. При замене отдельных сопротивлений на общее сопротивление участков цепи эквивалентная схема примет вид, изображенный на рисунке 199.

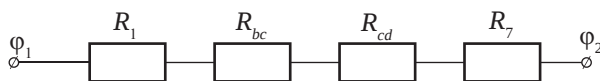


Рис. 199. Эквивалентная схема цепи, изображенной на рисунке 198

Полученная схема представляет собой последовательное соединение проводников, так как в цепи нет узлов. Общее сопротивление цепи равно сумме сопротивлений:

$$R_{\text{общ}} = R_1 + R_{bc} + R_{cd} + R_7.$$

При расчете распределения напряжения и силы тока применяют закон Ома для участка цепи.

Контрольные вопросы

1. Что такое электрический ток?
2. Назовите величины, характеризующие электрический ток, дайте им определения.
3. Сформулируйте закон Ома для участка цепи.
4. Какое соединение называют последовательным? Какое – параллельным?
5. Что называют узлом электрической цепи?



Упражнение

36

1. Через нить лампочки карманного фонаря за время $t = 2$ мин проходит заряд $q_1 = 20$ Кл. Определите силу тока и время, за которое через нить лампочки пройдет заряд $q_2 = 60$ Кл.
2. Железный провод, соединяющий острие громоотвода с землей, имеет поперечное сечение площадью $S = 1 \text{ см}^2$. Во время разряда молнии по этому проводу может проходить ток $I = 10^5$ А. Определите плотность тока в проводнике. Сравните с плотностью тока в проводнике диаметром 2 мм, по которому течет ток в 1,57 А.
3. Чему равно удельное сопротивление ρ проводника, если при силе тока $I = 1$ А падение напряжения на нем $U = 1,2$ В? Диаметр проводника $d = 0,5$ мм, длина $l = 47$ мм.
4. Есть четыре резистора одинакового сопротивления $R = 10$ Ом. Сколько существует способов их соединения? Определите эквивалентное сопротивление в каждом случае.
5. Определите общее сопротивление цепи, изображенной на рисунке 200, если $R = 4$ Ом.

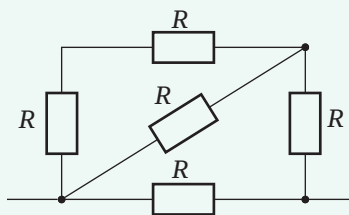


Рис. 200. К упражнению 36.5

§ 37. Электродвижущая сила и внутреннее сопротивление источника тока

Ожидаемый результат

Прочитав параграф, вы сможете:

- исследовать связь между электродвижущей силой и напряжением источника в различных режимах его работы (рабочий режим, холостой ход, короткое замыкание).



Ответьте на вопрос

При каком условии движение зарядов в проводниках становится упорядоченным?

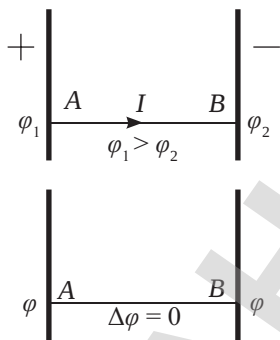


Рис. 201. Кратковременный ток между обкладками конденсатора

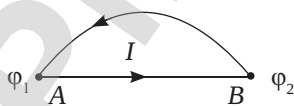


Рис. 202. Принцип действия электрической цепи

1. Условия возникновения и существования постоянного электрического тока

Соединим пластины заряженного конденсатора проводником AB , в проводнике появится электрический ток. После разрядки конденсатора разность потенциалов на концах проводника станет равной нулю, ток прекратится (рис. 201). Для поддержания тока в цепи необходимо создать разность потенциалов на его концах: перенести заряды обратно по другому проводу, создав замкнутую цепь (рис. 202). Перенос заряда из точки B в точку A возможен только с помощью сторонних сил неэлектрического происхождения, так как потенциал точки B меньше потенциала точки A .

Процессы, происходящие в проводнике, аналогичны движению тела по наклонной плоскости. Под действием силы тяжести тело перемещается с более высокого уровня на более низкий. Для возобновления движения скатившегося тела его необходимо вновь поднять на вершину наклонной плоскости. Такое перемещение возможно под действием внешней сторонней силы, отличной от силы тяжести. При подъеме тела сила тяжести совершает отрицательную работу.

На рисунке 203 изображена принципиальная схема электрической цепи. Внутри источника тока работа по перемещению заряда к полюсам совершается сторонними силами. Работа кулоновских сил отрицательная. Во внешней цепи заряды перемещаются под действием кулоновских сил. Положительные заряды перемещаются от положительного полюса источника к отрицательному полюсу. Отрицательные частицы – от отрицательного полюса к положительному.



Рис. 203. Принципиальная схема электрической цепи

Итак, необходимым условием для получения постоянного тока является наличие замкнутой проводящей цепи с источником тока. В состав цепи входят: источник тока, потребители тока, соединительные провода, выключатель и измерительные приборы.

II. Электродвижущая сила источника электрической энергии

В источнике тока происходит превращение различных видов энергии в электрическую энергию. Согласно закону сохранения энергии работа сторонних сил равна работе кулоновских сил на внутреннем и внешнем участке цепи:

$$A_{cm} = A_r + A_R$$

Поделив уравнение на заряд, перенесенный по замкнутому контуру, получим:

$$\frac{A_{cm}}{q} = \frac{A_r}{q} + \frac{A_R}{q} \quad \text{или} \quad \mathcal{E} = U_r + U_R,$$

где $\mathcal{E}$ – электродвижущая сила, U_r – падение напряжения на внутреннем участке цепи, U_R – падение напряжения на внешнем участке цепи.

Электродвижущая сила – это физическая величина, равная работе сторонних сил по перемещению единичного заряда.

$$\mathcal{E} = \frac{A_{cm}}{q}.$$

Единица измерения $\mathcal{E}$ (ЭДС) – вольт, $[\mathcal{E}] = 1 \text{ В}$.

III. ЭДС и напряжение источника тока в различных режимах работы

1. *Режим холостого хода.* ЭДС источника тока измеряют непосредственным подключением к нему вольтметра при разомкнутой внешней цепи, в режиме холостого хода (рис. 204). В разомкнутой цепи ток отсутствует, следовательно, нет падения напряжения на внешнем участке цепи, на внутреннем участке оно ничтожно мало:

$$U_R = 0, \quad U_r = 0$$

Сопротивление вольтметра бесконечно велико, его подключение к источнику практически не влияет на разность потенциалов между полюсами источника. Напряжение на вольтметре равно ЭДС:

$$\varphi_A - \varphi_B = \mathcal{E}.$$



Ответьте на вопросы

1. Почему для восстановления разности потенциалов между точками А и В (рис. 202) необходима работа сторонних сил?
2. Почему совершение работы по распределению зарядов в источнике тока за счет кулоновских сил невозможно?
3. Почему работа сторонних сил в источнике тока равна сумме работы кулоновских сил на внешнем и внутреннем участке цепи?



Эксперимент

1. Соберите цепь по схеме, изображенной на рисунке 204. Снимите показание вольтметра при замкнутом и разомкнутом ключе. Почему показание вольтметра при замкнутом ключе уменьшается?
2. Подключите в цепь реостат последовательно с резистором. Меняя положение ползуна, исследуйте распределение напряжения на внутренней и внешней части цепи. По полученным результатам сделайте выводы.

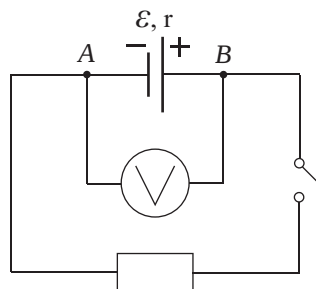


Рис. 204. Измерение ЭДС источника тока

2. *Рабочий режим.* При замкнутом ключе в рабочем режиме разность потенциалов между точками АВ будет равна:

$$\varphi_A - \varphi_B = \mathcal{E} - U_r, \text{ или } \varphi_A - \varphi_B = U_R,$$

вольтметр покажет напряжение на внешнем участке цепи. Падение напряжения внутри источника происходит из-за отрицательной работы электрических сил.

3. *Режим короткого замыкания.* Если сопротивление нагрузки ничтожно мало, то источник тока работает в режиме короткого замыкания. Напряжение на внутреннем участке цепи будет равно ЭДС:

$$U_r = \mathcal{E}.$$

Сила тока в источнике резко возрастает и достигает максимального значения:

$$I_{\text{к.з.}} = \frac{\mathcal{E}}{r}.$$

Режимы короткого замыкания и холостого хода являются предельными режимами работы источника тока.

IV. Последовательное и параллельное соединение источников тока

При последовательном соединении источников тока (рис. 205) внутреннее сопротивление батареи определяют суммой сопротивлений каждого из них:

$$r_{\text{общ}} = r_1 + r_2 + \dots + r_n.$$

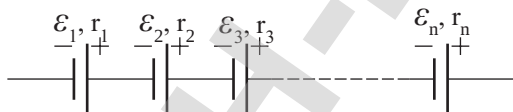


Рис. 205. Последовательное соединение источников тока

ЭДС батареи в этом случае равна:

$$\mathcal{E}_{\text{общ}} = \mathcal{E}_1 + \mathcal{E}_2 + \dots + \mathcal{E}_n.$$

При параллельном соединении одинаковых источников тока (рис. 206) ЭДС батареи определяется как ЭДС одного из них: $\mathcal{E}_{\text{общ}} = \mathcal{E}_1$, а общее значение внутреннего сопротивления равно отношению сопротивления одного источника к их числу:

$$r_{\text{общ}} = \frac{r}{n}.$$

? Ответьте на вопросы

1. Почему явление короткого замыкания считают опасным?
2. Почему внутреннее сопротивление источника тока стремятся уменьшить в сравнении с сопротивлением внешней цепи?

? Ответьте на вопрос

Почему потенциал участка цепи возрастает, если ток внутри источника тока направлен от отрицательного полюса к положительному?

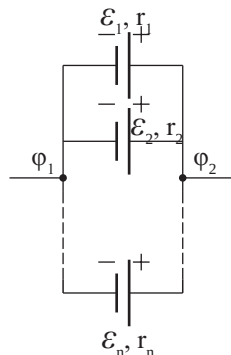


Рис. 206. Параллельное соединение источников тока

? Ответьте на вопрос

Почему наряду с последовательным соединением источников тока получило применение параллельное, не зависимо от того, что общее значение ЭДС при этом не увеличивается?

Контрольные вопросы

1. Укажите условия, при которых возможен электрический ток.
2. Какие силы совершают работу по распределению зарядов в источниках тока?
3. Как измеряют ЭДС источника тока?
4. Как распределение напряжений на внутреннем и внешнем участке цепи зависит от их сопротивлений?



Упражнение

37

1. Конденсатор емкостью $C = 100$ мкФ, заряженный до напряжения $U = 300$ В разряжается за время $\Delta t = 0,1$ с. Определите среднее значение силы тока при разряде конденсатора.
2. Конденсатор емкостью 100 мкФ заряжается до напряжения 500 В за $0,5$ с. Каково среднее значение силы зарядного тока?
3. Батарея аккумуляторов состоит из $n = 8$ элементов, соединенных последовательно. ЭДС каждого из элементов $\mathcal{E} = 1,5$ В, внутреннее сопротивление $r = 0,25$ Ом. Внешнюю цепь образуют два параллельно соединенных проводника сопротивлениями $R_1 = 10$ Ом и $R_2 = 50$ Ом. Определите напряжение на зажимах батареи.
4. Десять источников тока с внутренним сопротивлением $r = 1$ Ом, каждый сначала соединили последовательно и замкнули на внешнее сопротивление R , затем параллельно и замкнули на то же внешнее сопротивление. Определите сопротивление R , если сила тока в цепи возросла в 5 раз. С какой целью источники тока соединяют параллельно? С какой целью последовательно?
5. Две группы из трех последовательно соединенных элементов соединены параллельно. ЭДС каждого элемента равна $1,2$ В, внутреннее сопротивление $r = 0,2$ Ом. Полученная батарея замкнута на внешнее сопротивление $R = 1,5$ Ом. Определите силу тока во внешней цепи.

Творческое задание

Подготовьте сообщение (на выбор):

1. «Техника безопасности в работе с источниками тока».
2. «Альтернативные источники тока и правила их использования».

§ 38. Закон Ома для полной цепи

Ожидаемый результат

Прочитав параграф, вы сможете:

- применять закон Ома для полной цепи.

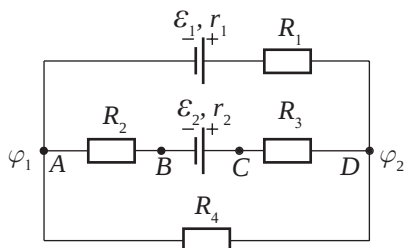


Рис. 207. Схема участка цепи, ветви которой содержат источники тока

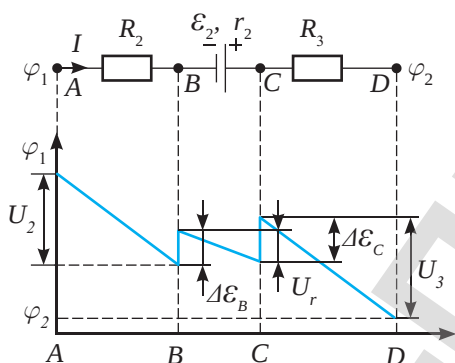


Рис. 208. Скачки напряжений на полюсах источника тока при его прямом подключении в цепь

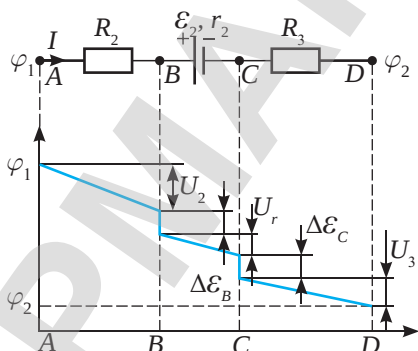


Рис. 209. Скачки напряжений на полюсах источника тока при его обратном подключении в цепь

I. Закон Ома для участка цепи с источником тока

Рассмотрим участок цепи, в котором содержится источник тока с электродвижущей силой $\mathcal{E}_2$ и внутренним сопротивлением r_2 (рис. 207). По указанному участку цепи ток течет слева направо, если $\mathcal{E}_2 > \mathcal{E}_1$, тогда $\varphi_1 > \varphi_2$. Падение потенциала на указанном участке происходит на сопротивлениях R_2 , r_2 и R_3 , а скачок потенциала – на полюсах источника тока. Аналогичные явления мы наблюдаем, если в русле реки построена плотина: на всех участках реки уровень воды понижается, а на плотине повышается. На рисунке 208 изображены скачки потенциала на полюсах источника тока и падение напряжения на рассматриваемом участке цепи. Скачки потенциала на полюсах равны ЭДС источника тока:

$$\Delta \mathcal{E}_B + \Delta \mathcal{E}_C = \mathcal{E}_2. \quad (1)$$

Разность потенциалов на концах участка цепи равна разности суммы падений потенциала на каждом участке и скачка потенциала на источнике:

$$\varphi_1 - \varphi_2 = (U_2 + U_r + U_3) - \mathcal{E}_2$$

$$\text{или } \varphi_1 - \varphi_2 = (IR_2 + Ir + IR_3) - \mathcal{E}_2. \quad (2)$$

Выразим из полученного уравнения силу тока:

$$I = \frac{(\varphi_1 - \varphi_2) + \mathcal{E}_2}{(R_2 + R_3) + r}. \quad (3)$$

В общем случае выражение (3) можно записать в виде:

$$I = \frac{U + \mathcal{E}}{R + r}, \quad (4)$$

где R – общее сопротивление участка цепи, r – общее сопротивление внутренних сопротивлений источников тока на участке цепи, $U = \varphi_1 - \varphi_2$ разность потенциалов на концах участка цепи, $\mathcal{E}$ – общее значение ЭДС источников на данном участке.

Полученная формула выражает закон Ома для участка цепи, содержащего источник тока.

Необходимо учесть, что изменение полюсов при подключении источника влияет на характер

скачка напряжения. На *рисунке 209* изображен скачок напряжения при обратном подключении источника. В этом случае сила тока будет равна:

$$I = \frac{U - \varepsilon}{R + r}. \quad (5)$$

Происходит резкое понижение потенциала на источнике тока аналогично снижению уровня воды в реке на водопаде.

II. Частные случаи обобщенного закона Ома. Закон Ома для полной цепи

- 1) Запишем уравнение (4) для случая, когда на участке цепи нет источника тока. Учтем, что $\varepsilon = 0$, $r = 0$,

тогда $I = \frac{U}{R}$. Мы получили закон, сформулиро-

ванный Г. Омом для простого участка цепи. Для ветки, содержащей сопротивление R_4 (*рис. 207*) применим закон Ома для простого участка цепи:

$$I_4 = \frac{\varphi_1 - \varphi_2}{R_4} = \frac{U}{R_4}.$$

- 2) Соединим концы участка цепи, изображенного на *рисунке 208*, получим замкнутую цепь (*рис. 210*). Потенциалы точек A и D станут равными, тогда $U = \varphi_1 - \varphi_2 = 0$, формула (4) примет вид:

$$I = \frac{\varepsilon}{R + r}. \quad (6)$$

Полученное выражение принято называть законом Ома для полной цепи.

Сила тока в цепи прямо пропорциональна ЭДС источника тока и обратно пропорциональна сумме внешнего и внутреннего сопротивления.



Ответьте на вопрос

Почему потенциалы точек A и D при их соединении становятся равными?

III. Следствия из законов Ома для полной цепи

Из (6) следует, что:

$$\varepsilon = IR + Ir$$

или $\varepsilon = U_R + U_r$ (7)

Поскольку ЭДС – это работа сторонних сил по перемещению заряда, то из (7) следует, что



Ответьте на вопрос

Как источник тока, подключенный в ветвь, влияет на силу тока в цепи?

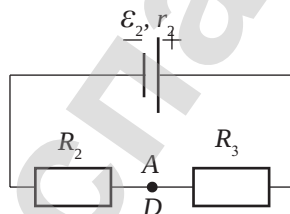


Рис. 210. Замкнутая цепь, содержащая источник тока



Интересно знать!

За рубежом, особенно во Франции и Англии, работы Ома долгое время оставались неизвестными. Через 10 лет после появления его работы французский физик Пулье на основе экспериментов пришел к таким же выводам. Но Пулье было доказано, что установленный им закон еще в 1827 г. был открыт Омом. Любопытно, что французские школьники и поныне изучают закон Ома под именем закона Пулье.



Возьмите на заметку

Сила тока, опасная для жизни человека, равна 0,05 А. Сопротивление человеческого тела между его руками изменяется в зависимости от его самочувствия, опускаясь до 800 Ом. Следовательно, человек может погибнуть при напряжении уже в 40 В.

сторонние силы совершают работу как на внутреннем, так и на внешнем участке цепи.

При малых значениях внутреннего сопротивления $r \rightarrow 0$ вся энергия источника используется на внешнем участке цепи $\mathcal{E} = U$. При малых значениях внутреннего сопротивления и отсутствии нагрузки $R = 0$ значение силы тока в замкнутой цепи резко возрастает, происходит короткое замыкание (смотрите §37).

ПРИМЕР РЕШЕНИЯ ЗАДАЧИ

Три одинаковых источника тока, ЭДС которых равна $\mathcal{E}$, а внутреннее сопротивление равно r , соединены, как показано на рисунке 1, а. Найдите разность потенциалов между точками A и B , в случае, когда сопротивлением подводящих проводов можно пренебречь, и в случае, когда между точками A и B находится резистор сопротивлением R (рис. 1, б).

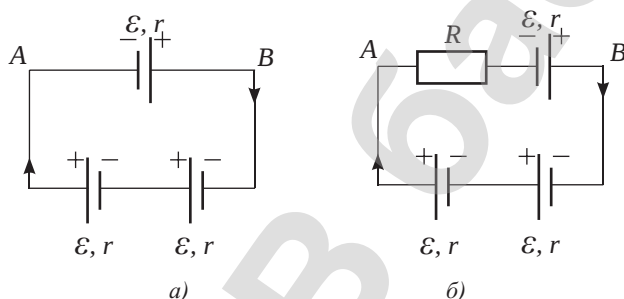


Рис. 1

Дано:

$$\begin{aligned}\mathcal{E}_1 = \mathcal{E}_2 = \mathcal{E}_3 = \mathcal{E} \\ r_1 = r_2 = r_3 = r \\ R\end{aligned}$$

$\varphi_1, \varphi_2 - ?$

Решение:

Согласно закону Ома для полной цепи: $I = \frac{3\mathcal{E}}{3r} = \frac{\mathcal{E}}{r}$.

Тогда $\Delta\varphi_1 = \varphi_A - \varphi_B = I \cdot r - \mathcal{E} = 0$.

Когда между точками A и B находится резистор, то $I = \frac{3\mathcal{E}}{3r + R}$

и $\Delta\varphi_2 = \varphi_A - \varphi_B = \frac{3\mathcal{E}}{3r + R}(r + R) - \mathcal{E} = \frac{2\mathcal{E}R}{R + 3r}$.

Ответ: $\varphi_1 = 0$; $\varphi_2 = \frac{2\mathcal{E}R}{R + 3r}$.

Контрольные вопросы

1. Сформулируйте закон Ома для участка цепи, содержащего источник тока.
2. Какой ток принято называть током короткого замыкания?
3. Как зависит распределение напряжений на внутреннем и внешнем участке цепи от их сопротивлений?

1. ЭДС батарейки $\mathcal{E} = 4,5$ В, внутреннее сопротивление $r = 2$ Ом. Батарейка замкнута на резистор сопротивлением $R = 7$ Ом. Определите силу тока в цепи и напряжение на зажимах батарейки.
2. В проводнике сопротивлением $R = 2$ Ом, подключенном к источнику тока с ЭДС $\mathcal{E} = 1,1$ В, сила тока $I = 0,5$ А. Определите силу тока при коротком замыкании источника.
3. Сила тока в цепи, содержащей источник тока и сопротивление $R_1 = 4$ Ом, равна $I_1 = 0,2$ А. Если внешнее сопротивление $R_2 = 7$ Ом, то сила тока в цепи $I_2 = 0,14$ А. Чему будет равна сила тока в цепи, если источник замкнуть накоротко?
4. При силе тока $I_1 = 1,5$ А напряжение на участке цепи $U_1 = 20$ В, а при силе тока $I_2 = 0,5$ А напряжение на том же участке $U_2 = 8$ В. Чему равна ЭДС, действующая на этом участке?
5. К аккумулятору с внутренним сопротивлением 2 Ом и ЭДС 12 В подключены две одинаковые параллельно соединенные лампочки. Сила тока в одной из лампочек равна 1 А. Определите силу тока через эту лампочку, если другая перегорит.
6. Для измерения ЭДС своего аккумулятора автомобилист собрал замкнутую цепь, в которой последовательно соединил аккумулятор, источник тока с ЭДС 2 В и амперметр. Амперметр показал 1 А. При изменении полярности включения аккумулятора ток в цепи изменил направление и стал равным 0,75 А. Определите ЭДС аккумулятора.
7. При включении плеера напряжение на зажимах источника тока 2,8 В. ЭДС батареи элементов 3 В, внутреннее сопротивление 1 Ом. Определите силу тока в цепи. Какую работу совершают сторонние силы источника за 5 мин? Какова работа тока во внешней и внутренней частях цепи?

Творческое задание

Подготовьте сообщение: «Причины и последствия короткого замыкания в электрической цепи».

§ 39. Законы Кирхгофа

Ожидаемый результат

Прочитав параграф, вы сможете:

- применять законы Кирхгофа к разветвленным электрическим цепям.

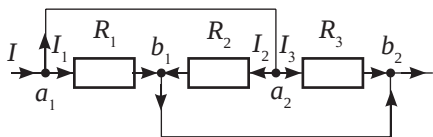


Рис. 211. Схема разветвленной цепи

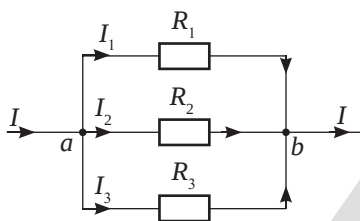


Рис. 212. Эквивалентная схема цепи, изображенной на рис. 211

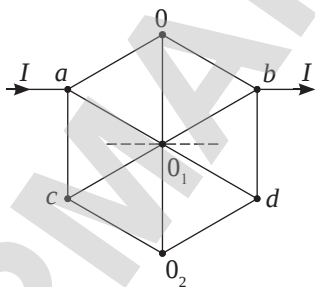


Рис. 213. Схема симметричной цепи с точками равного потенциала $0, 0_1, 0_2$

I. Расчет сопротивления разветвленных цепей. Узлы равного потенциала

Электрические цепи могут быть разветвленными и неразветвленными. На всех участках неразветвленной цепи течет один и тот же ток, соединение элементов цепи последовательное. В разветвленной цепи присутствуют и параллельное, и последовательное соединение проводников, соединение элементов цепи смешанное.

Для разветвленных цепей применяют такие понятия, как ветвь, узел, контур.

Ветвь — это участок цепи, по которому проходит один и тот же ток, он состоит из последовательно соединенных проводников и источников тока.

Узел — это место соединения трех и более ветвей.

Контур — это любое замкнутое соединение элементов цепи, которое можно обойти, перемещаясь по нескольким ее ветвям.

При расчете сопротивления сложных разветвленных цепей используют следующие правила:

- 1) точки равного потенциала можно стянуть в один узел;
- 2) ветви, стянутые в один узел, можно разъединить в линиях симметрии разветвленной цепи;
- 3) проводники, подключенные к узлам равного потенциала, не создают сопротивления току, в расчете общего сопротивления цепи их не учитывают.

Использование указанных правил существенно упростит цепь, при этом токи в ветвях цепи останутся прежними.

Определим сопротивление участка цепи, изображенного на рисунке 211. На схеме указаны четыре узла a_1, a_2, b_1, b_2 . Потенциалы узлов a_1 и a_2 равны, они соединены проводом, сопротивлением которого можно пренебречь. Точки b_1 и b_2 также имеют одинаковый потенциал. Сокращая длину соединительных проводов с ничтожно малым сопротивлением, получим упрощенную схему цепи с двумя узлами. Цепь представляет собой параллельное соединение проводников (рис. 212).

В проволочной фигуре, изображенной на *рисунке 213*, точки с одинаковым потенциалом 0 , 0_1 , 0_2 расположены по оси симметрии, следовательно, по проводам 00_1 и 0_10_2 ток не пойдет, их можно удалить, а узел 0_1 разъединить по направлению движения тока. Получим эквивалентную схему, изображенную на *рисунке 214*. Расчет такой цепи производится с использованием формул последовательного и параллельного соединения проводников.

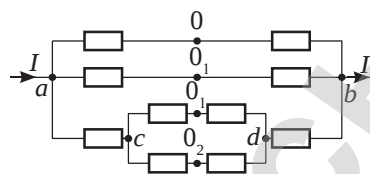


Рис. 214. Эквивалентная схема цепи, изображенной на *рис. 213*

II. Катушка индуктивности и конденсатор в цепи постоянного тока

Катушка индуктивности обладает малым активным сопротивлением $R_L \rightarrow 0$. При ее непосредственном подключении к источнику постоянного тока происходит короткое замыкание. Сопротивление катушки возрастает только в момент включения и отключения цепи, когда сила тока нарастает или убывает и в цепи наблюдается явление самоиндукции.

Конденсатор представляет собой две проводящие пластины, разведенные диэлектриком. При подключении конденсатора к источнику постоянного тока в цепи появляется ток зарядки. Он прекращается, когда разность потенциалов на обкладках конденсатора станет равной ЭДС источника (*рис. 215*). В разветвленной цепи конденсатор заряжается до разности потенциалов между узлами, к которым он подсоединен (*рис. 216, а*). После отключения источника тока он создает ток в замкнутом контуре до тех пор, пока полностью не разрядится (*рис. 216, б*).



Ответьте на вопрос

Почему в расчете общего сопротивления цепи не учитывают сопротивление проводников, соединенных к точкам равного потенциала?

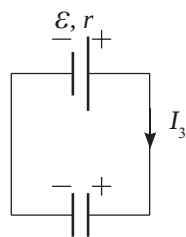


Рис. 215. Зарядка конденсатора от источника постоянного тока $U_c = \varepsilon$

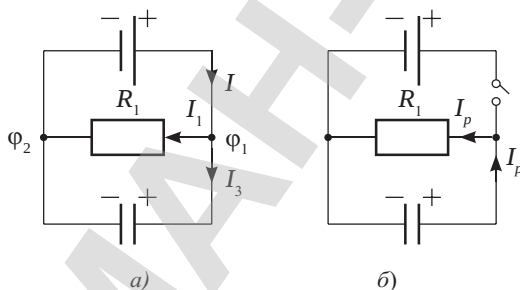


Рис. 216. а) конденсатор в режиме зарядки $U_c = \varphi_1 - \varphi_2$;
б) конденсатор в режиме разрядки

III. Законы Кирхгофа

Расчет более сложных цепей, например, содержащих несколько источников тока с различной ЭДС, производят на основе законов Кирхгофа.

Первый закон Кирхгофа является следствием закона сохранения заряда, согласно которому ни в одной точке проводника не должны накапливаться или исчезать заряды:

Алгебраическая сумма сил токов, сходящихся в узел, равна нулю.

$$\sum_{i=1}^n I_i = 0.$$

Если ток входит в узел, силу тока принимают положительной по значению; отрицательной, если ток выходит из узла.

Второй закон Кирхгофа является обобщением закона Ома:

В любом замкнутом контуре алгебраическая сумма падений напряжений на сопротивлениях равна алгебраической сумме ЭДС источников в контуре.

$$\sum_{i=1}^k \varepsilon_i = \sum_{i=1}^n I_i R_i,$$

где k – число источников тока, n – число проводников.

IV. Алгоритм решения задачи с использованием законов Кирхгофа

Использование алгоритма существенно упрощает запись формул для основных величин, характеризующих цепь:

1. На схеме цепи произвольно выбирают направление контурных токов и указывают направление токов в ветвях.
2. Записывают первый закон Кирхгофа для узлов, если цепь содержит n узлов, то составляют $n - 1$ уравнение для токов.
3. При использовании второго закона Кирхгофа необходимо, чтобы в каждый новый контур, для которого составляют уравнение, входила хотя бы одна новая ветвь, не вошедшая в предыдущие контуры.
4. Напряжение на резисторе считают положительным, если ток, проходящий через него, совпадает с направлением контурного тока, и, наоборот, если ток, проходящий через резистор, не совпадает с направлением контурного тока, то падение напряжения на нем отрицательное.
5. ЭДС источника принимают положительной по значению, если она повышает потенциал по направлению обхода контура. В этом случае обход источника совершают от отрицательного полюса источника к положительному полюсу. В противном случае ЭДС считают отрицательной.



Возьмите на заметку

Если для силы тока получен отрицательный результат, то направление тока на этом участке противоположно выбранному.

ПРИМЕР РЕШЕНИЯ ЗАДАЧИ

Генератор постоянного тока с $\varepsilon_1 = 12$ В и внутренним сопротивлением $r_1 = 0,1$ Ом заряжает аккумуляторную батарею с $\varepsilon_2 = 10$ В и внутренним сопротивлением $r_2 = 0,5$ Ом (рис. 1). Параллельно батарее включена лампочка сопротивлением $R_3 = 3$ Ом. Определите ток в батарее аккумулятора и в лампочке.

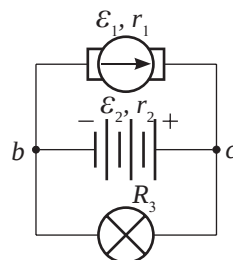


Рис. 1

Дано:

$\varepsilon_1 = 12 \text{ В};$
 $r_1 = 0,1 \text{ Ом};$
 $\varepsilon_2 = 10 \text{ В};$
 $r_2 = 0,5 \text{ Ом};$
 $R_3 = 3 \text{ Ом}.$

$I_2, I_3 - ?$

Решение:

Изобразим эквивалентную схему с обозначениями токов и ЭДС.

Направление токов предположим таким, как указано на *рисунке 2*.

Решим данную задачу, применяя законы Кирхгофа.

Выберем обход контуров I и II по часовой стрелке. Применим первый закон Кирхгофа для узла с:

$$I_1 - I_2 - I_3 = 0 \text{ или } I_1 = I_2 + I_3. \quad (1)$$

Применим второй закон Кирхгофа для контура I:

$$I_1 r_1 + I_2 r_2 = \varepsilon_1 - \varepsilon_2, \quad (2)$$

для контура II:

$$-I_2 r_2 + I_3 R_3 = \varepsilon_2. \quad (3)$$

Совместно решая уравнения (1) и (2), получим:

$$I_2 (r_1 + r_2) + I_3 r_1 = \varepsilon_1 - \varepsilon_2,$$

$$\text{отсюда } I_3 = \frac{(\varepsilon_1 - \varepsilon_2) - I_2 (r_1 + r_2)}{r_1}. \quad (4)$$

Подставляя полученное выражение в (3), получим:

$$\frac{(\varepsilon_1 - \varepsilon_2) - I_2 (r_1 + r_2)}{r_1} R_3 - I_2 r_2 = \varepsilon_2,$$

$$\text{откуда } I_2 = \frac{(\varepsilon_1 - \varepsilon_2) R_3 - \varepsilon_2 r_1}{(r_1 + r_2) R_3 + r_1 r_2}$$

$$I_2 = \frac{(12 - 10) \cdot 3 - 10 \cdot 0,1}{(0,1 + 0,5) \cdot 3 + 0,1 \cdot 0,5} = 2,7 \text{ (А)}.$$

Подставляя полученное значение тока I_2 в (4), найдем:

$$I_3 = \frac{(12 - 10) - 2,7 \cdot (0,5 + 0,1)}{0,1} = 3,8 \text{ (А)}.$$

Ответ: $I_2 = 2,7 \text{ А}; I_3 = 3,8 \text{ А}.$

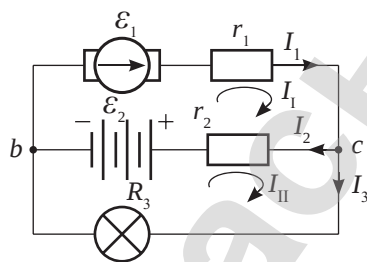


Рис. 2

Контрольные вопросы

1. Что в разветвленной цепи называют узлом, ветвью, контуром?
2. Как определяют общее сопротивление разветвленной цепи?
3. Сформулируйте законы Кирхгофа.
4. При каком условии ЭДС источника имеет положительный знак? При каком – отрицательный?

5. В каком случае падение напряжения на сопротивлении отрицательное, в каком – положительное?

★ Упражнение

39

1. Определите общее сопротивление цепи, изображенной на *рисунке 217*, если $R = 9 \text{ Ом}$.
2. Определите общее сопротивление цепи, изображенной на *рисунке 218*, если $R = 5 \text{ Ом}$.

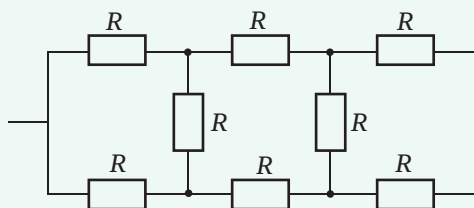


Рис. 217. К упражнению 39.1

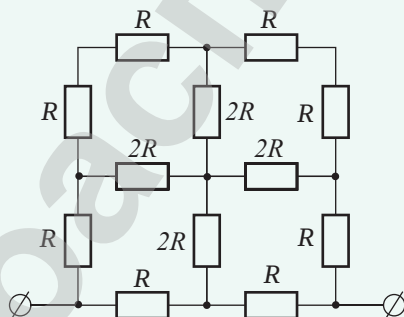


Рис. 218. К упражнению 39.2

3. Определите сопротивление проволочного каркаса, имеющего форму куба (*рис. 219*), при включении его в цепь между точками 1 и 7. Сопротивление каждого ребра каркаса $R = 0,3 \text{ Ом}$.
4. Две батареи с ЭДС $\mathcal{E}_1 = 10 \text{ В}$ и $\mathcal{E}_2 = 8 \text{ В}$ и внутренними сопротивлениями $r_1 = 1 \text{ Ом}$ и $r_2 = 2 \text{ Ом}$ соединены последовательно с резистором сопротивлением $R = 6 \text{ Ом}$ так, как показано на *рисунке 220*. Найдите силу тока, текущего через резистор.

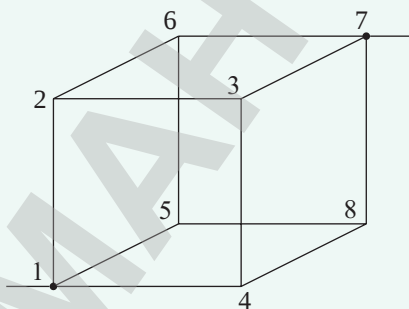


Рис. 219. К упражнению 39.3

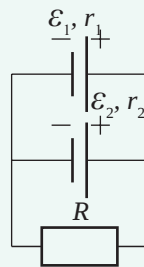


Рис. 220. К упражнению 39.4

§ 40. Работа и мощность электрического тока.

Закон Джоуля – Ленца.

Коэффициент полезного действия источника тока

Ожидаемый результат

Прочитав параграф, вы сможете:

- применять формулы работы, мощности и коэффициента полезного действия источника тока при решении задач.

I. Работа постоянного тока в цепи

Работа тока заключается в направленном перемещении зарядов по проводнику силами электрического поля.

Работа тока – это физическая величина, равная произведению перенесенного электрическим полем заряда на напряжение на данном участке цепи.

$$A = q(\varphi_1 - \varphi_2) = qU. \quad (1)$$

Количество заряда, перенесенное за некоторый промежуток времени, зависит от силы тока:

$$q = It.$$

Используя это соотношение, из уравнения (1) получим:

$$A = UI t. \quad (2)$$

На основании закона Ома для участка цепи формулу (2) можно записать в виде:

$$A = I^2 R t \quad (3)$$

или
$$A = \frac{U^2}{R} t. \quad (4)$$

Соотношение (3) удобно для расчета работы тока при последовательном соединении проводников, соотношение (4) – при параллельном соединении.

II. Измерение работы тока

Измерить работу тока можно, воспользовавшись тремя измерительными приборами: вольтметром, амперметром и часами.

На практике для измерения работы тока используют счетчик электрической энергии (рис. 222), в котором используют внесистемную единицу измерения работы 1 кВт · ч.



Рис. 222. Электрический счетчик казахстанского производства, г. Алматы (ТОО "Saiman")



Возьмите на заметку

В замкнутой электрической цепи превращение энергии происходит дважды. В источниках тока энергия неэлектрического происхождения превращается в электрическую энергию. Во внешней цепи электрическая энергия вновь превращается в различные виды энергии.

Стоимость электрической энергии при известном значении тарифа определяют по формуле:

$$C_m = T \cdot A,$$

где C_m – стоимость электрической энергии, T – тариф – стоимость 1 кВт · ч энергии.

III. Мощность тока

Мощность тока – это физическая величина, характеризующая быстроту выполнения работы по перемещению зарядов.

$$P = \frac{A}{t}. \quad (5)$$

Подставив формулы (2), (3) и (4) в (5), получим формулы расчета мощности тока на внешнем участке замкнутой цепи:

$$P = UI; \quad P = \frac{U^2}{R}, \quad P = I^2 R. \quad (6)$$

Для полной цепи мощность электрического тока равна:

$$P = \frac{\varepsilon^2}{(R + r)^2} \cdot R. \quad (7)$$

Мощность тока определяют с помощью амперметра и вольтметра или ваттметра. Современный прибор компании «Медсервис» позволяет выполнить шесть замеров, характеризующих электрическую цепь: силу тока, напряжение, мощность, коэффициент мощности, частоту тока в сети, годовую мощность (рис. 223).

IV. Работа и мощность источника тока

Полная работа в цепи – это работа сторонних сил, она равна:

$$A_{cm} = q\varepsilon \text{ или } A_{cm} = I\varepsilon t.$$

С учетом закона Ома для полной цепи: $I = \frac{\varepsilon}{R + r}$, получим:

$$A_{cm} = \frac{\varepsilon^2}{R + r} \cdot t$$

или $A_{cm} = I^2 (R + r) t.$

Полную мощность цепи можно определить по любой из формул:

$$P_{полн} = \frac{A_{cm}}{t}, \quad P_{полн} = I\varepsilon, \quad P_{полн} = \frac{\varepsilon^2}{R + r},$$

$$P_{полн} = I^2 (R + r).$$



Задание 2

Выясните, какая тарифная сетка оплаты за электроэнергию действует в вашем регионе. Почему стоимость увеличивается по мере возрастания расхода энергии?



Вспомните!

Единица измерения работы электрического тока – *джоуль*.
 $1 \text{ Дж} = 1 \text{ В} \cdot 1 \text{ А} \cdot 1 \text{ с} = 1 \text{ Вт} \cdot \text{с}$.
 Соотношение внесистемной единицы измерения работы электрического тока с джоулем:
 $1 \text{ Вт} \cdot \text{с} = 1 \text{ Дж}$;
 $1 \text{ Вт} \cdot \text{ч} = 3600 \text{ Дж}$;
 $1 \text{ кВт} \cdot \text{ч} = 3,6 \cdot 10^6 \text{ Дж}$.
 Единица измерения мощности – *ватт*:
 $[P] = 1 \text{ Вт} = 1 \text{ А} \cdot 1 \text{ В}$



Рис. 223. Ваттметр казахстанского производства, г. Алматы



Задание 3

Сравните формулы расчета работы и мощности электрического тока с формулами расчета работы и мощности сторонних сил. В чем различие указанных формул?



Ответьте на вопросы

1. Почему КПД источника тока не может быть больше 100 %?
2. Почему в электротехнике внутреннее сопротивление источника тока стремятся уменьшить в сравнении с сопротивлением внешней цепи?

V. КПД источника тока

Коэффициент полезного действия – это отношение полезной работы к полной. Для электрической цепи полезной работой является работа электрического поля, полной работой – работа сторонних сил, выполняются следующие соотношения:

$$\eta = \frac{A}{A_{\text{ст}}} = \frac{UIt}{\varepsilon It} = \frac{P}{P_{\text{полн}}} = \frac{U}{\varepsilon} = \frac{IR}{I(R+r)} = \frac{R}{R+r}.$$

Расчет коэффициента полезного действия можно произвести по любой из предложенных формул:

$$\eta = \frac{A}{A_{\text{ст}}}, \quad \eta = \frac{P}{P_{\text{полн}}}, \quad \eta = \frac{U}{\varepsilon}, \quad \eta = \frac{R}{R+r}.$$

VI. Закон Джоуля – Ленца

Количество теплоты, которое выделяется в проводнике, прямо пропорционально произведению квадрату тока, проходящего по проводнику, сопротивлению проводника и времени работы цепи.

$$Q = I^2 R t. \quad (8)$$

Количество теплоты определяется так же, как и работа, что не противоречит закону сохранения энергии в том случае, если в цепи наблюдается только тепловое действие тока. Из закона Джоуля – Ленца следует, что *при последовательном соединении проводников большее количество теплоты выделяется на проводнике с большим сопротивлением:*

$$\frac{Q_1}{Q_2} = \frac{R_1}{R_2}.$$

При параллельном соединении проводников сила тока в них разная, поэтому удобно использовать формулу:

$$Q = \frac{U^2}{R} t.$$



Вспомните!

Из курса 8 класса вам известно, что тепловое действие тока в цепи проявляется в соответствии с законом Джоуля – Ленца. Он назван в честь английского ученого Д. Джоуля и русского ученого Э. Ленца, которые независимо друг от друга опытным путем пришли к одному и тому же выводу



Ответьте на вопросы

1. Почему при значительном увеличении сопротивления внешней цепи мощность тока уменьшается?
2. Почему лампа, рассчитанная на большую мощность, в последовательной цепи горит тускло?
3. Почему при прохождении тока через соединительные провода электрической лампы они не нагреваются, а нить лампы накаляется добела?
4. Почему кипятильник быстро перегорает при подключении к сети, если он не опущен в воду?



Возьмите на заметку

Мощные приборы обладают малым сопротивлением.

Тогда соотношение количества теплоты, выделяющегося на проводниках, обратно пропорционально их сопротивлениям:

$$\frac{Q_1}{Q_2} = \frac{R_2}{R_1}.$$

При параллельном соединении проводников большее количество теплоты выделяется на проводнике с меньшим сопротивлением.

Контрольные вопросы

1. Какие превращения энергии происходят в полной цепи?
2. Как определяется работа и мощность электрического тока?
3. Какими приборами измеряют работу и мощность тока?
4. При каком соотношении внутреннего и внешнего сопротивления цепи мощность тока на внешнем участке максимальна? Где используют такой режим работы источника? Как его называют?
5. Чему равна полная работа в цепи?
6. Как определяется КПД электрической цепи?
7. На каком из проводников выделенное количество теплоты больше при последовательном соединении? При параллельном соединении?

★ Упражнение

40

1. Какое количество теплоты выделяет нить электрической лампы в течение времени $t = 1$ ч, если сила тока в лампе $I = 0,5$ А, а напряжение $U = 220$ В?
2. В течение какого времени можно нагреть в чайнике воду объемом $V = 1$ л от температуры $t_1 = 20$ °С до кипения при напряжении в сети $U = 220$ В, если сила тока $I = 8$ А?
3. Электроплитка имеет три спирали сопротивлением $R = 120$ Ом каждая, соединенные параллельно друг с другом. Плитку включают последовательно с резистором сопротивлением $r = 50$ Ом. Как изменится время, необходимое для нагревания чайника с водой до кипения, при переключении одной из спиралей плитки?
4. Лампочка мощностью $P = 500$ Вт рассчитана на напряжение $U_0 = 110$ В. Определите дополнительное сопротивление, позволяющее включить лампочку в сеть напряжением $U = 220$ В без изменения ее мощности.
5. Электрокипятильник имеет две обмотки. При включении одной из них вода в сосуде закипает через время $t_1 = 5$ мин а при включении другой – через $t_2 = 15$ мин. Через какое время закипит вода в том же сосуде, если обе обмотки включить: а) последовательно; б) параллельно?
6. При подключении резистора сопротивлением R к источнику тока КПД последнего $\eta = 20$ %. Сколько таких резисторов нужно взять и как их соединить, чтобы мощность, выделяющаяся на этом соединении, была максимальной?
7. Определите КПД источника тока при силе тока в цепи $I = 0,8$ А, если сила тока короткого замыкания $I_{к.з.} = 2$ А?

Итоги главы 11

Величины, характеризующие электрическую цепь	Законы постоянного тока	
Сила тока $I = \frac{\Delta q}{\Delta t}, \Delta q = q_0 N$ Плотность тока $j = \frac{I}{S}$ Сопротивление $R = \rho \frac{l}{S}$ Напряжение $U = \frac{A}{q}$ Электродвижущая сила $\mathcal{E} = \frac{A_{cm}}{q}$	Закон Ома для участка цепи $I = \frac{U}{R}$ При прямом подключении: $I = \frac{U + \mathcal{E}}{R + r};$ При обратном подключении: $I = \frac{U - \mathcal{E}}{R + r}$ Закон Ома для полной цепи $I = \frac{\mathcal{E}}{R + r}$ $\mathcal{E} = U_r + U_R$ Сила тока короткого замыкания $I_{кз} = \frac{\mathcal{E}}{r}$	Закон Кирхгофа $\sum_{i=1}^n I_i = 0$ $\sum_{i=1}^k \mathcal{E}_i = \sum_{i=1}^n I_i R_i$ Закон Джоуля – Ленца $Q = I^2 R t$
Соотношение величин при соединении проводников		Соединение источников тока
последовательном	параллельном	
$I_{общ.} = I_1 = I_2 = \dots = I_n$ $U_{общ.} = U_1 + U_2 + \dots + U_n$ $R_{общ.} = R_1 + R_2 + \dots + R_n$ $R_{общ.} = nR$ $\frac{U_1}{U_2} = \frac{R_1}{R_2}$	$I_{общ.} = I_1 + I_2 + \dots + I_n$ $U_{общ.} = U_1 = U_2 = \dots = U_n$ $\frac{1}{R_{общ.}} = \frac{1}{R_1} + \frac{1}{R_2} + \dots + \frac{1}{R_n}$ $R_{общ.} = \frac{R}{n} \quad R = \frac{R_1 R_2}{R_1 + R_2}$ $\frac{I_1}{I_2} = \frac{R_2}{R_1}$	Последовательное $\mathcal{E}_{общ.} = \mathcal{E}_1 + \mathcal{E}_2 + \dots + \mathcal{E}_n$ $r_{общ.} = r_1 + r_2 + \dots + r_n$ Параллельное $\mathcal{E}_{общ.} = \mathcal{E}_1$ $r_{общ.} = \frac{r}{n}$
Работа тока и сторонних сил	Мощность тока	КПД
Работа тока $A = q(\varphi_1 - \varphi_2) = qU$ $A = UI t$ $A = I^2 R t$ $A = \frac{U^2}{R} t$ Работа сторонних сил $A_{cm} = q\mathcal{E}$ $A_{cm} = I\mathcal{E} t$	Мощность тока $P = \frac{A}{t}, P = UI$ $P = \frac{U^2}{R}, P = I^2 R$ $P = \frac{\mathcal{E}^2}{(R + r)^2} \cdot R$ Полная мощность цепи $P_{полн} = \frac{A_{cm}}{t},$ $P_{общ.} = I\mathcal{E}$ $P_{полн} = \frac{\mathcal{E}^2}{R + r},$ $P_{полн} = I^2 (R + r).$	$\eta = \frac{A}{A_{cm}},$ $\eta = \frac{P}{P_{полн}},$ $\eta = \frac{U}{\mathcal{E}},$ $\eta = \frac{R}{R + r}.$

Законы, правила

Закон Ома для участка цепи

Сила тока на участке цепи прямо пропорциональна приложенному к нему напряжению и обратно пропорциональна сопротивлению.

Закон Ома для полной цепи

Сила тока в цепи прямо пропорциональна ЭДС источника тока и обратно пропорциональна сумме внешнего и внутреннего сопротивления.

Закон Джоуля – Ленца

Количество теплоты, которое выделяется в проводнике, прямо пропорционально квадрату тока, проходящего по проводнику, сопротивлению проводника и времени работы цепи.

Закон Кирхгофа

- Алгебраическая сумма сил токов, сходящихся в узел, равна нулю
- В любом замкнутом контуре алгебраическая сумма падений напряжений на сопротивлениях равна алгебраической сумме ЭДС источников в контуре.

Глоссарий

Ветвь – участок цепи, по которому проходит один и тот же ток, он состоит из последовательно соединенных проводников и источников тока.

Дополнительное сопротивление – проводник, подключенный к участку цепи последовательно.

Контур – любое замкнутое соединение элементов цепи, которое можно обойти, перемещаясь по нескольким ее ветвям.

Мощность тока – физическая величина, характеризующая быстроту выполнения работы по перемещению зарядов.

Плотность тока – физическая величина, равная отношению силы тока к площади поперечного сечения проводника.

Работа тока – физическая величина, равная произведению перенесенного электрическим полем заряда на напряжение на данном участке цепи.

Сила тока – величина, равная количеству заряда, прошедшего через поперечное сечение проводника за единицу времени.

Удельное сопротивление проводника – сопротивление проводника длиной 1 м и площадью поперечного сечения 1 м².

Узел в цепи – соединение трех и более проводников.

Электрический ток – направленное движение электрических зарядов.

Электродвижущая сила – физическая величина, равная работе сторонних сил по перемещению единичного заряда.

ГЛАВА 12

ЭЛЕКТРИЧЕСКИЙ ТОК В РАЗЛИЧНЫХ СРЕДАХ

Одним из условий возникновения электрического тока является наличие свободных зарядов, способных двигаться под действием электрического поля. При определенных условиях электрический ток может проходить через различные вещества. В данном разделе мы выясним, какие частицы переносят электрический заряд в различных средах, какими законами связаны величины, характеризующие электрический ток.

Изучив главу, вы сможете:

- описывать электрический ток в металлах и анализировать зависимость сопротивления от температуры;
- обсуждать перспективы получения высокотемпературных сверхпроводящих материалов;
- описывать электрический ток в полупроводниках и объяснять применение полупроводниковых приборов;
- исследовать вольт-амперные характеристики лампы накаливания, резистора и полупроводникового диода;
- описывать электрический ток в электролитах и применять законы электролиза при решении задач;
- экспериментально определять заряд электрона в процессе электролиза;
- описывать электрический ток в газах и вакууме;
- объяснять принцип действия и применение электронно-лучевой трубки.

§ 41. Электрический ток в металлах. Сверхпроводимость

Ожидаемый результат

Прочитав параграф, вы сможете:

- описывать электрический ток в металлах и анализировать зависимость сопротивления от температуры;
- обсуждать перспективы получения высокотемпературных сверхпроводящих материалов.

Вспомните!

Носителями зарядов в металлах являются электроны.

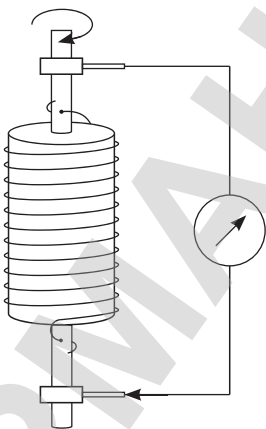


Рис. 223. Принципиальная схема установки опыта Р. Толмена и Т. Стюарта

I. Опыты по обнаружению носителей зарядов в металлах

В 1901 г. немецкий физик К. Рикке провел опыт: он последовательно включил в главный провод, питающий трамвайные линии, торцами друг к другу три цилиндра известной массы; два крайних были медными, а средний — алюминиевый. За год через цилиндры прошел заряд порядка 3,5 МКл, но масса цилиндров не изменилась, а в области тщательно отполированных торцов не было обнаружено переноса вещества. Следовательно, атомы и молекулы металлов не принимали участия в переносе зарядов, а ток обеспечивался движением общих для всех металлов частиц — электронами.

Прямые доказательства того, что ток в металлах обусловлен движением электронов были получены американскими учеными Р. Толменом и Т. Стюартом, которые в 1916 г. определили удельный заряд носителей тока, усовершенствовав методику опытов, проведенных в 1913 г. российскими учеными С.Л. Мандельштамом и Н.Д. Папалекси. Опыт заключался в том, что вращающийся соленоид, концы которого с помощью скользящих контактов были замкнуты на гальванометр, резко останавливали (рис. 223). При торможении соленоида гальванометр регистрировал импульс тока. При длине обмотки порядка 500 м и линейной скорости вращения порядка 500 м/с удалось с достаточно большой точностью определить

удельный заряд носителей тока $\frac{q}{m} = 1,76 \cdot 10^{11} \frac{\text{Кл}}{\text{кг}}$, что

соответствовало электронам.

II. Электронная теория проводимости П. Друде и Х. Лоренца

Исходя из представлений о свободных электронах как основных носителях тока в металлах, П. Друде в 1900 г. разработал классическую теорию электропроводности металлов, которая затем была усовершенствована Х. Лоренцем.

Согласно представлениям классической теории Друде – Лоренца при образовании кристаллической решетки освобождаются слабо связанные с атомами валентные электроны, которые хаотически движутся по всему объему проводника.

Основные положения, выдвинутые П. Друде в электронной теории сводятся к следующим:

1. Металлы обладают высокой электропроводностью благодаря большой концентрации свободных электронов $10^{28} - 10^{29} \text{ м}^{-3}$.
2. Тепловое движение электронов в металлах подобно движению молекул идеального газа. Концентрация свободных электронов в металлах превышает концентрацию молекул воздуха в атмосфере 10^{25} м^{-3} над уровнем моря при нормальных условиях.

П. Друде ввел понятие «электронный газ» (рис. 224) и определил среднюю квадратичную скорость теплового движения электронов, используя выводы молекулярно-кинетической теории:

$$\frac{m_e v_e^2}{2} = \frac{3}{2} kT,$$

при комнатной температуре скорость электронов достигает 110 км/с :

$$v_e = \sqrt{\frac{3kT}{m_e}} \approx 110 \text{ км/с}.$$

3. Под действием внешнего электрического поля на хаотическое движение электронов накладывается упорядоченное движение электронов, появляется электрический ток. Направленное движение электронов является равноускоренным и подчиняется законам классической механики. Длина свободного пробега λ электронов определяется периодом кристаллической решетки.

Вам известна зависимость силы тока в проводнике от скорости дрейфа электронов (§36):

$$I = |e| n S v_{\text{др}} \quad (1)$$

и плотность тока в металлах:

$$j = |e| n v_{\text{др}}.$$

4. Высокая скорость распространения электрического тока по цепи обусловлена скоростью распространения электромагнитного поля, которая равна скорости света $3 \cdot 10^8 \text{ м/с}$.
5. При упругом столкновении электронов с ионами электроны полностью передают им накопленную в электрическом поле энергию. Теоретический расчет выделенной тепловой энергии согласуется с законом Джоуля – Ленца.

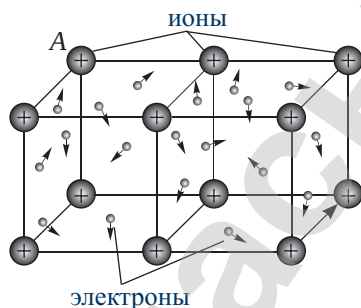


Рис. 224. Свободные электроны в металлах образуют «электронный газ». Концентрация свободных электронов порядка $10^{28} - 10^{29} \text{ м}^{-3}$, молекул воздуха в атмосфере – порядка 10^{25} м^{-3}



Задание

Используя формулу расчета плотности тока, докажите, что скорость дрейфа электронов при максимально допустимом значении плотности тока в металлах $j = 10^7 \text{ А/м}^2$ составляет порядка 1 мм/с .



Ответьте на вопросы

1. Почему в электронной теории силу тока определяют по скорости дрейфа, а время свободного пробега – по тепловой скорости электронов?
2. Почему металлы с плотной кристаллической решеткой имеют большее удельное сопротивление?

III. Зависимость сопротивления проводника от температуры

Опытным путем установлено, что между удельным сопротивлением и температурой существует прямая зависимость (рис. 225):

$$\rho = \rho_0(1 + \alpha \Delta t),$$

где ρ_0 – удельное сопротивление проводника при температуре 0°C , α – температурный коэффициент сопротивления, Δt – изменение температуры относительно 0°C .

Температурный коэффициент сопротивления – это физическая величина, которая показывает, как изменяется сопротивление проводника при нагревании на 1 K .

Единица измерения температурного коэффициента сопротивления в СИ: $[\alpha] = 1\text{ K}^{-1}$.

Поскольку $R = \rho \frac{l}{S}$, то зависимость сопротивления проводника от температуры имеет следующий вид:

$$R = R_0(1 + \alpha \Delta t).$$

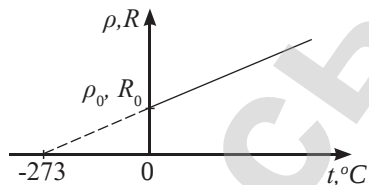


Рис. 225. График зависимости удельного сопротивления металла от температуры



Ответьте на вопрос

Почему график зависимости сопротивления металлического проводника не отличается от графика зависимости удельного сопротивления от температуры?

IV. Явление сверхпроводимости

При приближении температуры некоторых металлов к абсолютному нулю их сопротивление скачком падает практически до нуля, например, для ртути эта температура составляет $4,2\text{ K}$ (рис. 226). Состояние проводника, при котором его электрическое сопротивление близко к нулю, называют сверхпроводимостью. Вещества, находящиеся в состоянии сверхпроводимости, получили название сверхпроводников. Явление сверхпроводимости было открыто датским ученым Хейке Камерлинг-Оннесом в 1911 г.

В теории сверхпроводников, разработанной в 1957 г. американскими учеными Л. Купером, Дж. Бардином и Дж. Шриффером, предполагается, что в сверхпроводниках электроны образуют «куперовские пары», способные под воздействием электрического поля перемещаться через кристаллическую решетку без сопротивления, причем ток поддерживается и после снятия приложенного напряжения.

Ученые, исследуя явление сверхпроводимости, установили, что сверхпроводящий ток является поверхностным. В 1986 г. были получены высокотемпературные сверхпроводники, было обнаружено, что оксидные соединения лантана и бария становятся сверхпроводниками при температуре 100 K .

В последнее десятилетие в работе американских исследователей наметился существенный прорыв в создании высокотемпературных сверхпроводников. Получены пленки из синтезированного сложного химического соединения на основе таллия с эффектом

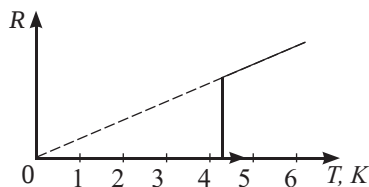


Рис. 226. Ртуть ниже $4,2\text{ K}$ становится сверхпроводником

сверхпроводимости при температуре 254 К (–19 °С). Эффект нетрадиционной сверхпроводимости обнаружен также в соединениях арсенида железа и оксида меди.

Получение высокотемпературных сверхпроводящих пленок может привести к появлению нового класса энергосберегающей электроники. В настоящее время сверхпроводники используют для изготовления мощных электромагнитов, которые устанавливают в ускорителях элементарных частиц и МГД-генераторах. Необходимость постоянного охлаждения таких установок жидким гелием создает сложности в их эксплуатации.



Интересно знать!

Большой интерес ученых вызывает явление, названное *магнитной левитацией*. В 2013 г. Тель-Авивский университет и ассоциации Научно-технологических центров (ASTC) провели ряд опытов по взаимодействию сверхпроводника с постоянным магнитом. В качестве сверхпроводника был взят тонкий слой керамического материала, оксида иттрия-бария-меди ($\text{YBa}_2\text{Cu}_3\text{O}_7$), нанесенного на стеклянную или сапфировую подложку. Толщина сверхпроводника порядка 1 мкм. Путем погружения в жидкий азот при –185 °С его превращают в сверхпроводник. В результате движения сверхпроводника и взаимодействия с постоянным магнитом в сверхпроводнике создается индукционный ток и порожденное им магнитное поле, которое позволяет сверхпроводнику сохранять свое положение в пространстве (рис. 227).

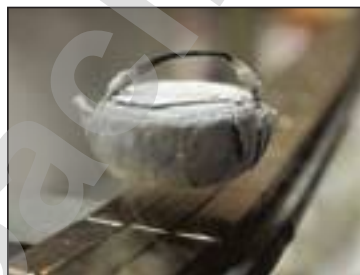


Рис. 227. Взаимодействие сверхпроводника с рельсами из постоянного магнита

ПРИМЕР РЕШЕНИЯ ЗАДАЧИ

По медному проводу течет ток плотностью $j = 1 \text{ А/мм}^2$. Считая, что на каждый атом меди приходится один свободный электрон, вычислите длину пути, который пройдет электрон, переместившись на расстояние 10 см. Плотность меди $\rho = 8,9 \cdot 10^3 \text{ кг/м}^3$, молярная масса меди $M = 0,064 \text{ кг/моль}$. Температура проводника 27 °С.

Дано:

$$\begin{aligned} j &= 1 \text{ А/мм}^2 \\ l_0 &= 0,01 \text{ м} \\ \rho &= 8,9 \cdot 10^3 \text{ кг/м}^3 \\ M &= 0,064 \text{ кг/моль} \\ T &= 300 \text{ К} \\ L &= ? \end{aligned}$$

СИ:

$$10^6 \frac{\text{А}}{\text{м}^2}$$

Решение:

Плотность тока $j = |e|nv_{\text{др}}$, тогда время перемещения электрона на расстояние l_0 равно: $\Delta t = \frac{l_0}{v_{\text{др}}} = \frac{l_0 |e| n}{j}$.

Скорость теплового хаотического движения электронов в металле $v = \sqrt{\frac{3kT}{m_e}}$.

Концентрация электронов $n = \frac{N}{V} = \frac{mN_A}{MV} = \frac{\rho}{M} N_A$.

Длина пути $L = v\Delta t = \sqrt{\frac{3kT}{m_e}} \cdot \frac{l_0 |e| \rho N_A}{Mj}$.

Проверим размерность: $[L] = \left[\sqrt{\frac{\text{Дж} \cdot \text{К}}{\text{К} \cdot \text{кг}}} \cdot \frac{\text{м} \cdot \text{Кл} \cdot \text{кг} \cdot \text{моль} \cdot \text{м}^2}{\text{м}^3 \cdot \text{моль} \cdot \text{кг} \cdot \text{А}} \right] = \left[\frac{\text{м} \cdot \text{Кл}}{\text{с} \cdot \text{А}} \right] = [\text{м}]$.

Определим числовое значение:

$$L = \sqrt{\frac{3 \cdot 1,38 \cdot 10^{-23} \cdot 300}{9,1 \cdot 10^{-31}}} \cdot \frac{0,01 \cdot 1,6 \cdot 10^{-19} \cdot 8,9 \cdot 10^3 \cdot 6,02 \cdot 10^{23}}{0,064 \cdot 10^6} = 1,5 \cdot 10^9 \text{ м}.$$

Ответ: $L = 1,5 \cdot 10^9 \text{ м}$.

Коонтрольные вопросы

1. Какие частицы являются носителями зарядов в металлах?
2. Назовите основные положения электронной теории Друде – Лоренца.
3. Как сопротивление проводника зависит от температуры?
4. Что такое температурный коэффициент сопротивления?
5. Какое явление получило название «сверхпроводимость»?



Упражнение

41

1. По прямому проводнику длиной $l = 1 \text{ м}$ течет ток $I = 10 \text{ А}$. Определите средний суммарный импульс электронов в проводнике. Заряд электрона $|e| = 1,6 \cdot 10^{-19} \text{ Кл}$, масса $m_e = 9,1 \cdot 10^{-31} \text{ кг}$.
2. Определите среднюю скорость направленного движения электронов вдоль медного проводника при плотности тока $j = 1 \text{ А/мм}^2$, если считать, что на каждый атом приходится один свободный электрон.
3. Какова напряженность электрического поля в никелиновом проводнике сечением площадью $S = 1 \text{ мм}^2$ при силе тока $I = 1 \text{ А}$?
4. Вычислите отношение сопротивлений вольфрамовой проволоки при температурах $t = 0 \text{ }^\circ\text{С}$ и $t = 2400 \text{ }^\circ\text{С}$.
5. При погружении катушки из алюминиевой проволоки под напряжением в тающий лед сила тока в ней равна $I_1 = 29 \text{ мА}$, а при погружении в кипяток – $I_2 = 20 \text{ мА}$. Определите температурный коэффициент сопротивления алюминия.
6. На сколько процентов изменится мощность, потребляемая электромагнитом, обмотка которого выполнена из медной проволоки, при изменении температуры от $0 \text{ }^\circ\text{С}$ до $20 \text{ }^\circ\text{С}$?

Творческое задание

Подготовьте сообщения (на выбор):

1. «Теория БКШ» (Дж. Бардин, Л. Купер, Дж. Шриффер).
2. «Высокотемпературные сверхпроводники».
3. «Применение сверхпроводников».

§ 42. Электрический ток в полупроводниках. Полупроводниковые приборы

Ожидаемый результат

Прочитав параграф, вы сможете:

- описывать электрический ток в полупроводниках и объяснять применение полупроводниковых приборов.

Таблица 15. Удельное сопротивление веществ

Вещество	Удельное сопротивление (порядок)
Проводник	10^{-7} Ом · м
Полупроводник	от 10^{-5} Ом · м до 10^8 Ом · м
Диэлектрик	10^8 Ом · м

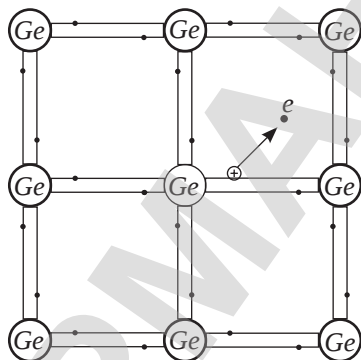


Рис. 228. Носители зарядов в полупроводниках: свободные электроны и дырки

I. Полупроводники.

Носители зарядов в полупроводниках. Собственная проводимость

Полупроводник – это вещество, которое по своей удельной проводимости занимает промежуточное место между проводниками и диэлектриками и отличается от проводников сильной зависимостью удельной проводимости от концентрации примесей, температуры и воздействия различных видов излучения. Типичные представители полупроводников – это германий, селен, кремний.

При комнатной температуре число свободных электронов в полупроводнике незначительно. Движение электронов в полупроводниках аналогично их движению в металлах: при отсутствии электрического поля движение хаотичное, при наличии внешнего поля кроме хаотичного движения появляется направленное. Проводимость свободных электронов называют *электронной проводимостью* или *проводимостью n-типа* (*negative* – «отрицательный»).

Кроме свободных электронов в направленном движении участвуют связанные электроны. Рассмотрим плоскостную схему электронных связей между атомами германия (рис. 228). На рисунке электронные связи атомов изображены линиями. Вокруг ядра атома германия расположены четыре внешних электрона, каждый из которых образует парную связь с электронами соседних атомов. Если электрон становится свободным, то это равносильно появлению в области бывшей связи положительного заряда, равного заряду электрона, его называют *дыркой*. Разорванная связь может восстановиться переходом электрона из соседних линий связи, тогда дырка появляется в линиях связи других атомов. При наличии электрического поля движение дырки, обусловленное движением связанных электронов, становится направленным и противоположным направлению движения электронов. Проводимость, обусловленную перемещением дырок, называют *дырочной проводимостью p-типа* (*positive* – «положительный»). Таким образом, носителями зарядов в полупроводниках являются свободные электроны и дырки.

Электронно-дырочную проводимость называют собственной проводимостью полупроводников.

II. Зависимость собственной проводимости полупроводников от температуры и освещенности. Термисторы и фоторезисторы

Зависимость сопротивления полупроводников от температуры получила применение при изготовлении термометров сопротивления – *термисторов*.

Термистор – полупроводниковый резистор, сопротивление которого зависит от температуры.

Термистор является приемной частью термометра. Преимущество полупроводникового термометра заключается в том, что термистор может иметь размеры в десятые доли миллиметра, сохраняя свою чувствительность (рис. 229). Это дает возможность определить температуру малых тел, для которых применение жидкостных термометров неприемлемо. Термистором можно обнаружить изменения температуры в миллионные доли Кельвина.

Зависимость проводимости полупроводников от освещенности получила применение в фоторезисторах, благодаря которым стало возможным автоматическое управление электрическими цепями. На рисунке 230 изображена схема цепи с фоторезистором для автоматического подключения уличного освещения.

! Обратите внимание!

При собственной проводимости число свободных электронов и дырок одинаковое.



Рис. 229. Термистор с датчиком

? Ответьте на вопрос

Почему при увеличении освещенности и температуры окружающей среды проводимость полупроводников возрастает?

Фоторезистор – полупроводниковый резистор, сопротивление которого зависит от освещенности.



Рис. 230. Схема подключения фоторезистора в цепь уличного освещения

III. Примесная проводимость полупроводников

Примеси обогащают полупроводник свободными электронами, если они принадлежат V, VI или VII группе таблицы Менделеева. Такие примеси называют *донорными*, а полупроводники *электронными*, или *n-типа*. Рассмотрим схему электронных связей между атомами германия и пентавалентного мышьяка (рис. 231). Четыре электрона атома мышьяка образуют связи с электронами атома германия, пятый становится свободным. *Полупроводники n-типа обладают электронной проводимостью*. При низких температурах и слабой освещенности примесная проводимость превышает собственную в десятки и сотни тысяч раз.

Дырочная проводимость преобладает в полупроводниках с примесью веществ I, II и III группы таблицы Менделеева. При образовании парных электронных связей элементы этих групп дают дырки, так как обладают меньшим числом валентных электронов, чем полупроводник. Такие примеси называют *акцепторными*, а полупроводники *дырочными* или *p-типа*. На рисунке 232 изображена схема связей атомов германия с атомом трехвалентного индия. Три электрона индия образуют парные связи с тремя электронами соседних атомов германия, в электронной связи с четвертым атомом образуется дырка. *Основной проводимостью полупроводника с акцепторной примесью является дырочная*.

Примесная проводимость – это проводимость в полупроводниках с акцепторной или донорной примесью.

IV. Полупроводниковый диод

Рассмотрим контакт двух полупроводников *p-типа* и *n-типа*. В результате диффузии пограничный слой со стороны полупроводника *n-типа* заряжается положительно, со стороны полупроводника *p-типа* – отрицательно, образуется *p-n-переход* (рис. 233). Поле $\vec{E}_0$, созданное *p-n-переходом*, препятствует движению основных носителей зарядов.

Образовавшийся пограничный слой называют *запирающим слоем*. Он обладает односторонней проводимостью и представляет собой основную часть полупроводникового диода. Присоединим к полупроводникам источник тока: положительный полюс к полупроводнику *n-типа*, отрицательный полюс к полупроводнику *p-типа* (рис. 234). Напряженность внешнего поля совпадает с напряженностью поля



Задание

Приведите примеры использования фоторезистора в качестве прибора для автоматического управления электрическими цепями.



Ответьте на вопрос

Каким образом фоторезистор регулирует сеть уличного освещения?

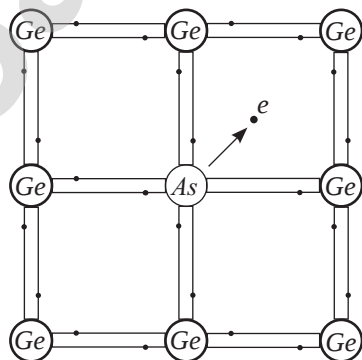


Рис. 231. Полупроводник *n-типа*

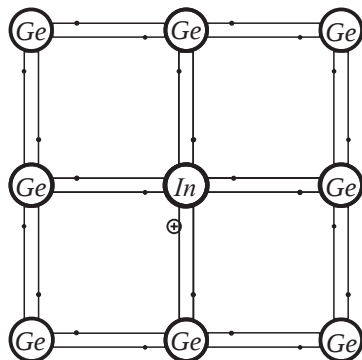


Рис. 232 Полупроводник *p-типа*

p - n -перехода, запирающий слой расширяется, его сопротивление возрастает. Поменяем полюса источника тока, тогда напряженность внешнего поля будет направлена противоположно направлению поля p - n -перехода (рис. 235). Запирающий слой станет тоньше или полностью исчезнет, сопротивление p - n -перехода уменьшится. Ток через полупроводник, созданный направленным движением основных носителей тока, возрастет. Вольт-амперная характеристика при прямом и обратном подключении источника к p - n -переходу дана на рисунке 236. Запирающий слой обладает односторонней проводимостью, он используется для выпрямления переменного тока. Контакт полупроводников p -типа и n -типа является основной частью диода, изображение полупроводникового диода в схеме указано на рисунке 237.

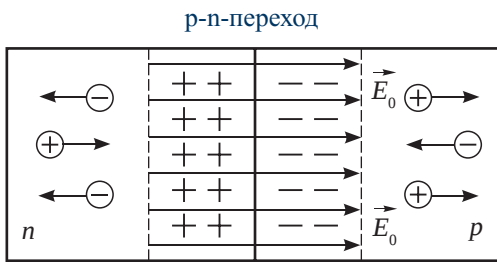


Рис. 233. p - n -переход

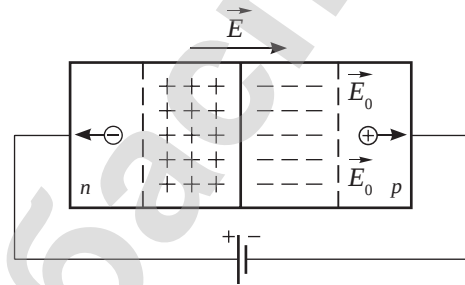


Рис. 234. Обратное включение p - n -перехода

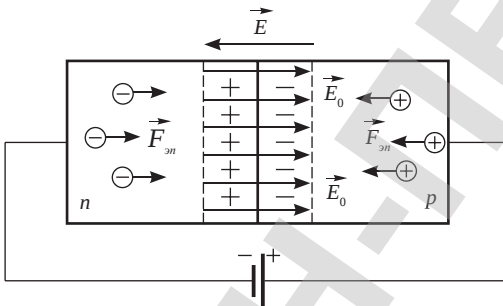


Рис. 235. Прямое включение p - n -перехода

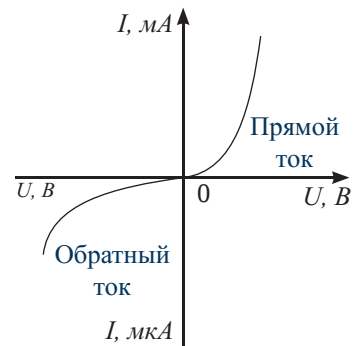


Рис. 236. Вольт-амперная характеристика для p - n -перехода

V. Светодиодная лампа

Светодиодная лампа состоит из цоколя, встроенного блока питания постоянного тока, драйвера – специально спроектированной платы со сверхмощным светодиодом – и рассеивателя (рис. 238). Светодиод – это p - n -переход, в котором электрическая энергия преобразуется в видимое излучение. Таким образом, основная часть светодиодной лампы – это полупроводниковый чип, размер которого порядка $160 \times 550 \times 80$ мкм. Плата помещена в радиатор – алюминиевый корпус для увеличения теплоотвода. Светимость лампы усиливает люминофор, нанесенный на рассеиватель. Предусмотрены различные варианты входного напряжения на лампы от 12 В до 220 В. Потребление электроэнергии

светодиодной лампы в 5–10 раз экономичнее обычных ламп накаливания.

VI. Усилитель на транзисторе

Полупроводниковые приборы с двумя p - n -переходами называют транзисторами (рис. 239). Они могут быть p - n - p - и n - p - n -видов. Для изготовления p - n - p -транзистора необходима пластина из полупроводника n -типа, которую называют базой B . На пластину напыляют или вплавляют два участка из полупроводника p -типа (рис. 240), при этом область коллектора K больше, чем эмиттера $Э$. Оба перехода подключают к источникам постоянного тока, которые регулируют работу запирающих слоев (рис. 241). Переход «эмиттер – база» прямой, переход «база – коллектор» обратный. Основные носители создают ток эмиттера на первом переходе. Дырки, прошедшие в базу, являются неосновными носителями для второго перехода и проходят его беспрепятственно. Таким образом, ток коллектора I_K зависит только от тока эмиттера $I_Э$ и не зависит от сопротивления R цепи коллектора:

$$I_K = I_Э - I_Б.$$

Подключив в цепь коллектора резистор большого сопротивления, можно получить сигнал высокого напряжения:

$$U_{\text{вых}} = I_K R.$$

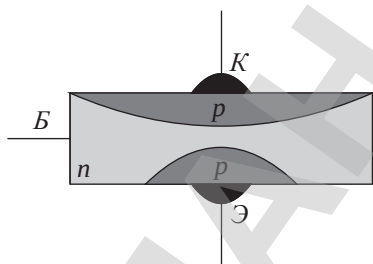


Рис. 240. Транзистор p - n - p -вида

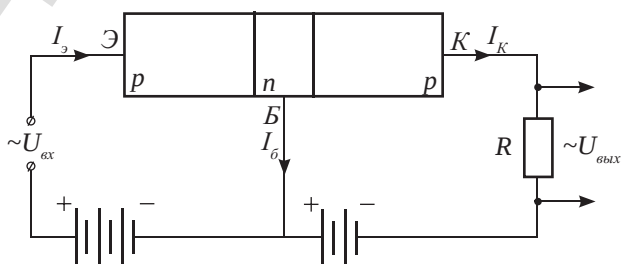


Рис. 241. Подключение источников к выводам транзистора



Рис. 237. Изображение диода в схеме



Рассеиватель
Светодиод COB
Драйвер
Радиатор
Цоколь E27

Рис. 238. Светодиодная лампа

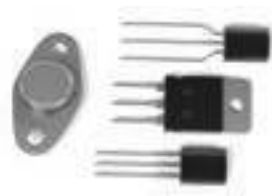


Рис. 239. Транзисторы



Ответьте на вопросы

1. Почему в полупроводниках при низких температурах преобладает примесная проводимость, при высоких температурах – собственная проводимость?
2. Почему прямой ток в p - n переходе значительно превышает обратный ток при одинаковом значении напряжения?
3. Почему ток коллектора не зависит от сопротивления цепи «коллектор – база»?

Коонтрольные вопросы

1. Какие вещества относятся к полупроводникам?
2. Что такое собственная проводимость полупроводников?
3. Как изменяется сопротивление полупроводников при нагревании? При освещении?
4. Какую проводимость называют примесной?
5. Какие примеси называют донорными? Какие акцепторными?
6. Какими свойствами обладает p - n -переход?
7. Как устроен транзистор?

★ Упражнение

42

1. Концентрация электронов проводимости в германии при комнатной температуре $n = 3 \cdot 10^{19} \text{ м}^{-3}$. Какую часть составляет число электронов проводимости от общего числа атомов? Плотность германия $\rho = 5400 \text{ кг/м}^3$, молярная масса германия $\mu = 0,073 \text{ кг/моль}$.
2. При температуре 20°C концентрация электронов проводимости в германии $1 \cdot 10^{14} \text{ см}^{-3}$. Какая доля его атомов ионизирована? Считайте, что при ионизации удаляется в среднем лишь один из валентных электронов атома.
3. Каким должно быть удельное содержание примеси алюминия в кремнии (по массе в %), чтобы концентрация «дырок» в нем равнялась $5,0 \cdot 10^{16} \text{ см}^{-3}$? Примите, что каждый атом алюминия участвует в образовании «дырки».
4. К концам цепи, состоящей из последовательно включенных термистора и реостата сопротивлением 1 кОм , подано напряжение 20 В . При комнатной температуре сила тока в цепи была равна 5 мА . Когда термистор опустили в горячую воду, сила тока стала равна 10 мА . Во сколько раз изменилось сопротивление термистора?
5. Фоторезистор, который имеет сопротивление 25 кОм в темноте, включили последовательно с резистором сопротивлением 5 кОм . Когда фоторезистор осветили, сила тока в цепи при том же значении напряжения увеличилась в 4 раза. Во сколько раз уменьшилось сопротивление фоторезистора?

Творческое задание

Подготовьте сообщение (на выбор):

1. «Применение полупроводников в светотехнике».
2. «Виды усилителей на транзисторах, их применение».
3. «Светотехника и радиоэлектроника в РК».

§ 43. Электрический ток в растворах и расплавах электролитов. Законы электролиза

Ожидаемый результат

Прочитав параграф, вы сможете:

- описывать электрический ток в электролитах и применять законы электролиза при решении задач.

Вспомните!

Электролиты – это вещества, водные растворы и расплавы которых являются проводниками.

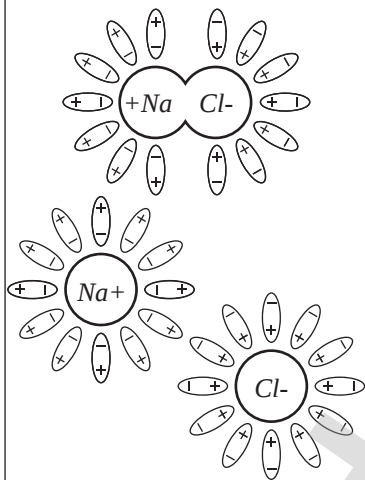


Рис. 242. Электролитическая диссоциация

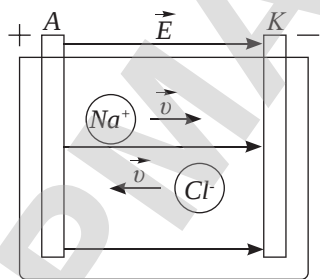


Рис. 243. Направленное движение заряженных частиц под действием внешнего поля

I. Носители зарядов в электролитах

Молекулы электролитов и воды по своей структуре полярные. Связи между ионами молекул кислот, щелочей и солей в окружении молекул воды ослабевают. Вследствие теплового движения молекулы распадаются на ионы, происходит электролитическая диссоциация (рис. 242).

Электролитическая диссоциация – это распад молекул на ионы под действием растворителя.



Под действием электрического поля, созданного между анодом и катодом, в электролите возникает направленное движение ионов, появляется электрический ток (рис. 243). Распад молекул на ионы происходит также при сильном нагреве вещества. Степень диссоциации или доля распавшихся молекул зависит от температуры.

Степень диссоциации – физическая величина, которая показывает, какая часть молекул распалась на ионы

$$\alpha = \frac{N_i}{N},$$

где α – степень диссоциации; N_i – число молекул, распавшихся на ионы; N – число молекул электролита в растворе.

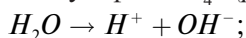
Наряду с диссоциацией при столкновении положительных ионов с отрицательными ионами в растворах происходит обратный процесс восстановления молекул.

Рекомбинация – процесс соединения ионов в нейтральные молекулы.

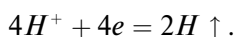
II. Процессы, происходящие на электродах. Электролиз

В зависимости от вида электролита на электродах происходят различные процессы:

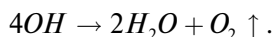
- 1) *Разложение воды на водород и кислород.* Электрический ток через водный раствор серной кислоты вызывает выделение газообразного водорода на катоде и кислорода на аноде. В растворе в результате диссоциации появляются ионы водорода H^+ , гидроксиды OH^- и сульфата SO_4^{2-} (рис. 244).



Ионы водорода направляются к катоду, получив от которого отрицательный ион, становятся нейтральными и превращаются в молекулы водорода:



Ионы гидроксидов передают аноду избыточные электроны и, став нейтральными, образуют молекулы воды и кислорода:



В растворах электролитов происходят процессы, аналогичные процессам в металлах. Положительные ионы водорода отбирают электроны у катода, отрицательные ионы гидроксидов отдают избыточные электроны аноду. Точно так же в металлах свободные электроны переносят заряд от отрицательного полюса источника к положительному полюсу. Следовательно, для тока в жидких проводниках выполняется закон Ома.

При прохождении тока через электролит в результате окислительно-восстановительных реакций на электродах выделяется чистое вещество, этот процесс называют *электролизом*.



Запомните!

Носителями зарядов в электролитах являются положительные и отрицательные ионы.



Ответьте на вопрос

Почему сопротивление жидкого проводника с увеличением температуры уменьшается?

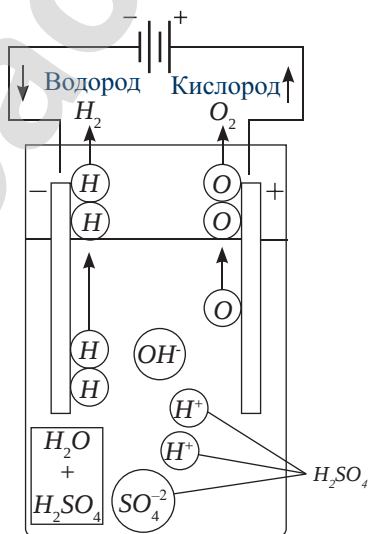
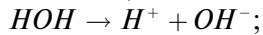


Рис. 244. Разложение воды на водород и кислород

Электролиз – это явление выделения чистого вещества на электродах при прохождении тока через электролит.

- 2) *Гальваностегия.* Если в воде растворить медный купорос $CuSO_4$, то в растворе образуются ионы водорода H^+ , гидроксиды OH^- , меди Cu^{+2} и сульфата SO_4^{2-} :



Ионы гидроксидов образуют на аноде кислород, ионы водорода на катоде превращаются в нейтральный водород, а ионы меди, нейтрализуясь, оседают на катоде (рис. 245). Катод покрывается слоем чистого металла.

Гальваностегия – это электрохимический процесс нанесения на металлическое изделие защитного или декоративного слоя из другого металла.

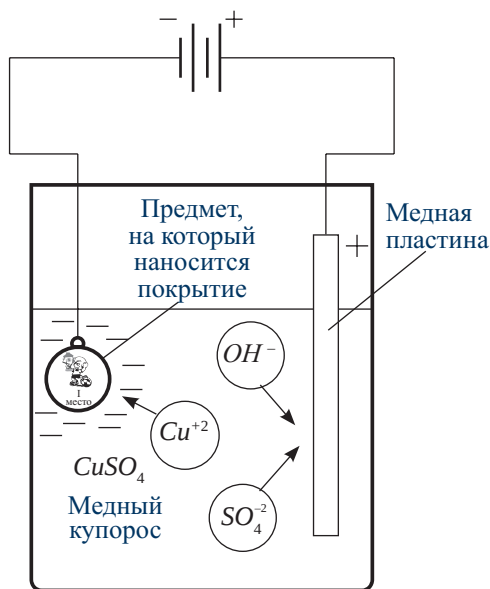


Рис. 245. Гальваностегия – покрытие изделия слоем металла



Рис. 246. Позолоченный сувенир «Золотой человек» отечественного производства, г. Алматы

Гальваностегия используется для создания антикоррозионного или декоративного покрытия изделий (рис. 246). При покрытии изделий, например, никелем или хромом, золотом или медью, катодом служит само изделие, анодом – пластина из чистого металла. В качестве электролита используют раствор соли указанного металла. По мере уменьшения в растворе ионов металла отрицательные ионы сульфата SO_4^{-2} вступают в реакцию с анодом, анод растворяется, а толщина покрытия катода увеличивается. На рисунке 247 представлены гальванические ванны для покрытия изделий медью.



Рис. 247. Ванны для покрытия изделий медью

III. Первый закон Фарадея. Электрохимический эквивалент

В 1834 г. Фарадей обнаружил, что при постоянном значении тока за одно и то же время на катоде выделяется одна и та же масса химического элемента. Фарадей ввел понятие электрохимический эквивалент вещества:

$$k = \frac{m}{q}. \quad (1)$$

Электрохимический эквивалент – физическая величина, которая показывает, какая масса вещества выделяется на электроде при прохождении через электролит единичного заряда.

Единица измерения электрохимического эквивалента в СИ: $[k] = 1 \frac{\text{Кг}}{\text{Кл}}$.

Свои открытия Фарадей сформулировал в виде законов.

Первый закон Фарадея:

Масса вещества, выделившегося при электролизе, прямо пропорциональна прошедшему через раствор заряду.

$$m = kq. \quad (2)$$

Учитывая связь заряда с силой тока $q = It$, первый закон Фарадея примет вид:

$$m = kIt. \quad (3)$$

IV. Второй закон Фарадея

Второй закон Фарадея устанавливает связь между электрохимическим и химическим эквивалентом веществ. Он получен Фарадеем экспериментально. Установим связь между величинами теоретически. Подставим в (1) известные формулы:

$$m = m_0 N = \frac{M}{N_A} N \quad \text{и} \quad q = n|e|N,$$

где N_A – число Авогадро, N – число ионов, осевших на электроде, $m_0 = \frac{M}{N_A}$ – масса

одного иона, n – валентность иона, $|e|$ – элементарный заряд, в результате получим:

$$k = \frac{MN}{N_A n |e| N} = \frac{M}{N_A |e| n}. \quad (4)$$

Таблица 16.
Электрохимический эквивалент веществ

Вещество	Электрохимический эквивалент, кг/Кл
медь	$3,29 \cdot 10^{-7}$
серебро	$1,118 \cdot 10^{-6}$
водород	10^{-8}

Таблица 17. Результаты опыта Фарадея при условии:
 $I = \text{const}; t = \text{const}; q = 1 \text{ Кл}$

Вещество	Масса, г
медь	0,000329
серебро	0,001118
водород	0,00001

В выражении (4) отношение $\frac{M}{n}$ является химическим эквивалентом вещества. Коэффициент пропорциональности химического и электрохимического эквивалента равен: $\frac{1}{N_A |e|} = \frac{1}{F}$, где F – постоянная Фарадея, равная:

$$F = 9,65 \cdot 10^4 \frac{\text{Кл}}{\text{моль}}.$$

Математическое выражение второго закона Фарадея примет вид:

$$k = \frac{1}{F} \cdot \frac{M}{n}. \quad (5)$$

Электрохимические эквиваленты веществ прямо пропорциональны их химическим эквивалентам.

Коонтрольные вопросы

1. Какие вещества называют электролитами?
2. Что такое электролитическая диссоциация? Электролиз? Рекомбинация?
3. Какие частицы являются носителями заряженных частиц в электролитах?
4. Что показывает степень диссоциации?
5. Сформулируйте законы электролиза.
6. Что показывает электрохимический эквивалент?



Упражнение

43

1. Две электролитические ванны с растворами AgNO_3 и CuSO_4 соединены последовательно. Какая масса m_2 меди выделится за время, в течение которого выделилось серебро массой $m_1 = 180$ г?
2. Сколько атомов двухвалентного цинка можно выделить за время $t = 5$ мин при пропускании тока $I = 2,5$ А через раствор сернокислого цинка? Электрохимический эквивалент цинка определите по таблице 15 Приложения.
3. При никелировании изделия сила тока в течении первых $t_1 = 15$ мин равномерно увеличивалась от нуля до $I_{\text{max}} = 5$ А; затем в течении $t_1 = 1$ ч оставалась постоянной и последние $t_3 = 15$ мин равномерно уменьшалась до нуля. Определите массу выделившегося никеля. Электрохимический эквивалент никеля определите по таблице 15 Приложения.
4. Электролиз раствора NiSO_4 протекал при плотности тока $j = 0,15$ А/дм². Какое количество атомов никеля выделилось за время $t = 2$ мин на площади $S = 1$ см² поверхности катода? Электрохимический эквивалент никеля определите по таблице 15 Приложения.
5. За какое время при электролизе медного купороса масса медной пластинки (катода) увеличится на $\Delta m = 99$ г? Площадь пластинки $S = 25$ см², плотность тока $j = 200$ А/дм². Определите толщину, слоя меди образовавшегося на пластине.

§ 44. Электрический ток в газах. Электрический ток в вакууме. Электронно-лучевая трубка

Ожидаемый результат

Прочитав параграф, вы сможете:

- описывать электрический ток в газах и вакууме;
- объяснять принцип действия и применение электронно-лучевой трубки.

Запомните!

Носителями зарядов в газах являются положительные и отрицательные ионы и свободные электроны.

I. Носители зарядов в газах

При нормальных условиях газ является диэлектриком, он состоит из нейтральных молекул или атомов. При ионизации газа под воздействием *теплого, ультрафиолетового, рентгеновского или радиоактивного излучения* он превращается в проводник. Молекулы газа теряют один или несколько электронов и превращаются в положительные ионы. Свободные электроны при столкновении с нейтральными молекулами образуют отрицательные ионы. В газах одновременно с ионизацией происходит *рекомбинация*: при столкновении электронов с положительными ионами образуются нейтральные молекулы.

При наличии внешнего электрического поля кроме теплового движения в ионизированном газе возникает ток. Отрицательные ионы и электроны движутся против направления вектора напряженности электрического поля, положительные ионы – по направлению вектора напряженности.

II. Ударная ионизация

При высокой напряженности электрического поля, от 10^3 В/м до 10^5 В/м, электроны в момент столкновения обладают энергией, достаточной для ионизации нейтральных молекул (рис. 248):

$$E_i = \frac{mv^2}{2} = qE\lambda,$$

где E_i – энергия ионизации, m – масса заряженной частицы, v – скорость заряженной частицы, q – заряд частицы, E – напряженность поля, λ – длина свободного пробега. Образующиеся в результате столкновения ионы и электроны разгоняются полем и в свою очередь ионизируют новые молекулы, число заряженных частиц возрастает лавинообразно, происходит самоионизация газа при отсутствии внешнего ионизатора. Такой процесс получил название *ударная ионизация* (рис. 249).

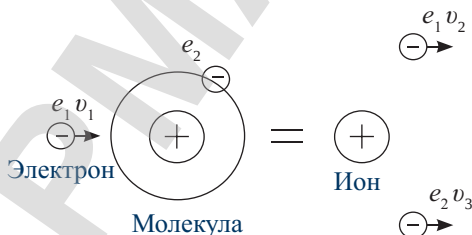


Рис. 248. Ионизация молекулы газа

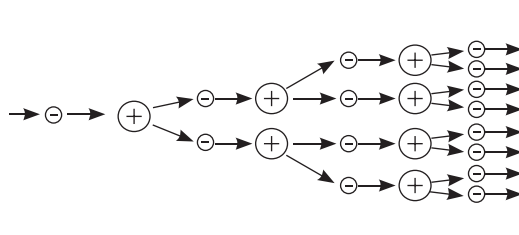


Рис. 249. Ударная ионизация

Ударная ионизация – это образование положительно заряженных ионов в результате столкновений атомов или молекул с быстрыми электронами.

III. Несамостоятельный и самостоятельный разряд

На рисунке 250 представлен график зависимости силы тока от напряженности поля в газоразрядной трубке (рис. 251). Напряжение между электродами равно произведению напряженности поля на расстояние между анодом и катодом l :

$$U = El.$$

Поскольку l – постоянная величина, зависимость силы тока от напряженности и напряжения имеют одинаковый вид.

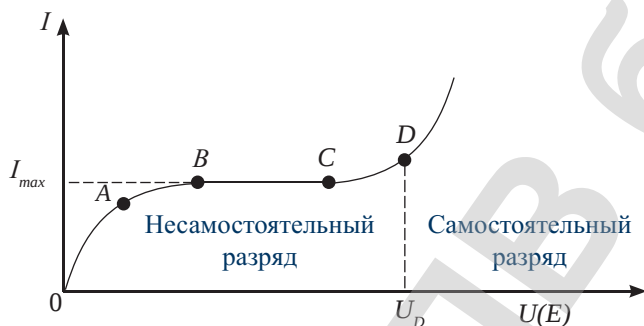


Рис. 250. Вольт-амперная зависимость разряда в газах

На участке OA зависимость силы тока от напряжения прямо пропорциональна, выполняется закон Ома. Нарастание силы тока при увеличении напряжения прекращается в тот момент, когда число ионов и электронов, созданных под воздействием ионизатора, становится равным числу заряженных частиц, достигших электродов. Этому процессу на графике соответствует участок BC. Максимальное значение силы тока называют *током насыщения*, он зависит от мощности ионизатора. Если ионизатор отключить, то газ вновь станет диэлектриком, ток исчезнет.

Участок OD на вольт-амперной характеристике соответствует несамостоятельному разряду, который возможен только при наличии ионизатора. При напряжениях больших U_D в газе начинается ударная ионизация, разряд становится самостоятельным.

IV. Типы самостоятельных разрядов

1) **Искровой разряд.** При нормальном атмосферном давлении искровой разряд в газе возникает при высокой напряженности поля, около $3 \cdot 10^6$ В/м. Газ в канале разряда нагревается до 10^4 К и начинает светиться. Примером искрового разряда в природе является молния, диаметр канала которой достигает 25 см, а сила тока 10^5 А. При



Возьмите на заметку

Если давление газа в трубке меньше атмосферного, то самостоятельный разряд возможен при более низком напряжении между электродами. В разреженном газе длина свободного пробега заряженных частиц возрастает, кинетическая энергия достигает значения энергии ионизации при более низком напряжении:

$$E_i = q \frac{U}{l} \lambda.$$

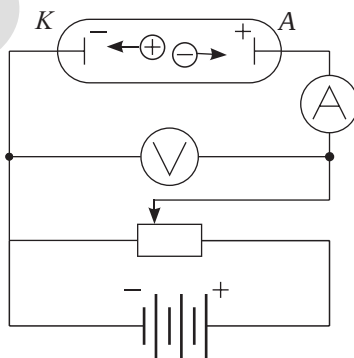


Рис. 251. Газоразрядная трубка

разогреве плотность газа в канале уменьшается, давление резко падает. В область пониженного давления устремляется холодный воздух, создается звуковой эффект: треск, раскаты грома.

Искровой разряд применяется для резки и обработки металлов (рис. 252), для воспламенения горючей смеси в двигателях внутреннего сгорания.



Рис. 252. Резка металла

- 2) **Коронный разряд.** Коронный разряд представляет собой слабое фиолетовое свечение, которое сопровождается шипением. Разряд наблюдается вблизи заостренных частей проводников, он происходит при нормальном и повышенном давлении газа в неоднородном поле высокого напряжения.

Коронный разряд получил применение в копировальных аппаратах и лазерных принтерах для переноса порошка с барабана на бумагу и для снятия остаточного заряда с барабана. Он применяется в электростатических фильтрах. Под воздействием коронного разряда частицы пыли, бактерии и вирусы электризуются и оседают на катод прибора (рис. 253).



Рис. 253. Электризация пыли под действием коронного разряда

- 3) **Дуговой разряд.** Дуговой разряд возникает между двумя угольными или металлическими электродами при сравнительно малых значениях напряжения порядка 60 В. Дуговой разряд сопровождается ярким свечением и высокой температурой, достигающей 5000–6000 К. В дуговом разряде происходит самоионизация газа за счет электронов, испущенных раскаленным катодом и ударной ионизацией молекул газа.

Дуговой разряд используют для сварки металлов (рис. 254), в сталеплавильных дуговых печах, прожекторах, кварцевых лампах.



Рис. 254. Дуговая сварка

- 4) **Тлеющий разряд.** При низком давлении, около 10 Па, и высоком напряжении порядка 200–300 В в газоразрядной трубке наблюдается тлеющий разряд, цвет свечения которого зависит от вида газа, заполняющего трубку (рис. 255). Газоразрядная трубка является основной частью энергосберегающих компактных

люминесцентных ламп, получивших широкое распространение в быту (рис. 256). Люминесцентная лампа на 20 Вт дает такую же освещенность как лампа накаливания на 100 Вт. Недостатком таких ламп является использование ядовитых паров ртути, проблема с утилизацией.

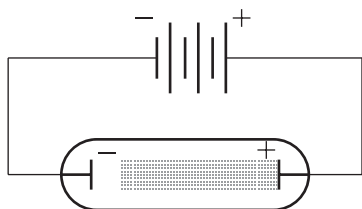


Рис. 255. Газоразрядная трубка

V. Носители зарядов в вакууме. Термоэлектронная эмиссия

Вакуум – это безвоздушное пространство, в нем нет частиц, которые могли бы стать носителями зарядов. Для получения электрического тока в вакууме необходимо ввести в него заряженные частицы. Наиболее простым методом является *термоэлектронная эмиссия*.

Термоэлектронная эмиссия – это испускание свободных электронов из металла при его нагревании до высокой температуры.

Один из электродов вакуумной трубки в виде спирали подсоединяют к источнику тока напряжением 6–8 В (рис. 257). При прохождении тока электрод накаляется до высокой температуры и испускает электроны, которые образуют электронное облако. При испускании электронов катод заряжается положительно и удерживает электроны возле себя. При наличии между катодом и анодом электрического поля электроны устремляются к аноду.

VI. Зависимость силы тока в вакууме от напряжения

На рисунке 257 дана схема установки, в которой потенциометр служит для изменения напряжения между анодом и катодом, амперметр – для измерения силы тока, созданного потоком электронов, вольтметр – для измерения напряжения. Вольт-амперная характеристика тока в вакуумной трубке представлена на рисунке 258. На участке *OC* по мере увеличения напряжения сила



Ответьте на вопрос

Почему около катода газоразрядной трубки газ не светится?



Рис. 256. Энергосберегающая люминесцентная лампа



Запомните!

Носителями зарядов в вакууме являются внесенные в него электроны.

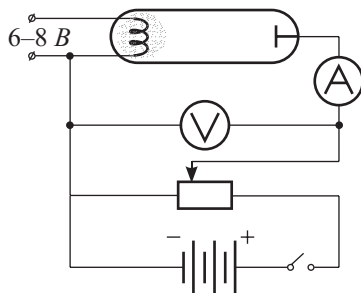


Рис. 257. Схема цепи для исследования вольт-амперной характеристики тока в вакууме

тока растет, следовательно, все большее количество электронов движется направленно к аноду. В некотором интервале напряжений от U_1 до U_2 зависимость носит линейный характер. В этом сравнительно узком интервале напряжений выполняется закон Ома. При дальнейшем увеличении напряжения до U_3 наступает момент, когда все электроны, вылетающие из катода, устремляются к аноду. В этом случае сила тока не зависит от изменения напряжения, ток в вакуумной трубке достигает максимального значения – *силы тока насыщения*. Сила тока насыщения зависит от температуры катода и свойств металла, из которого он изготовлен.

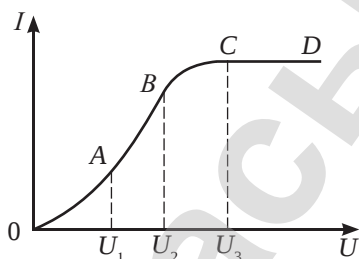


Рис. 258. Вольт-амперная характеристика тока в вакууме

VII. Электронно-лучевая трубка

При увеличении напряжения между электродами в вакуумной трубке возле анода возникает зеленоватое свечение. Электроны передают кинетическую энергию частицам стекла, которые излучают ее в виде холодного свечения – люминесценции. Это явление получило применение в электронно-лучевой трубке (рис. 259).

Электронно-лучевая трубка – это вакуумный прибор, с помощью которого исследуют быстропеременные электромагнитные явления в электрических цепях.

Она представляет собой стеклянную колбу с длинной узкой горловиной и широким дном, покрытым люминофором (7) (рис. 259). В горловине трубки находится электронная пушка состоящая из катода (1), управляющего электрода (2) с отрицательным потенциалом и двух анодов (3) и (4) в виде полых цилиндров с положительным потенциалом. Две пары отклоняющих пластин (5) и (6) смещают электронный луч по вертикали и горизонтали. На экране появляется линия – осциллограмма, отражающая закон изменения напряжения, поданного на пластины трубки. Электронно-лучевая трубка является основной частью осциллографа (рис. 260).



Запомните!

Электрический ток в вакуумной трубке представляет собой направленное движение электронов.

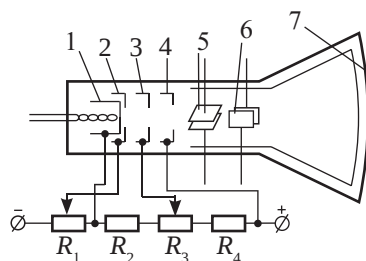


Рис. 259. Электронно-лучевая трубка



Рис. 260. Осциллограф

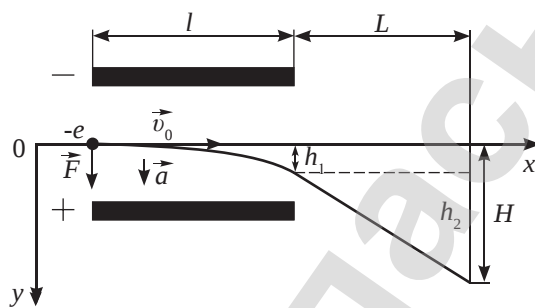


Ответьте на вопросы

1. Почему ток насыщения зависит от свойств материала, из которого изготовлен катод, и степени его нагрева?
2. Почему в электронно-лучевой трубке несколько анодов?

ПРИМЕР РЕШЕНИЯ ЗАДАЧИ

Электрон, имеющий кинетическую энергию $W_k = 10$ кэВ, влетает в плоский конденсатор (см. рис.), между пластинами которого поддерживается постоянная разность потенциалов $U = 40$ В. Расстояние между пластинами $d = 1$ см, их длина $l = 10$ см. На расстоянии $L = 20$ см от конденсатора находится экран. Первоначальная скорость электрона направлена параллельно пластинам. Найдите смещение H электрона на экране. Как изменится ответ, если вместо электрона взять протон той же энергии? Силой тяжести пренебречь.



Дано:

$$W_k = 10 \text{ кэВ}$$

$$U = 40 \text{ В}$$

$$d = 1 \text{ см}$$

$$l = 10 \text{ см}$$

$$L = 20 \text{ см}$$

$$H = ?$$

СИ

$$1,6 \cdot 10^{-15} \text{ Дж}$$

$$0,01 \text{ м}$$

$$0,1 \text{ м}$$

$$0,2 \text{ м}$$

Решение:

Электрон движется по оси Oy с ускорением под действием силы электрического поля конденсатора:

$$a = \frac{F}{m} = \frac{|e|E}{m} = \frac{|e|U}{md}.$$

По оси Ox равномерно со скоростью: $v_0 = \sqrt{\frac{2W_k}{m}},$

время полета электрона внутри конденсатора равно: $t = \frac{l}{v_0} = \frac{l\sqrt{m}}{\sqrt{2W_k}}.$

Найдем вертикальное смещение h_1 электрона внутри конденсатора и вертикальную скорость v_y при вылете из него. Учитывая, что электрон движется равноускоренно, получим:

$$h_1 = \frac{at^2}{2} = \frac{|e|U l^2 m}{2md \cdot 2W_k} = \frac{|e|U l^2}{4dW_k},$$

$$v_y = at = \frac{|e|U l \sqrt{m}}{md \sqrt{2W_k}} = \frac{|e|U l}{d \sqrt{2mW_k}} = \frac{|e|U l}{dm v_0}.$$

После вылета из конденсатора электрон летит прямолинейно и равномерно по инерции. Угол θ между пластинами и направлением полета электрона определяется соотношением $\operatorname{tg} \theta = \frac{v_y}{v_0} = \frac{eUl}{2dW_k}.$

Добавочное смещение $h_2 = Ltg\theta = \frac{eUlL}{2dW_k}.$

Тогда $H = h_1 + h_2 = \frac{eUl}{2dW_k} \left(\frac{l}{2} + L \right) = 5 \cdot 10^{-3} \text{ м} = 0,5 \text{ см}.$

Поскольку масса частиц не входит в расчетную формулу, а заряд протона равен по модулю заряду электрона, то смещение протона будет равно смещению электрона, но направлено в противоположную сторону.

Ответ: $H = 0,5 \text{ см}.$

Контрольные вопросы

1. Какие частицы являются носителями зарядов в газах?
2. Назовите ионизаторы газов.
3. При каком условии происходит самоионизация газа?
4. В чем отличие самостоятельного разряда от несамостоятельного?
5. Какие виды самостоятельных разрядов вам известны?
6. Какие частицы являются носителями зарядов в вакууме?
7. Что называют термоэлектронной эмиссией?
8. Из чего состоит вакуумная трубка, каким свойством она обладает?
9. Какое свойство катодных лучей используют в электронно-лучевой трубке?
10. Где применяют электронно-лучевую трубку?



Упражнение

44

1. Электрон со скоростью $1,83 \cdot 10^6$ м/с влетел в однородное электрическое поле в направлении, противоположном направлению напряженности поля. Какую разность потенциалов должен пройти электрон, чтобы ионизировать атом водорода, если энергия ионизации $2,18 \cdot 10^{-18}$ Дж.
2. Какова сила тока насыщения при несамостоятельном газовом разряде, если ионизатор каждую секунду образует 10^9 пар ионов в 1 см^2 , площадь каждого из двух параллельных электродов 100 см^2 и расстояние между ними 5 см ?
3. При какой напряженности поля в воздухе начнется самостоятельный разряд, если энергия ионизации молекул равна $2,4 \cdot 10^{-18}$ Дж, а длина свободного пробега 5 мкм ? Какова скорость электронов при ударе о молекулы?
4. В телевизионном кинескопе ускоряющее анодное напряжение равно 16 кВ , а расстояние от анода до экрана составляет 30 см . За какое время электроны проходят это расстояние?
5. В электронно-лучевой трубке поток электронов с кинетической энергией $E_k = 8 \text{ кэВ}$ движется между пластинами плоского конденсатора длиной $x = 4 \text{ см}$, расстояние между пластинами $l = 2 \text{ см}$. Какое напряжение нужно подать на пластины конденсатора, чтобы смещение электронного пучка на выходе из конденсатора оказалось равным $y = 0,8 \text{ см}$?

Творческое задание

Подготовьте сообщение по темам (на выбор):

1. «Виды самостоятельных разрядов».
2. «Плазма и ее свойства».
3. «Принцип действия молниеотвода».
4. «Электровакuumные приборы: диод, триод».

Итоги главы 12

Основные величины	Формулы расчета
Сила тока в металлах и вакууме	$I = e nSv_{dp}$
Плотность тока в металлах и вакууме	$j = e nv_{dp}$
Степень диссоциации	$\alpha = \frac{N_i}{N}$
Энергия ионизации в газах	$E_i = \frac{mv^2}{2} = qE\lambda$; $E = q\frac{U}{l}\lambda$

Законы, правила

Первый закон Фарадея

Масса вещества, выделившегося при электролизе, прямо пропорциональна прошедшему через раствор заряду.

Второй закон Фарадея

Электрохимические эквиваленты веществ прямо пропорциональны их химическим эквивалентам.

Глоссарий

Гальваностегия – электрохимический процесс нанесения на металлическое изделие защитного или декоративного слоя из другого металла.

Диод полупроводниковый – контакт полупроводников *p*-типа и *n*-типа.

Плотность тока – физическая величина, равная отношению силы тока к площади поперечного сечения проводника.

Полупроводник – вещество, которое по своей удельной проводимости занимает промежуточное место между проводниками и диэлектриками, и отличается от проводников сильной зависимостью удельной проводимости от концентрации примесей, температуры и воздействия различных видов излучения.

Примесная проводимость – проводимость в полупроводниках с акцепторной или донорной примесью.

Рекомбинация – процесс соединения ионов в нейтральные молекулы.

Собственная проводимость – электронно-дырочная проводимость полупроводников.

Степень диссоциации – физическая величина, которая показывает, какая часть молекул распалась на ионы.

Сверхпроводимость – состояние проводника, при котором его электрическое сопротивление близко к нулю.

Сверхпроводник – вещество, находящееся в состоянии сверхпроводимости.

Температурный коэффициент сопротивления – физическая величина, которая показывает, как изменяется сопротивление проводника при нагревании на 1 К.

Термистор – полупроводниковый резистор, сопротивление которого зависит от температуры.

Термоэлектронная эмиссия – испускание свободных электронов из металла при его нагревании до высокой температуры.

Транзистор – полупроводниковый прибор с двумя *p-n*-переходами, служащий для усиления сигнала.

Ударная ионизация – образование положительно заряженных ионов в результате столкновений атомов или молекул с быстрыми электронами.

Фоторезистор – полупроводниковый резистор, сопротивление которого зависит от освещенности.

Электролиты – вещества, водные растворы и расплавы которых являются проводниками.

Электролитическая диссоциация – распад молекул на ионы под действием растворителя.

Электролиз – явление выделения чистого вещества на электродах при прохождении тока через электролит.

Электрохимический эквивалент – физическая величина, которая показывает, какая масса вещества выделяется на электроде при прохождении через электролит единичного заряда.

Электронно-лучевая трубка – вакуумный прибор, с помощью которого исследуют быстро переменные электромагнитные явления в электрических цепях.

ГЛАВА 13

МАГНИТНОЕ ПОЛЕ

История магнетизма уходит корнями в глубокую древность, к античным цивилизациям Малой Азии. Именно на территории Малой Азии, в Магнезии, находили горную породу, образцы которой притягивались друг к другу. По названию местности такие образцы и стали называть «магнетиками». Магнетики взаимодействуют посредством магнитного поля. Магнитное поле может существовать и без постоянного магнита, оно создается вокруг движущихся заряженных частиц. После Большого взрыва, с самого первого момента существования Вселенной, пространство было заполнено множеством движущихся протонов, электронов, и ионов водорода и гелия. В 2010 г. астрофизики Шиничиро Андо из Калифорнийского технологического института и Александр Кусенко из Калифорнийского университета Лос-Анджелеса обнаружили реликтовый магнитный фон Вселенной по снимкам сверхмассивных черных дыр. По их мнению, снимки не были резкими из-за магнитного фона, пронизывающего всю Вселенную. *Магнитное поле – это вид материи, особенностью которой является действие на движущийся электрический заряд, проводники с током, тела, обладающие магнитным моментом.*

Технические применения магнитного поля лежат в основе всей электротехники, радиотехники и электроники. Магнитные поля используются в дефектоскопии, для удержания горячей плазмы в условиях управляемого термоядерного синтеза, в ускорителях заряженных частиц.

Изучив главу, вы сможете:

- объяснить физический смысл вектора магнитной индукции на основе решения задач и современных достижений техники (поезд на магнитной подушке и др.);
- объяснять принцип действия электроизмерительных приборов, электродвигателей;
- анализировать принцип действия циклотрона, магнитной ловушки, токамака, адронного коллайдера и объяснять природу полярного сияния;
- исследовать действие магнитного поля на движущиеся заряженные частицы;
- классифицировать вещества по их магнитным свойствам и определять сферы их применения;
- анализировать современные области использования магнитных материалов (неодимовые магниты, датчики, сейсмографы, металлоискатели) и обсуждать тенденции их применения.

§ 45. Взаимодействие проводников с током, опыты Ампера. Вектор магнитной индукции. Индукция магнитного поля бесконечно прямого и кругового проводников с током. Правило буравчика

Ожидаемый результат

Прочитав параграф, вы сможете:

- объяснить физический смысл вектора магнитной индукции на основе решения задач и современных достижений техники (поезд на магнитных подушках и др.).

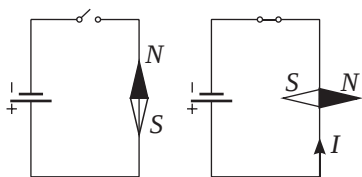


Рис. 261. Опыт Эрстеда



Ответьте на вопрос

Почему при постановке опыта Эрстед располагал проводник с током вдоль меридиана Земли?

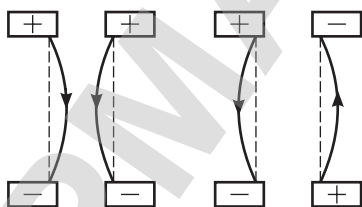


Рис. 262. Взаимодействие проводников с током

I. опыты Эрстеда

В 1820 г. датскому физiku Эрстеду удалось на опыте обнаружить магнитное поле вокруг проводника с током. Над проводом, расположенным вдоль меридиана, он подвесил магнитную стрелку на тонкой нити (рис. 261). При замыкании ключа магнитная стрелка поворачивалась и устанавливалась под прямым углом к проводу. Эрстед повторил опыт для газоразрядных трубок и трубок с электролитами. Он пришел к выводу, что в любой среде вокруг движущихся зарядов возникает магнитное поле.

Из трех действий электрического тока: теплового, химического и магнитного, только магнитное действие проявляется при любых условиях и в любых средах.

II. опыты Ампера

Действие магнитного поля постоянного магнита на проводник с током и непосредственное взаимодействие проводников с током было изучено А. Ампером. Он провел ряд опытов, в результате которых пришел к следующим выводам:

- 1) Два параллельных проводника притягиваются, если токи в них совпадают по направлению; отталкиваются, если токи в них противоположны (рис. 262).
- 2) Проводник с током, подвешенный на тонких нитях, располагается перпендикулярно оси полюсового магнита (рис. 263).
- 3) Магнитное поле Земли оказывает ориентирующее действие на рамку с током так же, как на магнитную стрелку. При этом ось магнитной стрелки перпендикулярна плоскости витка (рис. 264).

III. Магнитная индукция прямого и кругового тока

Физическую величину, характеризующую силовое воздействие магнитного поля на проводник с током, называют **магнитной индукцией**.

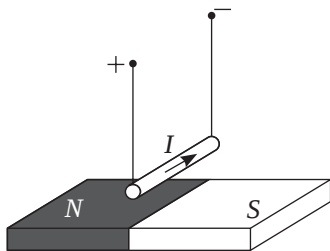


Рис. 263. Взаимодействие полосового магнита и проводника с током



Рис. 264. Перпендикуляр к плоскости рамки с током ориентирован в пространстве так же, как магнитная стрелка

Французские физики Ж. Био и Ф. Савар в 1820 г. опытным путем установили величину магнитной индукции для прямого тока:

$$B = \frac{\mu_0 I}{2\pi a}, \quad (1)$$

где B – магнитная индукция прямого проводника с током, силовая характеристика поля; I – сила тока в проводнике, a – кратчайшее расстояние от точки пространства до проводника (рис. 265), $\mu_0 = 4\pi \cdot 10^{-7} \text{ Н/А}^2$ – магнитная постоянная. Единица измерения магнитной индукции в СИ – 1 тесла:

$$[B] = 1 \text{ Тл} = 1 \frac{\text{Н}}{\text{А} \cdot \text{м}}.$$

Французский физик и математик П. Лаплас, обобщив экспериментальные данные, получил закономерность, позволяющую определить индукцию магнитного поля проводника любой формы:

$$|\vec{B}| = \left| \sum_{i=1}^n \vec{B}_i \right| = \frac{\mu_0}{4\pi} \sum \frac{I_i \Delta l_i \sin \alpha_i}{R_i^2}, \quad (2)$$

где $\vec{B}_i$ – магнитная индукция поля, $I_i \Delta l_i$ – элемент тока, α_i – угол между элементом тока и прямой, соединяющей элемент тока с точкой пространства, в которой определяют магнитную индукцию поля; R_i – расстояние между точкой пространства и элементом тока.

Закономерность (2) – математическое выражение закона Био – Савара – Лапласа. На основе закона получена формула расчета магнитной индукции в центре кругового тока (рис. 266):

$$B = \frac{\mu_0 I}{2R}, \quad (3)$$

где R – радиус витка.

Индукция магнитного поля внутри соленоида – катушки с большим количеством витков N , с длиной



Ответьте на вопрос

Почему молния способна наэлектризовать железные тела?

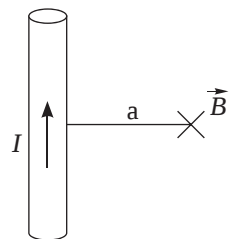


Рис. 265. Магнитная индукция поля уменьшается при удалении от проводника с током

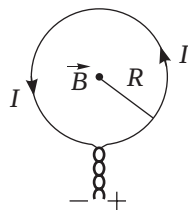


Рис. 266. Магнитная индукция в центре кругового тока уменьшается при увеличении радиуса витка

значительно превышающей диаметр витка $l \gg d$, рассчитанная по этому закону, равна:

$$B = \frac{\mu_0 IN}{l} \quad (4)$$

или $B = \mu_0 nI, \quad (5)$

где $n = \frac{N}{l}$ – число витков на единицу длины.

Магнитная индукция поля при постоянном значении тока остается величиной постоянной, следовательно, магнитное поле внутри соленоида однородно, силовые линии параллельны между собой (рис. 267).

Закон Био – Савара – Лапласа согласуется с принципом суперпозиции для магнитных полей:

$$\vec{B} = \vec{B}_1 + \vec{B}_2 + \dots + \vec{B}_n.$$

Магнитную индукцию поля, созданного несколькими проводниками с током, определяют как векторную сумму магнитных индукций этих полей.

IV. Силовые линии магнитного поля прямого и кругового тока

Силовые линии магнитного поля – это линии, касательные к которым в каждой точке указывают направление вектора магнитной индукции.

Направление линий магнитного поля указывает северный полюс магнитной стрелки (рис. 268). Это направление принято за направление магнитной индукции поля. Направление силовых линий магнитного поля прямого и кругового тока определяют по правилу буравчика.

Если поступательное движение буравчика v_n совместить с направлением тока в проводнике, то вращательное движение v_v рукоятки укажет направление силовых линий магнитного поля (рис. 269).

Для изображения магнитных силовых линий в плоскости используют точки – «наконечники» стрел – и крестики – их «оперения», при этом сам вектор магнитной индукции представляют как стрелу. Если вектор изображен точкой, то он направлен перпендикулярно плоскости рисунка вверх, если крестиком, то вектор также перпендикулярен плоскости рисунка, но направлен вниз. На рисунке 270 изображен разрез проводника, в котором ток течет вверх. Силовые линии магнитного поля вокруг проводника представляют собой концентрические окружности, которые направлены против часовой стрелки. На рисунке 271 разрез выполнен вдоль проводника с током, силовые линии магнитного поля перпендикулярны плоскости рисунка, слева от проводника они направлены вверх, справа – вниз. Силовые линии кругового тока для нескольких витков изображены на рисунках 272, а, б, в.

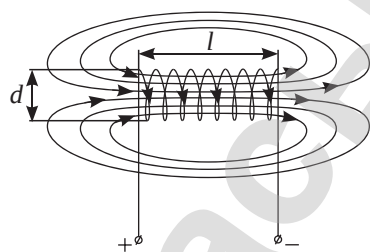


Рис. 267. Магнитное поле внутри соленоида однородное

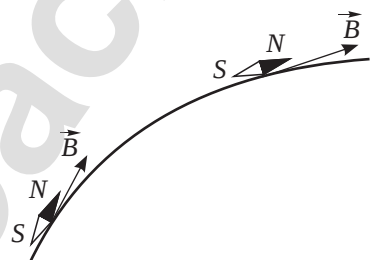


Рис. 268. Северный полюс магнитной стрелки указывает направление силовых линий магнитного поля

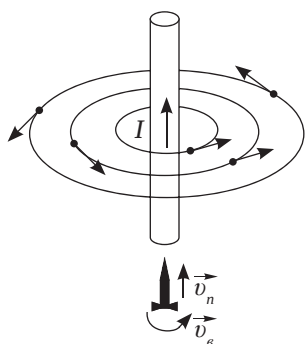


Рис. 269. Определение направления силовых линий магнитного поля проводника с током по правилу буравчика

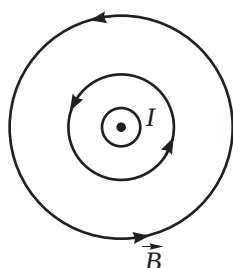


Рис. 270. Изображение силовых линий при поперечном сечении проводника

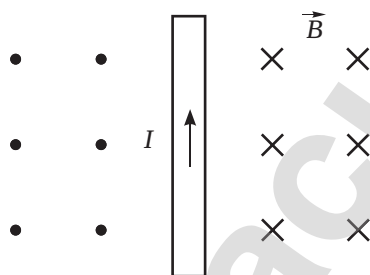
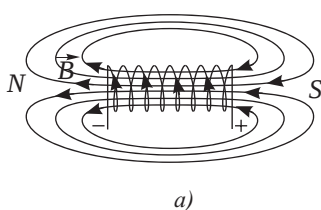
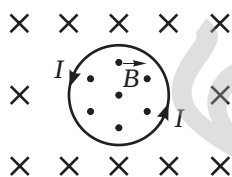


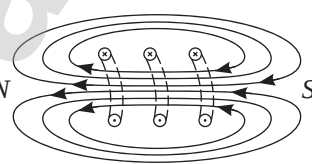
Рис. 271. Изображение силовых линий при продольном сечении проводника



а)



б)



в)

Рис. 272. Силовые линии кругового тока

Направление магнитного поля катушки с током легко определить с помощью правила правой руки.

Если правой рукой охватить катушку так, чтобы четыре пальца указывали направление тока в ее витках, то большой палец, отогнутый на 90° , укажет направление магнитного поля.

В отличие от силовых линий электрического поля силовые линии магнитного поля всегда замкнуты.



Задание 1

Рассмотрите рисунки 272 а, б, в. На основе правила буравчика или правила правой руки поясните направление силовых линий магнитного поля, созданного круговым током.

V. Гипотеза Ампера

В 1820 г. А. Ампер, заметив сходство магнитного поля кругового тока с магнитным полем полосового магнита (рис. 272 а и 273), выдвинул гипотезу о том, что магнитные свойства постоянных магнитов обусловлены существующими в них элементарными круговыми токами. Благодаря открытиям в области строения атома выяснилось, что элементарные токи созданы движением электронов вокруг ядра.

На рисунке 274 изображено упорядоченное расположение элементарных токов в намагниченном железном бруске. При делении бруска на части расположение элементарных токов не меняется. Малый брусок обладает теми же свойствами, что и большой. Таким образом, гипотеза Ампера легко объясняет неотделимость полюсов магнита и образование малых магнитов при делении большого.

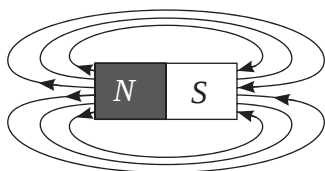


Рис. 273. Магнитное поле
полосового магнита

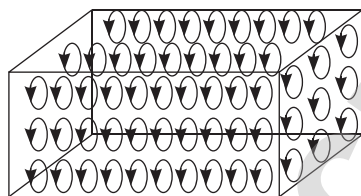


Рис. 274. Магнитное поле создано круговым
движением электронов вокруг ядра

Интересно знать!

Тель-Авив планирует стать первым городом в мире с системой общественного транспорта на магнитной подвеске Sky Tran (рис. 275). Систему разработали инженеры из НАСА и компании SkyTran, которая базируется в Исследовательском центре НАСА им. Эймса в Калифорнии. Разработчики утверждают, что это экологически чистая, недорогая, быстрая и удобная альтернатива автомобилям и автобусам.



Рис. 275. Транспорт
на магнитной подвеске

Задание 2

По рисунку 276 объясните принцип действия системы, приводящей поезд на магнитной подушке в движение, и левитации. Используя материалы сети Интернет, сравните технологии магнитных подвесов первых поездов, построенных в Берлине, Бирмингеме, Шанхае, Японии.

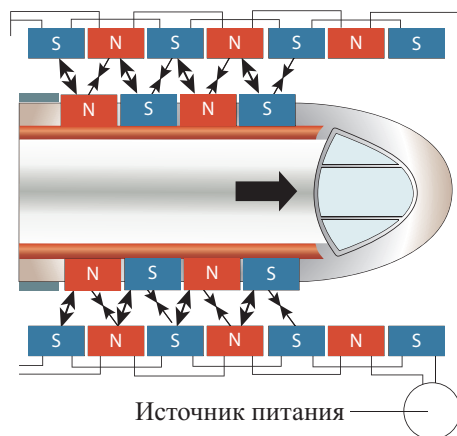
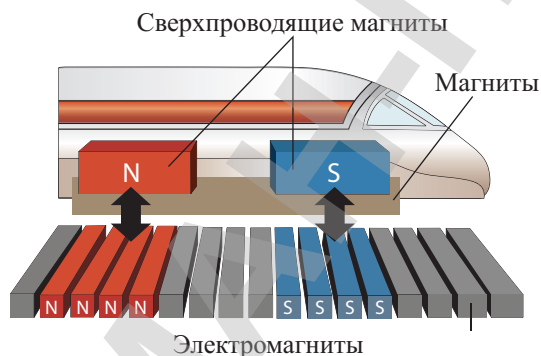


Рис. 276. Система для подвеса (левитации) поезда на магнитной подушке

ПРИМЕР РЕШЕНИЯ ЗАДАЧИ

Прямой бесконечный провод, по которому течет ток I , имеет виток, как показано на рисунке а. Во сколько раз индукция магнитного поля в точке O при этом отличается от индукции магнитного поля прямого (рис. б) тока в этой же точке.

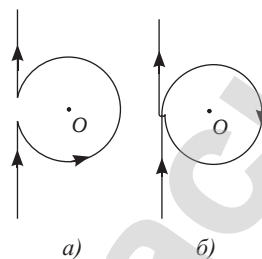
Дано:
 I

$\frac{B_0}{B'_0} - ?$

Решение:

Когда провод изогнут так, как показано на *рисунке а*, векторы индукций магнитного поля $\vec{B}_1$ и $\vec{B}_2$, создаваемые прямым током и витком, направлены в противоположные стороны, поэтому:

$$B_0 = B_1 - B_2 = \frac{\mu_0 I}{2r} \left(\frac{1}{\pi} - 1 \right).$$



Когда провод изогнут так, как показано на *рисунке б*, векторы индукций магнитного поля направлены в одну сторону, следовательно:

$$B'_0 = B_1 + B_2 = \frac{\mu_0 I}{2r} \left(1 + \frac{1}{\pi} \right), \quad \text{тогда} \quad \frac{B_0}{B'_0} = \frac{\pi - 1}{\pi + 1}.$$

Ответ: $\frac{B_0}{B'_0} = \frac{\pi - 1}{\pi + 1}.$

Контрольные вопросы

1. Каким образом можно создать магнитное поле?
2. Как взаимодействуют проводники с током?
3. Как изображают магнитное поле?
4. Что определяют по правилу буравчика?
5. Как магнитная индукция поля проводника с током зависит от силы тока?
6. В чем заключается гипотеза Ампера?



Упражнение

45

1. Имеется два стальных бруска, один из которых намагничен. Как узнать, какой именно брусок намагничен, не пользуясь ничем, кроме этих брусков?
2. В прямом бесконечно длинном проводнике сила тока $I = 20$ А. Определите магнитную индукцию в точке, удаленной на расстояние $r = 5$ см от проводника.
3. Два длинных параллельных проводника находятся на расстоянии $d = 5$ см друг от друга. По проводникам в противоположных направлениях текут одинаковые токи $I = 10$ А. Определите магнитную индукцию в точке, находящейся на расстоянии $r_1 = 2$ см от первого и $r_2 = 3$ см от второго проводника.
4. В центре кругового тока радиусом $R = 5,8$ см индукция магнитного поля $B = 1,3 \cdot 10^{-4}$ Тл. Определите силу тока.

Творческое задание

Подготовьте сообщения с ppt-презентацией по темам (на выбор):

1. «Сверхпроводящие магниты».
2. «Использование магнитов в технике».

§ 46. Сила Ампера. Правило левой руки

Ожидаемый результат

Прочитав параграф, вы сможете:

- объяснять принцип действия электроизмерительных приборов, электродвигателей.

1. Закон Ампера

Опыты, проведенные А. Ампером, показали, что сила, действующая на проводник с током, зависит как от величины магнитной индукции, так и от ее направления. В этом легко убедиться на опыте (рис. 277). Силу, с которой магнитное поле действует на проводник с током, называют силой Ампера.

По результатам проведенных опытов Ампер пришел к выводу, что:

Сила, с которой магнитное поле действует на проводник с током, равна произведению перпендикулярной составляющей магнитной индукции, силе тока и длине проводника.

$$F_A = B_{\perp} I \cdot l \text{ или } F_A = BI \cdot l \sin \alpha, \quad (1)$$

где α – угол между вектором магнитной индукции $\vec{B}$ и направлением тока. Из полученной формулы следует, что сила взаимодействия максимальна при условии, если $\sin \alpha = 1$ или $\alpha = 90^\circ$.

На основании закона Ампера раскрыт физический смысл магнитной индукции как силовой характеристики магнитного поля:

$$B = \frac{F_A}{Il \sin \alpha} \quad (2)$$

и установлена связь единицы измерения магнитной индукции с единицей измерения силы:

$$[B] = 1 \text{ Тл} = 1 \frac{\text{Н}}{\text{А} \cdot \text{м}}.$$

Повторите опыты Ампера. Подключите проводник к источнику постоянного тока, внесите в поле подковообразного магнита (рис. 277). Зафиксируйте направление отклонения проводника с током. Поменяйте полюса магнита, выясните, как изменится угол отклонения проводника.

Повторите опыт с двумя магнитами. Измените силу тока в проводнике.

Сделайте выводы из проведенных опытов.

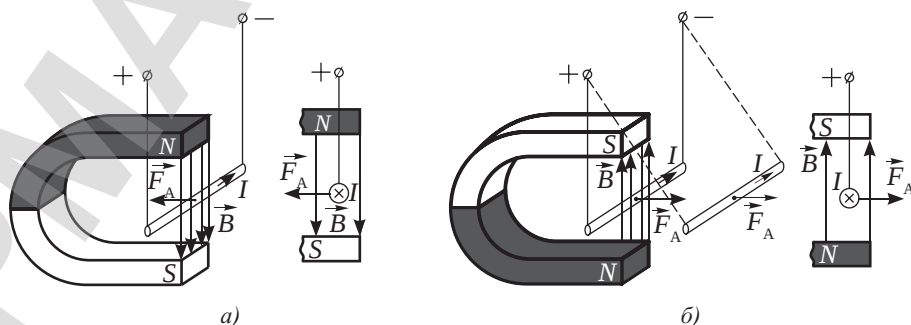


Рис. 277. Отклонение проводника с током в магнитном поле

II. Направление силы Ампера

Направление действия силы Ампера определяют по правилу левой руки.

Если левую руку расположить так, чтобы вектор индукции входил в ладонь, а четыре вытянутых пальца указывали направление тока, то отогнутый на 90° большой палец укажет направление силы Ампера.

Правило левой руки справедливо, если направление вектора магнитной индукции и силы тока в проводнике составляет угол 90° . Если угол меньше или больше 90° , то вектор магнитной индукции $\vec{B}$ необходимо предварительно разложить на параллельную и перпендикулярную составляющие относительно проводника с током (рис. 278).

$$B_{\perp} = B \sin \alpha. \quad (3)$$

Направление силы Ампера определяют по перпендикулярной составляющей.

III. Сила взаимодействия параллельных токов

Пусть по параллельным проводникам, которые расположены на расстоянии r , протекают токи I_1 и I_2 . Магнитное поле первого проводника действует на второй проводник с силой (рис. 279), равной согласно закону Ампера:

$$F_A = B_1 I_2 l \sin \alpha. \quad (4)$$

Магнитная индукция поля прямого проводника с током равна:

$$B_1 = \frac{\mu_0 I_1}{2\pi r}. \quad (5)$$

Подставив (5) в (4), получим формулу расчета силы взаимодействия прямых проводников с током:

$$F_A = \frac{\mu_0 I_1 I_2 l}{2\pi r}. \quad (6)$$

IV. Рамка с током в магнитном поле

Ампером было обнаружено ориентирующее действие магнитного поля Земли на рамку с током. Поместив рамку с током в поле подковообразного магнита, он наблюдал ее вращение: рамка разворачивалась северным полюсом магнитного поля, созданного током, к южному полюсу магнита (рис. 280). В однородном поле рамка совершает только вращательное движение. В неоднородном поле рамка, разворачиваясь, смещается в направлении увеличения магнитной индукции поля (рис. 281).



Задание 1

Используя правило левой руки, убедитесь в том, что отклонение проводника с током на рисунках 277, а и 277, б изображено верно.

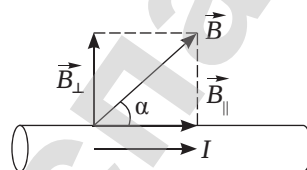


Рис. 278. Разложение вектора магнитной индукции на составляющие



Ответьте на вопрос

1. Почему проводник с током, расположенный параллельно вектору индукции, не отклоняется?
2. Почему катушка с током сжимается, если через нее пропустить постоянный ток?

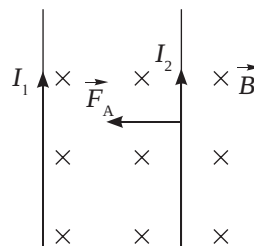


Рис. 279. Взаимодействие проводников с током



Ответьте на вопрос

Почему рамка с током в магнитном поле не прекращает свое вращение в положении равновесия?

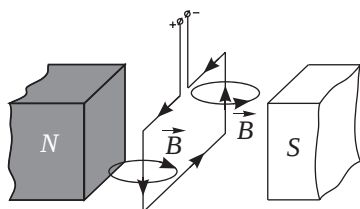


Рис. 280. Взаимодействие магнитных полей постоянного магнита и рамки с током

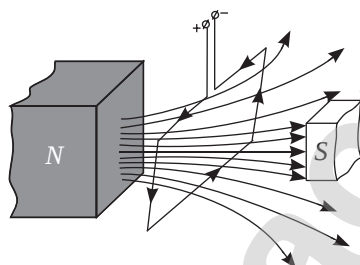


Рис. 281. Рамка с током в неоднородном магнитном поле

V. Вращающий момент, действующий на рамку с током в магнитном поле

Определим вращающий момент сил, действующих на рамку в трех ее положениях:

1. Расположим рамку с током между полюсами магнита таким образом, чтобы нормаль к площади рамки составила с направлением магнитной индукции угол 90° (рис. 282 а, б).

Направление нормали к площади рамки определяют по правилу буравчика относительно тока в контуре, оно совпадает с направлением собственного магнитного поля, созданного током в рамке.

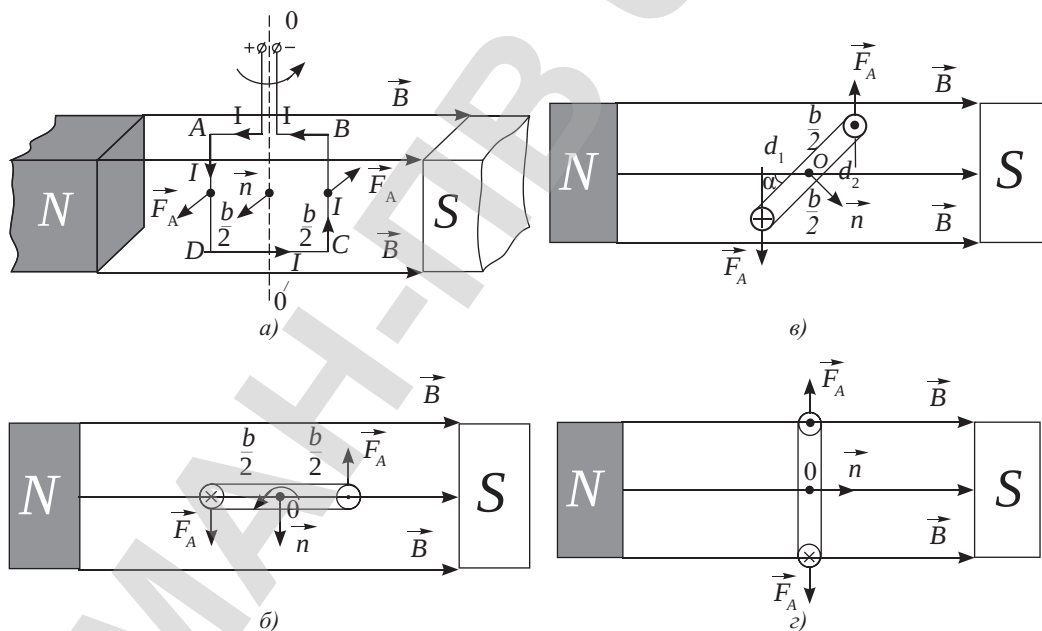


Рис. 282. Плечи силы Ампера в различных положениях рамки с током, вращающейся в однородном магнитном поле, меняются

Стороны рамки AB и CD параллельны вектору магнитной индукции, следовательно, магнитное поле не влияет на них. На стороны AD и BC действуют силы Ампера, равные по величине, но направленные в противоположные стороны. Точки приложения сил разные, поэтому под действием пары сил рамка вращается против часовой стрелки. Сумма моментов сил равна:

$$M = M_1 + M_2 = F_A \frac{b}{2} + F_A \frac{b}{2} = F_A b = B \cdot I \cdot l \cdot b \sin \alpha,$$

где b – ширина рамки, l – длина рамки, α – угол между вектором $\vec{B}$ и I .

Заменим произведение длины рамки на ширину площадью рамки: $S = lb$, тогда: $M = BIS \sin \alpha$.

Угол $\alpha = 90^\circ$, следовательно $\sin \alpha = 1$, вращающий момент примет максимальное значение:

$$M_{\max} = BIS.$$

- Определим момент сил, когда рамка развернется на некоторый угол $\varphi = \omega t$, где ω – угловая скорость вращения рамки (рис. 282, в). Плечи сил станут равными: $d_1 = \frac{b}{2} \cos \varphi$, $d_2 = \frac{b}{2} \cos \varphi$, запишем вращающий момент сил с учетом изменения плеч: $M = Fb \cos \varphi = BIS \cos \varphi$.

Выразим угол поворота рамки φ через угол между нормалью к площади рамки и вектором магнитной индукции $\vec{B}$, обозначив его α , тогда $M = BIS \cos(90^\circ - \alpha)$ или: $M = BIS \sin \alpha$.

- В момент, когда нормаль к рамке совпадает по направлению с вектором магнитной индукции, плечи сил и вращательный момент становятся равными нулю (рис. 282, г), такое положение рамки является положением равновесия.



Задание 3

Рассмотрите схему электродвигателя.

- Установите соответствие между названиями основных частей электродвигателя и номерами указателей на рисунке 284. Составные части электродвигателя: статор, коллектор, щетки, обмотка ротора, обмотка возбуждения, сердечник ротора.
- Поясните принцип действия двигателя.

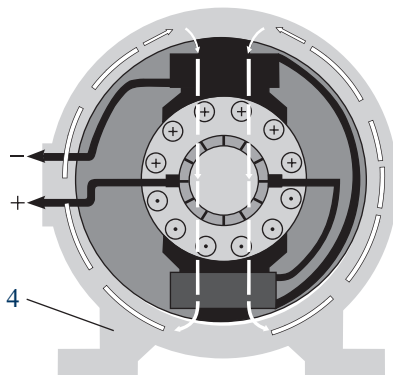
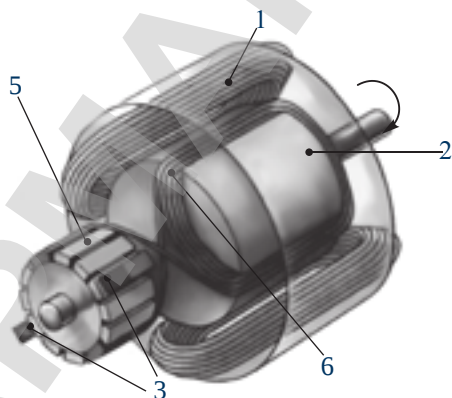


Рис. 284. Электродвигатель



Задание 2

Рассмотрите схему прибора магнитоэлектрической системы (рис. 283). Назовите основные части прибора и принцип его действия. Действие каких приборов основано на этом принципе?

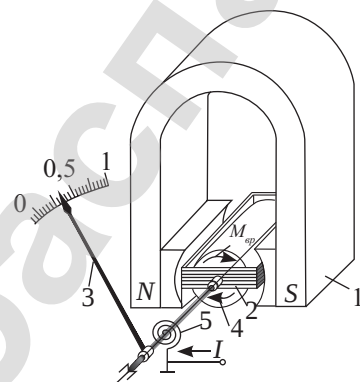


Рис. 283. Измерительный прибор магнитоэлектрической системы



Ответьте на вопросы

- Какова роль сердечника в приборах магнитоэлектрической системы?
- Почему магнитоэлектрические приборы служат для измерения только постоянного тока и напряжения?



Ответьте на вопросы

1. Почему коллектор двигателя постоянного тока состоит из отдельных пластин?
2. Почему в мощных двигателях вместо постоянных магнитов используют электромагниты?

ПРИМЕР РЕШЕНИЯ ЗАДАЧИ

Квадратная рамка помещена около длинного прямого провода, по которому течет ток $I = 10$ А. Рамка и провод лежат в одной плоскости. Сторона рамки $a = 10$ см, расстояние от провода до центра рамки $d_0 = 15$ см. Какая сила действует на рамку, когда по ней течет ток $I_0 = 0,1$ А?

Дано:

$$I = 10 \text{ А}$$

$$a = 10 \text{ см}$$

$$d_0 = 15 \text{ см}$$

$$I_0 = 0,1 \text{ А}$$

$$F = ?$$

СИ

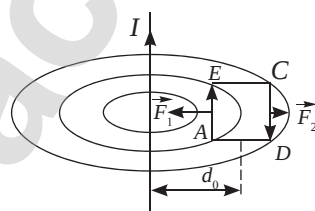
$$0,1 \text{ м}$$

$$0,15 \text{ м}$$

Решение:

Поле, созданное проводом,

$B = \frac{\mu_0 I}{2\pi r}$ неоднородно: сторона AE находится в более сильном магнитном поле, чем сторона CD (см. рис.):



$$B_1 = \frac{\mu_0 I}{2\pi \left(d_0 - \frac{a}{2}\right)}; \quad B_2 = \frac{\mu_0 I}{2\pi \left(d_0 + \frac{a}{2}\right)}. \quad (1)$$

На указанные стороны рамки действуют силы Ампера, равные:

$$F_1 = I_0 B_1 a; \quad F_2 = I_0 B_2 a.$$

Силы, действующие на рамку, направлены в противоположные стороны, вектор магнитной индукции и направление тока в рамке взаимно перпендикулярны, следовательно, их равнодействующая равна:

$$F = F_1 - F_2 = I_0 a (B_1 - B_2). \quad (2)$$

Подставив формулы (1) в (2), получим:

$$F = \frac{\mu_0 I \cdot I_0 a^2}{2\pi \left(d_0^2 - \frac{a^2}{4}\right)}.$$

Выполним расчеты:

$$F = \frac{4\pi \cdot 10^{-7} \frac{\text{Н}}{\text{А}^2} \cdot 10 \text{ А} \cdot 0,1 \text{ А} \cdot 0,01 \text{ м}^2}{2\pi \left(0,0225 \text{ м}^2 - \frac{0,01 \text{ м}^2}{4}\right)} = 10^{-7} \text{ Н}.$$

Ответ: $F = 10^{-7}$ Н.

Контрольные вопросы

1. Как определяют направление силы Ампера? Значение силы Ампера?
2. Каким способом установлена единица измерения силы тока?
3. Какое действие оказывает на рамку с током однородное магнитное поле? Неоднородное магнитное поле?
4. Чему равен вращающий момент, действующий на рамку с током, в магнитном поле?
5. Как связаны вращающий момент с магнитным моментом рамки?



Упражнение

46

1. Прямолинейный проводник с током длиной $l = 1$ м, по которому течет ток $I = 1,5$ А, находится в магнитном поле с индукцией $B = 0,1$ Тл. Определите силу, действующую на проводник, если силовые линии магнитного поля параллельны оси проводника.
2. В горизонтальном магнитном поле находится прямолинейный проводник, расположенный горизонтально и перпендикулярно линиям магнитной индукции. Какова сила тока, который должен течь в проводнике, чтобы сила натяжения в поддерживающих его проводах стала равной нулю? Магнитная индукция $B = 0,01$ Тл. Отношение массы проводника к его длине $\frac{m}{l} = 0,1$ кг/м.
3. Проводящий стержень массой $m = 0,1$ кг и длиной $l = 0,25$ м лежит на горизонтальной поверхности перпендикулярно силовым линиям однородного горизонтального магнитного поля с индукцией $B = 0,2$ Тл. Какую горизонтальную силу нужно приложить перпендикулярно оси стержня для его равномерного поступательного движения, если по стержню течет ток $I = 10$ А? Коэффициент трения между стержнем и поверхностью $\mu = 0,1$.
4. Прямой проводник укреплен горизонтально. Параллельно ему в той же вертикальной плоскости, ниже, на расстоянии 1 м расположен другой прямой проводник массой $m = 1$ кг и длиной $l = 9,81$ м. По нему пропускают ток $I = 2$ А. Чему должна быть равна сила тока в верхнем проводнике, чтобы он уравновешивал вес нижнего проводника?
5. Рамка площадью $S = 400$ см² помещена в однородное магнитное поле так, что нормаль к рамке составляет угол $\alpha = 60^\circ$ с вектором магнитной индукции $B = 0,2$ Тл. Сила тока в рамке $I = 4$ А. Найдите вращающий момент, действующий на рамку.

§ 47. Сила Лоренца.

Движение заряженной частицы в магнитном поле

Ожидаемый результат

Прочитав параграф, вы сможете:

- анализировать принцип действия циклотрона, адронного коллайдера, токамака, магнитной ловушки и объяснять природу полярного сияния;
- исследовать действие магнитного поля на движущиеся заряженные частицы.



Хендрик Антон Лоренц (1853–1928) – голландский физик-теоретик. Лауреат Нобелевской премии по физике 1902 г. за исследование влияния магнетизма на излучения. Почетный доктор Парижского и Кембриджского университетов, член Лондонского королевского и Германского физического обществ, с 1881 г. – член Нидерландской королевской академии наук. Х. Лоренц развил электромагнитную теорию света и электронную теорию материи.

I. Сила Лоренца

Поскольку сила Ампера – это сила, действующая на проводник с током, а ток – это упорядоченное движение заряженных частиц, то силу, действующую на одну заряженную частицу, можно выразить соотношением:

$$F_L = \frac{F_A}{N}, \quad (1)$$

где N – число заряженных частиц.

Сила Лоренца – это сила, которая действует со стороны магнитного поля на движущуюся в нем заряженную частицу.

Согласно закону Ампера:

$$F_A = BIl \sin \alpha, \quad (2)$$

выразим силу тока в проводнике через заряд одной частицы:

$$I = \frac{q}{t} = \frac{q_0 N}{t}. \quad (3)$$

Подставив (2) и (3) в (1), получим:

$$F_L = \frac{Bq_0 Nl \sin \alpha}{tN}.$$

Учитывая, что $v_{др} = \frac{l}{t}$, где $v_{др}$ – скорость направленного движения зарядов, получим формулу расчета силы Лоренца:

$$F_L = q_0 B v_{др} \sin \alpha, \quad (4)$$

где α – угол между вектором магнитной индукции $\vec{B}$ и направлением скорости $\vec{v}$.

Направление силы Лоренца, действующей на положительную частицу, определяют по правилу левой руки. Для отрицательных частиц направление силы противоположное.

Сила Лоренца действует как на заряженные частицы, создающие ток в проводнике, так и на заряженные частицы, свободно движущиеся в пространстве.

II. Радиус кривизны траектории заряженной частицы, движущейся в магнитном поле

Пусть заряженная частица влетает в магнитное поле перпендикулярно линиям магнитной индукции. В этом случае, поскольку сила Лоренца направлена перпендикулярно к скорости движения заряда, она

создает частице центростремительное ускорение. Под действием силы Лоренца частица движется равномерно по окружности радиусом R (рис. 285).

Для заряженной частицы, движущейся с ускорением, выполняется второй закон Ньютона:

$$m\vec{a} = \vec{F}_L. \quad (5)$$

Подставим в уравнение (5) формулу расчета силы Лоренца (4), заменив ускорение отношением квадрата скорости к радиусу вращения $a_n = \frac{v^2}{R}$, получим:

$$\frac{mv^2}{R} = qBv \sin \alpha. \quad (6)$$

В рассматриваемом случае $\alpha = 90^\circ$, $\sin \alpha = 1$, при этом условии из уравнения (6) следует, что радиус кривизны траектории равен:

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

Чем больше скорость частицы, тем больше радиус кривизны ее траектории в однородном магнитном поле $B = \text{const}$.

Ускоренное движение заряженных частиц и получение новых частиц при их столкновении получило применение в ряде устройств: циклотроне (рис. 287), коллайдере (рис. 288).

Основные радиоизотопы, которые производятся на циклотроне: Cd-109, Ge-68, Tl-201, Co-57, Ga-67.



Рис. 287. Изохронный циклотрон У-150М в институте ядерной физики Министерства энергетики Республики Казахстан



Задание 1

Рассмотрите рисунок 285. Выясните, верно ли изображено направление силы Лоренца? Какое правило вы использовали для выполнения задания?

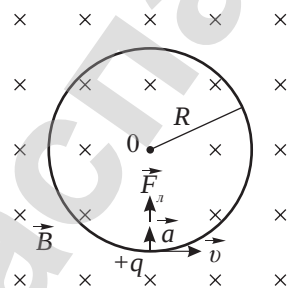


Рис. 285. Траектория частицы, скорость которой перпендикулярна силовым линиям однородного магнитного поля – окружность



Задание 2

По принципиальной схеме циклотрона (рис. 286) поясните принцип его действия.

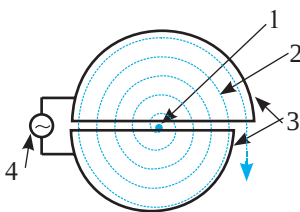


Рис. 286. Принципиальная схема циклотрона
1 – место поступления (протонов, ионов);
2 – траектория ускоряемой частицы; 3 – ускоряющие электроды (дуанты); 4 – генератор переменного напряжения.
Магнитное поле направлено перпендикулярно плоскости рисунка.

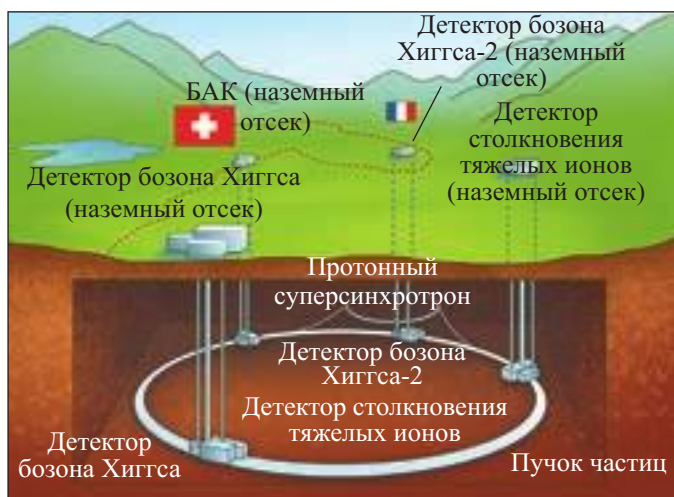


Рис. 288. Принципиальная схема устройства Большого адронного коллайдера (БАК)

Интересно знать!

БАК является самой крупной экспериментальной установкой в мире. В строительстве и исследованиях участвовали и участвуют более 10 тыс. ученых и инженеров из более чем 100 стран.

Ответьте на вопросы

1. Можем ли мы назвать коллайдер циклотроном на встречных пучках?
2. Предположите, для чего предназначены малый и большой кольца ускорителя.
3. Каким полем ускоряются заряженные частицы? Каким полем они удерживаются на орбите?
4. Какова основная цель исследований, проводимых учеными-физиками ЦЕРН (Европейского центра ядерных исследований) в БАКе (рис. 288)?

III. Движение заряженных частиц по винтовой траектории

Если заряженная частица влетает в магнитное поле под некоторым углом не равным 90° , то она движется по винтовой траектории, навивающейся на линии напряженности поля (рис. 290). Разложим вектор скорости на перпендикулярную и параллельную составляющие по отношению к направлению вектора магнитной индукции:

$$v_{\perp} = v \cdot \sin \alpha, \quad v_{\parallel} = v \cdot \cos \alpha,$$

Задание 3

Выведите формулы расчета периода и частоты вращения частицы в циклотроне.

Ответьте на вопрос

Влияет ли скорость частицы на период вращения?

Задание 4

Рассмотрите принципиальную схему устройства БАК (рис. 288). Назовите основные блоки и части БАКа.



Рис. 289. Компактный мюонный соленоид — место столкновения протонов.

В соленоид встроены детекторы для цифровых фотоаппаратов

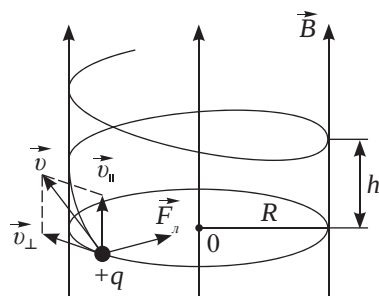


Рис. 290. Винтовая траектория движения частицы, влетающей в однородное магнитное поле под углом α

где α – угол между направлением скорости движения частицы $\vec{v}$ и вектором магнитной индукции $\vec{B}$. Под действием поперечной составляющей силы Лоренца частица будет описывать окружность радиусом:

$$R = \frac{m v \cdot \sin \alpha}{qB}. \quad (8)$$

Вместе с тем она будет перемещаться по инерции вдоль направления поля с постоянной скоростью $\vec{v}_{\parallel}$. За время совершения одного оборота, равного

$$T = \frac{2\pi R}{v_{\perp}} = \frac{2\pi m}{qB}, \quad (9)$$

частица сместится в направлении поля на расстояние:

$$h = v_{\parallel} T = v T \cos \alpha. \quad (10)$$

В случае движения отрицательной частицы направление вращательного движения будет противоположным.

Из уравнения (9) следует, что период вращения не зависит от скорости частицы.

IV. Сила Лоренца и полярное сияние

Влиянием магнитного поля Земли объясняется возникновение полярных сияний вблизи ее полюсов. Заряженные частицы, летящие из космоса, перемещаются вдоль линий индукции поля Земли, «навиваясь» на них (рис. 291). Частицы приближаются к Земле преимущественно в полярных областях, вызывая тлеющий разряд – полярное сияние (рис. 292). Полярные сияния бывают не только на Земле. Рентгеновской обсерваторией Чандра был сделан снимок полярного сияния на Юпитере (рис. 293).

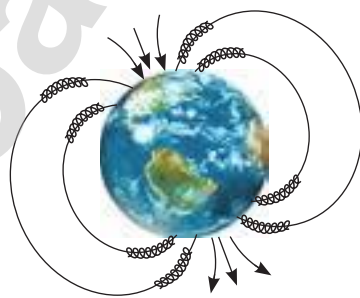


Рис. 291. Движение заряженных частиц в магнитном поле Земли



Рис. 292. Полярное сияние на Земле.
Фото из космоса



Рис. 293. Полярное сияние на Юпитере



Ответьте на вопросы

1. Почему цвет полярного сияния на Земле и Юпитере различен?
2. На каких планетах Солнечной системы происходят полярные сияния? При каких условиях они наблюдаются?



Ответьте на вопросы

1. Почему при определении силы Лоренца, действующей на отрицательную частицу, четыре пальца направляют в сторону, обратную направлению движения частицы?
2. Почему в неоднородном поле радиус кривизны траектории заряженной частицы меняется (рис. 294)?

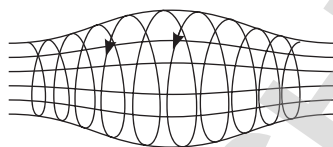


Рис. 294. Траектория движения заряженных частиц в неоднородном магнитном поле



Возьмите на заметку

«Токамак» – ТОроидальная КАмера с МАгнитными Катушками.

Плазма – это ионизированный газ.

V. Магнитная ловушка. Токамак

Магнитной ловушкой называют магнитное поле, созданное для ограничения движения заряженных частиц в некоторой области пространства. Ранее рассмотренные устройства – циклотрон, БАК – используют магнитную ловушку для удержания заряженных частиц на своих орбитах вращения. Такой же принцип используется в устройстве для осуществления термоядерных реакций «Токамак». Магнитная ловушка удерживает плазму, температура которой достигает миллионов градусов, от контакта с элементами термоядерного реактора в результате взаимодействия с заряженными частицами плазмы, вращающимися вокруг силовых линий магнитного поля. Магнитная ловушка обычно создается сверхмощными электромагнитами.

Рассмотрим принцип действия термоядерного реактора. Камерой токамак, в которой происходит взаимодействия ядер водорода, является вторичная обмотка трансформатора (рис. 295). Из камеры откачивают воздух, а затем заполняют ее смесью дейтерия и трития. С помощью первичной обмотки большого мощного трансформатора в камере создают вихревое электрическое поле. Электрическое поле вызывает протекание тока и зажигание в камере плазмы из дейтерия и трития.



Задание 5

На рисунке 294 укажите направление силовых линий магнитного поля, полагая, что заряженной частицей является электрон.



Рис. 295. Камерой токамак является вторичная обмотка трансформатора



Ответьте на вопросы

1. Какова основная идея проекта «Токамак» (рис. 296)? Почему запуск реактора приурочен к открытию выставки ЭКСПО-2017?
2. Как запуск установок токамак может повлиять на проблемы энергоснабжения населения Земли? На экологию нашей планеты?



Рис. 296. Казахстанский термоядерный материаловедческий проект «Токамак», запущен в ВКО в день открытия выставки ЭКСПО-2017



Запомните!

Работа силы Лоренца равна нулю.

Работу любой силы можно определить по основной формуле: $A = FS \cos \alpha$. Поскольку сила Лоренца всегда перпендикулярна скорости и перемещению частицы, множитель $\cos \alpha = 0$. Следовательно, работу сила Лоренца не совершает. Энергия частицы остается неизменной, а скорость постоянной.

ПРИМЕР РЕШЕНИЯ ЗАДАЧИ

Электрон влетает в область однородного магнитного поля шириной $d = 30$ см, под углом $\alpha = 30^\circ$ к линиям индукции магнитного поля. Расстояние от начального положения электрона до экрана $L = 40$ см. Сколько оборотов сделает электрон, прежде чем он попадет на экран? Скорость электрона $v = 10^4$ м/с, индукция магнитного поля $B = 10^{-4}$ Тл.

Дано:	СИ	Решение:
$d = 30$ см	0,3 м	Электрон, влетая в магнитное поле под углом α к вектору $\vec{B}$ движется по винтовой линии (рис. 290). Движение электрона можно представить, как сумму двух движений: в плоскости, перпендикулярной $\vec{B}$ с постоянной скоростью $v_1 = v \cdot \sin \alpha$ и вдоль линий магнитной индукции с постоянной скоростью $v_2 = v \cdot \cos \alpha$.
$\alpha = 30^\circ$		
$L = 40$ см	0,4 м	
$v = 10^4$ м/с		
$B = 10^{-4}$ Тл		
$N - ?$		

$$\text{Радиус окружности: } R = \frac{m v_1}{qB} = \frac{m v \cdot \sin \alpha}{qB},$$

шаг винта: $h = v_2 T = (v \cos \alpha)T$, где T – период обращения электрона, он равен:

$$T = \frac{2\pi R}{v_1} = \frac{2\pi \cdot m}{qB}, \text{ тогда шаг винта равен } h = \frac{2\pi \cdot m v \cos \alpha}{qB},$$

$$\text{число оборотов электрона } N = \frac{L}{h} = \frac{qLB}{2\pi \cdot m v \cos \alpha}.$$

$$\text{Вычислим число оборотов: } N = \frac{1,6 \cdot 10^{-19} \text{ Кл} \cdot 0,4 \text{ м} \cdot 10^{-4} \text{ Тл}}{2 \cdot 3,14 \cdot 9,1 \cdot 10^{-31} \text{ кг} \cdot 10^4 \text{ м/с} \cdot 0,866} \approx 129.$$

Ответ: $N \approx 129$ оборотов.

Контрольные вопросы

1. Какую силу называют силой Лоренца?
2. Как определяют направление силы Лоренца, действующей на положительную частицу? На отрицательную?
3. По какой траектории движется частица, если:
 - а) скорость ее движения параллельна вектору магнитной индукции;
 - б) скорость перпендикулярна вектору магнитной индукции;
 - в) скорость образует с вектором магнитной индукции угол меньший, чем 90° ?

★ Упражнение

47

1. Точечный заряд $q = 2 \cdot 10^{-6}$ Кл влетает со скоростью $v = 8$ м/с в однородное магнитное поле с индукцией $B = 0,25$ Тл. Угол между скоростью заряда и магнитной индукцией $\alpha = 30^\circ$ (рис. 297). Определите модуль и направление силы, действующей на заряд.
2. Электрон движется по окружности со скоростью $v = 10^6$ м/с в однородном магнитном поле с индукцией $B = 0,01$ Тл. Определите силу, действующую на электрон, и радиус окружности.
3. Электрон влетает в область однородного магнитного поля с индукцией $B = 1$ мкТл перпендикулярно линиям магнитной индукции. Определите частоту обращения электрона.
4. Частица массой $m = 10^{-22}$ кг и зарядом $q = 10^{-6}$ Кл движется по дуге окружности радиусом $R = 1$ см в магнитном поле с индукцией $B = 0,1$ Тл. Чему равна кинетическая энергия частицы?
5. В однородном магнитном поле с индукцией $B = 100$ мкТл по винтовой линии движется электрон. Определите скорость электрона, если радиус винтовой линии $R = 5$ см, а шаг $h = 20$ см.

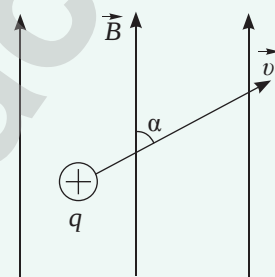


Рис. 297. К упражнению 47.1

Творческое задание

Подготовьте сообщение по темам (на выбор):

1. «Из истории создания ускорителей заряженных частиц».
2. «Роль магнитного поля Земли в защите от радиации».
3. «Планеты без магнитных полей».

§ 48. Магнитные свойства вещества. Температура Кюри

Ожидаемый результат

Прочитав параграф, вы сможете:

- классифицировать вещества по их магнитным свойствам и определять сферы их применения;
- анализировать современные области использования магнитных материалов (неодимовые магниты, датчики, сейсмографы, металлоискатели) и обсуждать тенденции их применения.

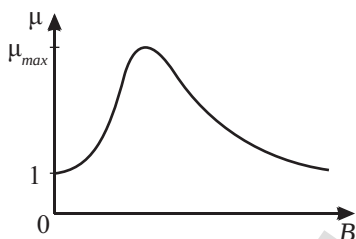


Рис. 298. График зависимости магнитной проницаемости ферромагнетиков от внешнего поля

I. Магнитные свойства вещества. Магнитная проницаемость

Все вещества по магнитным свойствам условно делят на слабомагнитные и сильномагнитные. Основной характеристикой магнитных свойств вещества является магнитная проницаемость.

Магнитная проницаемость – это физическая величина, которая показывает, во сколько раз индукция магнитного поля в веществе отличается от индукции магнитного поля в вакууме.

$$\mu = \frac{B}{B_0},$$

где μ – магнитная проницаемость, B – магнитная индукция поля в веществе, B_0 – магнитная индукция поля в вакууме.

Магнитная проницаемость слабомагнитных веществ близка к единице. Вещества, магнитная проницаемость которых больше единицы $\mu > 1$, называют парамагнетиками, меньше единицы $\mu < 1$ – диамагнетиками. В таблице 16 Приложения приведены значения магнитных проницаемостей некоторых веществ.

Магнитная проницаемость сильномагнитных веществ – ферромагнетиков – достигает сотен и тысяч единиц, например, для железа – $\mu \approx 5000$. Для пермаллоя, который представляет собой сплав никеля и железа – $\mu \approx 100000$. Магнитная проницаемость ферромагнетиков не постоянна, она зависит от внешнего поля, график зависимости представлен на рисунке 298. При увеличении магнитной индукции внешнего поля магнитная проницаемость ферромагнетика возрастает до максимального значения, затем уменьшается до значения, близкого к единице: $\mu > 1$. В таблицах магнитных проницаемостей ферромагнетиков даны их максимальные значения.

II. Природа ферромагнетизма

Внутри ферромагнетиков в отсутствии внешнего магнитного поля существуют самопроизвольно намагниченные области – домены (рис. 299, а). При наличии внешнего магнитного поля границы

Возьмите на заметку

Химические элементы-ферромагнетики: железо, никель, кобальт, гадолиний.

доменов исчезают, их магнитные поля ориентируются вдоль вектора магнитной индукции внешнего поля, тем самым значительно усиливая внешнее магнитное поле (рис. 299, б).

При высоком значении температуры ферромагнетики теряют свойство намагниченности. Для каждого вещества температура имеет определенное значение, эту температуру называют *точкой Кюри*, в честь французского физика П. Кюри. При температурах выше точки Кюри ферромагнетики становятся парамагнетиками, их магнитная проницаемость уменьшается до значения близкого к единице $\mu > 1$.

III. Ферромагнетики и их свойства

Основной особенностью ферромагнетиков является их способность к сильному намагничиванию и сохранению намагниченности длительное время.

Намагниченность ферромагнетиков зависит от магнитной индукции внешнего поля $\vec{B}_0$. Внесем ненамагниченное железо в магнитное поле, при увеличении магнитной индукции внешнего поля намагниченность железа возрастает до максимального значения. Это свидетельствует о том, что все элементарные токи, созданные орбитальным вращением электронов, ориентированы внешним полем в строго определенном направлении (рис. 300). Намагниченность вещества достигает насыщения, индукция магнитного поля $\vec{B}$, созданного намагниченным железом, становится максимальной. Дальнейшее увеличение магнитной индукции внешнего поля не влияет на магнитное поле вещества, магнитная проницаемость железа становится близкой единице: $\mu > 1$ (рис. 298). Все ферромагнетики делятся на две группы: магнитомягкие и магнитотвердые материалы.

IV. Применение ферромагнетиков

Благодаря свойству быстрого перемагничивания магнитомягкие материалы используют для изготовления сердечников трансформаторов, электромагнитов двигателей и генераторов, в измерительных приборах магнитоэлектрической системы. Магнитотвердые ферромагнетики используют для изготовления постоянных магнитов, они сохраняют намагниченность длительное время. Для сохранения свойства намагниченности постоянных магнитов необходимо, чтобы магнитные линии в них были замкнуты. Полюса подковообразного магнита соединяют

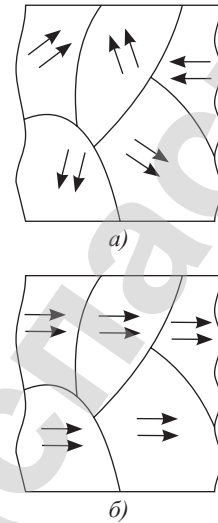


Рис. 299. Домены ферромагнетиков

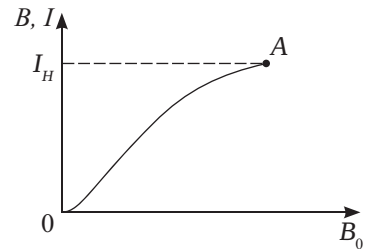


Рис. 300. При увеличении магнитной индукции внешнего поля намагниченность ферромагнетика возрастает до максимального значения

Таблица 18. Точка Кюри для некоторых веществ

Вещество	Температура
Железо	767 °C
Никель	360 °C
Кобальт	1130 °C



Возьмите на заметку

Ферромагнетики теряют свои магнитные свойства при сильных ударах.

пластиной – якорем из магнитомягкого железа, таким образом длительное время поддерживается строгое расположение молекул внутри магнита. Полосовые магниты при хранении складывают в пары разноименными полюсами друг к другу, полюса магнитов замыкают якорем из мягкого железа.

V. Неодимовые магниты и их применение

Самой большой силой притяжения при малых размерах обладают неодимовые магниты (рис. 301). Это сильнейшие постоянные магниты с энергией, превышающей обычные магниты более чем в 18 раз.

Впервые магнит был изготовлен в 1982 году компанией General Motors в партнерстве с Sumitomo Special Metals.

Из неодимовых магнитов изготавливают магнитные замки, защелки, магнитные сепараторы для очистки сыпучих продуктов от металлосодержащих примесей, датчики для автоматизации различных процессов, например движения поршня гидравлического пресса (рис. 302, а). Установленные на входные двери датчики движения позволяют создать эффективную охранную систему (рис. 302, б). С появлением неодимовых магнитов стало актуальным изготовление генераторов и двигателей с постоянными магнитами. Неодимовые магниты используют при изготовлении сувениров и ювелирных украшений. Появились современные застежки, пуговицы, магниты на холодильник, игрушки, например, конструкторы, кубики (рис. 303). Большой спрос получили металлоискатели, которые используют для поиска и подъема железосодержащих предметов из колодцев, водоемов, ям и других труднодоступных мест. Они имеют специальное крепление для троса или веревки, а цилиндр диаметром 80 мм и высотой 40 мм удерживает груз до 300 кг (рис. 304).



Рис. 303. Игрушка-кубик для развития мелкой моторики



Рис. 304. Металлоискатель из неодимового магнита



Ответьте на вопросы

1. Почему магнитомягкие ферромагнетики непригодны для изготовления постоянных магнитов?
2. Почему электромагнитным краном невозможно переносить раскаленное железо?



Рис. 301. Неодимовые магниты различных форм



а)



б)

Рис. 302. Датчики из неодимового магнита

Контрольные вопросы

1. На какие виды делят вещества по их магнитным свойствам?
2. Какова природа ферромагнетизма?
3. Как намагниченность ферромагнетиков зависит от магнитной индукции внешнего поля?
4. В чем различие магнитомягких и магнитотвердых ферромагнетиков?
5. Где применяют ферромагнетики?



Упражнение

48

1. По графику (рис. 305) определите магнитную проницаемость стали при индукции B_0 намагничивающего поля, равной 0,4 и 1,2 мТл.
2. Во сколько раз изменится магнитный поток, если чугунный сердечник в соленоиде заменить стальным таких же размеров? Для ответа используйте график (рис. 305).
3. К противоположным концам диагонали каркаса в форме куба (рис. 306) подводится постоянное напряжение, по ребрам куба текут токи. Чему равна магнитная индукция поля в центре куба? Как изменится магнитная индукция, если внутрь каркаса поместить стеклянный куб?

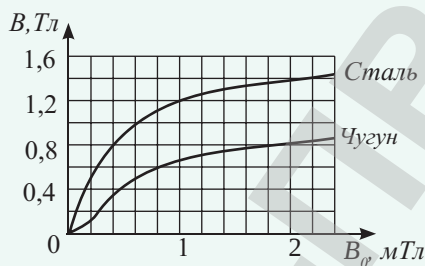


Рис. 305. К упражнению 48. 1 и 2

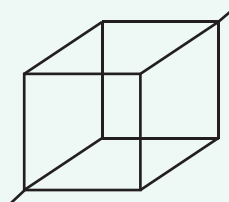


Рис. 306. К упражнению 48.3

Творческое задание

Подготовьте сообщение с ppt-презентацией (на выбор):

1. «Порошковая металлургия – современная технология изготовления постоянных магнитов».
2. «Современные области использования магнитных материалов».

Итоги главы 13

Магнитная индукция поля проводника с током	Силы взаимодействия	Величины, характеризующие вращательное движение контура с током
Закон Био – Савара – Лапласа для произвольного проводника $ \vec{B} = \left \sum_{i=1}^n \vec{B}_i \right = \frac{\mu_0}{4\pi} \sum \frac{I_i \Delta l_i \sin \alpha_i}{R_i^2}$ $\mu_0 = 4\pi \cdot 10^{-7} \frac{H}{A^2}$ Для прямого проводника $B = \frac{\mu_0 I}{2\pi a}$ Для кругового тока $B = \frac{\mu_0 I}{2R}$ Для соленоида $B = \mu_0 n I$ Принцип суперпозиции полей $\vec{B} = \vec{B}_1 + \vec{B}_2 + \dots + \vec{B}_n$	Магнитного поля с проводником, сила Ампера $F_A = BI \cdot l \sin \alpha$ Магнитного поля с заряженной частицей, сила Лоренца $F_L = \frac{F_A}{N}$ $F_L = q_0 B v_{op} \sin \alpha$ Сила взаимодействия двух параллельных проводников с током $F_A = \frac{\mu_0 I_1 I_2 l}{2\pi r}$	Вращающий момент $M = BIS \sin \alpha$ Магнитный момент рамки $P_m = IS$ Радиус кривизны траектории $R = \frac{mv}{qB}, R = \frac{mv \cdot \sin \alpha}{qB}$ Шаг винтовой траектории $h = v_{ } T = vT \cos \alpha$ Период обращения $T = \frac{2\pi R}{v_{\perp}} = \frac{2\pi m}{qB}$
Магнитная проницаемость вещества		$\mu = \frac{B}{B_0}$

Законы, правила

Правило буравчика

Если поступательное движение буравчика совместить с направлением тока в проводнике, то вращательное движение рукоятки укажет направление силовых линий магнитного поля.

Правило правой руки

Если правую руку положить на катушку так, чтобы четыре пальца указывали направление тока в ее витках, то большой палец, отогнутый на 90° , укажет направление магнитного поля.

Закон Ампера

На проводник с током, помещенный в однородное магнитное поле, действует сила, пропорциональная силе тока и индукции магнитного поля.

Правило левой руки

Если левую руку расположить так, чтобы вектор индукции входил в ладонь, а четыре вытянутых пальца указывали направление тока, то отогнутый на 90° большой палец укажет направление силы Ампера.

Глоссарий

Двигатель постоянного тока – электрическая машина, преобразующая электрическую энергию постоянного тока в механическую энергию.

Диамагнетики – вещества, магнитная проницаемость которых меньше единицы $\mu < 1$.

Магнитное поле – вид материи, особенностью которой является действие на движущийся электрический заряд, проводники с током, тела, обладающие магнитным моментом, с силой, зависящей от вектора скорости заряда и направления силы тока.

Магнитная проницаемость – физическая величина, которая показывает, во сколько раз индукция магнитного поля в веществе отличается от индукции магнитного поля в вакууме.

Магнитомягкие ферромагнетики – ферромагнетики, обладающие малой остаточной индукцией и коэрцитивной силой.

Магнитотвердые ферромагнетики – материалы, характеризующиеся высокими значениями коэрцитивной силы.

Намагниченность вещества – физическая величина, равная векторной сумме магнитных моментов атомов, находящихся в единице объема вещества.

Парамагнетики – вещества, магнитная проницаемость которых больше единицы $\mu > 1$.

Ротор – это подвижная часть двигателя, которая представляет собой проволочные рамки, выложенные в пазах сердечника.

Статор – это неподвижная часть двигателя.

Силовые линии магнитного поля – линии, касательные к которым в каждой точке указывают направление вектора магнитной индукции.

Сила Ампера – сила, с которой магнитное поле действует на проводник с током.

Сила Лоренца – сила, которая действует со стороны магнитного поля на движущуюся в нем заряженную частицу.

Ферромагнетики – вещества с большой магнитной проницаемостью.

ГЛАВА 14

ЭЛЕКТРОМАГНИТНАЯ ИНДУКЦИЯ

Явление электромагнитной индукции открыто Майклом Фарадеем в 1831 г. Оно окончательно установило неразрывную связь между электрическим током и магнитным полем. В XIX веке благодаря открытию закона электромагнитной индукции началось бурное развитие электротехники и радиотехники. На основании явления электромагнитной индукции были созданы индукционные генераторы электрической энергии, трансформаторы. Стала возможной передача электрической энергии на большие расстояния.

Изучив главу, вы сможете:

- анализировать принцип действия электромагнитных приборов (электромагнитное реле, генератор, трансформатор);
- применять закон электромагнитной индукции при решении задач;
- проводить аналогии между механической и магнитной энергиями;
- исследовать действующую модель электродвигателя и аргументированно объяснять полученные результаты, используя закон Фарадея и правило Ленца.

§ 49. Работа силы Ампера. Магнитный поток. Явление электромагнитной индукции

Ожидаемый результат

Прочитав параграф, вы сможете:

- анализировать принцип действия электромагнитных приборов (электромагнитное реле, генератор, трансформатор).



Эксперимент

Проведите опыты с катушкой и постоянным магнитом, изображенные на рисунках 307, а также с использованием электромагнита. Сравните результаты опытов с выводами в тексте учебника.



Возьмите на заметку

Переменное магнитное поле можно создать различными способами: перемещая постоянный магнит, включая и отключая цепь постоянного тока с электромагнитом, подключив электромагнит к источнику переменного тока.

1. Явление электромагнитной индукции

Открытие явления электромагнитной индукции не было случайным. Фарадей считал, что, если вокруг проводника образуется магнитное поле, то возможен и обратный процесс. Для достижения поставленной цели Фарадею потребовалось почти 10 лет.

Используя современные приборы, несложно выяснить при каких условиях в замкнутом проводнике возникает индукционный ток. Если в катушку, замкнутую на гальванометр, вдвигать магнит, то стрелка гальванометра отклонится, что свидетельствует о появлении индукционного тока (рис. 307, а). При извлечении магнита стрелка отклонится, но в противоположную сторону (рис. 307, б), ток в проводнике изменит свое направление. Если магнит относительно катушки не движется, то стрелка гальванометра установится на нуле, тока в катушке не будет (рис. 307, в).

Перемещение магнита относительно катушки приводит к изменению числа силовых линий, пронизывающих ее, поскольку вблизи магнита силовые линии плотнее (рис. 308). Следовательно, индукционный ток появляется в проводнике, если он находится в переменном магнитном поле.

Явление возникновения индукционного тока в замкнутом проводящем контуре при изменении магнитного потока, проходящего через него, называют явлением электромагнитной индукции.

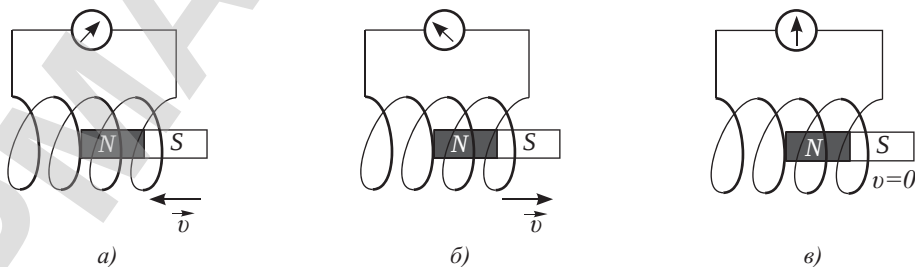


Рис. 307. Направление и сила индукционного тока зависят от направления и скорости движения магнита

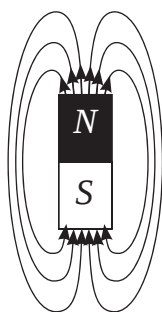


Рис. 308. Магнитное поле полосового магнита неоднородное

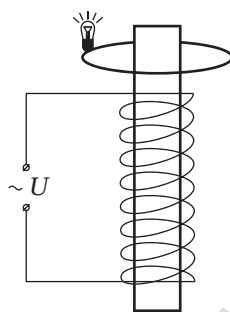


Рис. 309. Появление индукционного тока в замкнутом контуре, расположенном в переменном магнитном поле

Приблизим к катушке с переменным током проводящий контур, замкнутый на лампу малой мощности таким образом, чтобы оси катушки и контура расположились вдоль одной прямой (рис. 309). Лампа начнет светиться, при этом нет необходимости перемещать катушку и контур относительно друг друга.

Явление электромагнитной индукции в замкнутом проводящем контуре наблюдается при следующих условиях:

- 1) если контур движется в постоянном магнитном поле так, что число силовых линий магнитного поля, пронизывающих контур, меняется;
- 2) если контур покоится в переменном магнитном поле.

II. Магнитный поток. Способы изменения магнитного потока

Густота силовых линий магнитного поля определяет его силовую характеристику – магнитную индукцию. Число линий магнитного поля, пронизывающих контур, характеризует магнитный поток.

Магнитный поток – это число линий магнитной индукции, пронизывающих замкнутый контур, внесенный в магнитное поле.

Магнитный поток, пронизывающий контур, можно изменить тремя способами:

- 1) увеличением или уменьшением магнитной индукции поля, о чем говорилось ранее;
- 2) изменением площади контура, например, перемещением подвижной стороны рамки или изменением формы рамки под воздействием внешней силы (рис. 310).
- 3) вращением контура в магнитном поле таким образом, чтобы число линий, пронизывающих контур, менялось (рис. 311).

В соответствии со способами изменения магнитного потока запишем формулу для его расчета:

$$\Phi = BS \cos \alpha, \quad (1)$$

где Φ – магнитный поток, пронизывающий контур, B – магнитная индукция поля, S – площадь рамки,

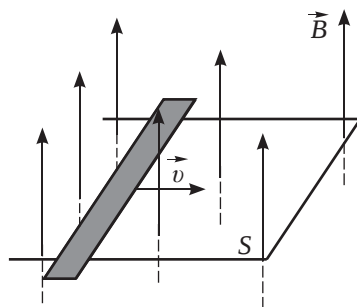


Рис. 310. Изменение магнитного потока через замкнутый контур посредством изменения площади

α – угол между вектором магнитной индукции и нормалью к площади рамки (рис. 312).

Магнитный поток – это физическая величина, равная произведению индукции магнитного поля, пронизывающего контур, на площадь контура и косинус угла между вектором магнитной индукции и нормалью к площади рамки.

Из (1) следует, что:

$$\Phi = B_n S, \quad (2)$$

где $B_n = B \cos \alpha$ (3) – составляющая вектора $\vec{B}$, перпендикулярная плоскости контура.

Единица измерения магнитного потока в СИ: *1 вебер*, она названа в честь немецкого ученого физика Вильгельма Вебера, главные работы которого относятся к области магнитных явлений и электричества.

$$[\Phi] = 1 \text{ Вб} = 1 \text{ Тл} \cdot \text{м}^2.$$



Вильгельм Эдуард Вебер (1804–1891) – немецкий физик. Основные работы Вебера посвящены электромагнетизму, акустике, тепловым явлениям, молекулярной физике. С 1840 г. Вебер занимался разработкой систем электростатических и магнитных единиц и определением связи между ними. Его именем названа единица измерения магнитного потока.

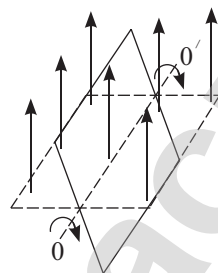


Рис. 311. Изменение магнитного потока через замкнутый контур в результате вращения рамки

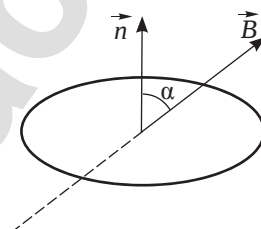


Рис. 312. Нормаль к плоскости рамки образует с вектором магнитной индукции угол α

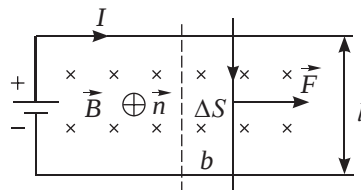


Рис. 313. Сила Ампера совершает работу при перемещении подвижного проводника: энергия электрического поля превращается в механическую

III. Работа силы Ампера

На все стороны рамки с током в магнитном поле действует сила Ампера (рис. 313). Сила, действующая на подвижный проводник, направлена вправо. Поскольку вектор магнитной индукции параллелен нормали к площади рамки, то сила Ампера, действующая на проводник, равна: $F_A = BI \cdot l$.

Пусть проводник переместился параллельно самому себе на расстояние b . При этом совершилась работа, равная $A = F_A \cdot b = BI \cdot lb = BI \cdot \Delta S$.

Учтем, что произведение магнитной индукции на «заметенную» при перемещении проводником площадь равно изменению магнитного потока. Тогда для расчета работы силы Ампера получим формулу

$$A = I \cdot \Delta \Phi.$$



Задание 1

Изобразите составляющие силы Лоренца, действующие на положительный заряд, который находится в движущейся перемычке. Докажите, что сумма работ, выполненных двумя составляющими, равна нулю.

Работа, совершенная силой Ампера при перемещении проводника в магнитном поле, равна произведению силы тока на магнитный поток, пронизывающий «замкнутую» проводником площадь.

Возникает противоречие: сила Лоренца не совершает работу, а сила Ампера, которая равна сумме сил Лоренца, действующих на отдельные заряды в проводнике, совершает. Это противоречие кажущееся, так как, определяя работу силы Ампера, мы учли только одну составляющую силы Лоренца, связанную со скоростью движения зарядов вдоль проводника. Вторая составляющая силы Лоренца связана со скоростью движения самого проводника, она противодействует движению проводника. Для поддержания тока источнику тока приходится компенсировать эту работу. Таким образом, сила Лоренца превращает энергию источника ЭДС в механическую работу.

В случае отсутствия источника тока движение перемычки поддерживается действием сторонних сил. На таком принципе работает генератор индукционного тока, рамка которого приводится в движение паровой или газовой турбиной.

IV. Принцип действия электромагнитных приборов

На явлении электромагнитной индукции основано действие таких приборов, как генератор индукционного тока, трансформатор, электромагнитное реле. На рисунках 314–319 даны их изображения и принципиальные схемы.



Задание 2

По рисункам устройств 314–319 поясните принцип их действия.



Рис. 314. Генератор постоянного тока 4 ГПЭМ 55

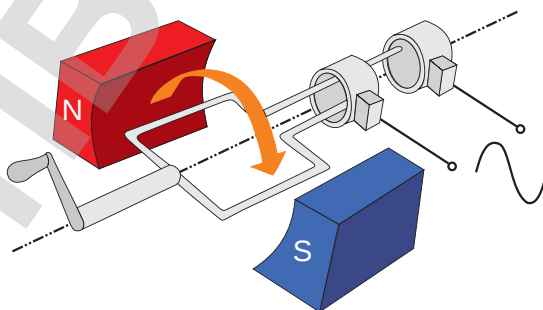


Рис. 315. Принципиальная схема генератора переменного тока



Рис. 316. Трансформатор

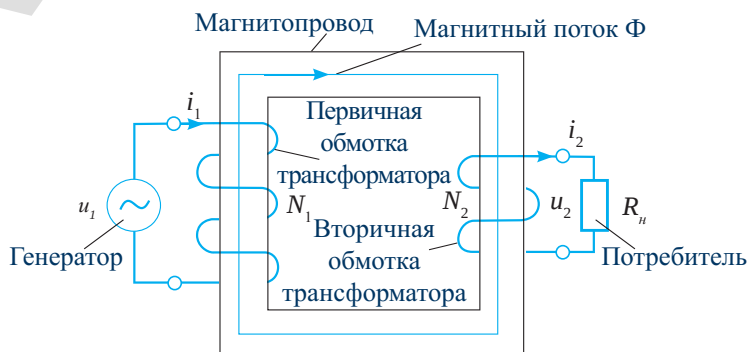


Рис. 317. Принципиальная схема трансформатора



Рис. 318.
Электромагнитное реле

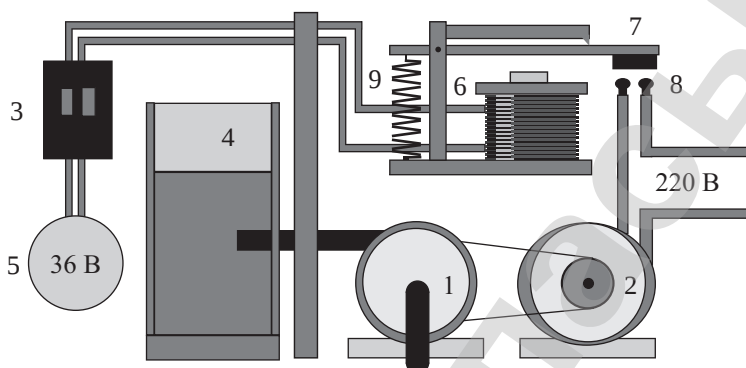


Рис. 319. Схема устройства для подачи (сброса) воды:
1) насос; 2) электродвигатель; 3) выключатель; 4) бассейн;
5) источник тока; 6) электромагнит; 7) стальная пластина;
8) контакты; 9) пружина

Контрольные вопросы

1. В чем заключается явление электромагнитной индукции?
2. При каком условии в замкнутом проводящем контуре возникает индукционный ток?
3. Что характеризует магнитный поток?
4. В чем заключается закон электромагнитной индукции?

★ Упражнение

49

1. Проволочное кольцо расположено в однородном магнитном поле с индукцией $B = 0,5$ Тл так, что плоскость кольца составляет с силовыми линиями поля угол $\alpha = 30^\circ$. При этом магнитный поток через кольцо $\Phi = 24$ Вб. Определите радиус кольца.
2. Проволочное кольцо радиусом $R = 0,1$ м находится в однородном магнитном поле так, что линии индукции перпендикулярны его плоскости. Индукция магнитного поля $B = 20$ мТл. Насколько изменится магнитный поток, пронизывающий кольцо, если его повернуть на угол α , равный:
а) 180° ; б) 360° ?

§ 50. Закон электромагнитной индукции. Правило Ленца

Ожидаемый результат

Прочитав параграф, вы сможете:

- применять закон электромагнитной индукции при решении задач

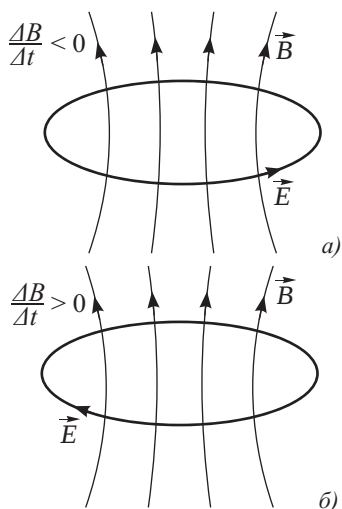


Рис. 320. Переменное магнитное поле создает в пространстве переменное электрическое поле



Обратите внимание!

При уменьшении магнитной индукции магнитного поля вектор напряженности вихревого электрического поля образует правый винт с силовыми линиями магнитного поля. В этом случае направление вектора напряженности определяют по правилу буравчика или правой руки.

При увеличении магнитной индукции вектор напряженности образует левый винт с векторами магнитной индукции.

I. Вихревое электрическое поле. Закон электромагнитной индукции

Появление индукционного тока в проводящем замкнутом контуре свидетельствует о возникновении электрического поля без видимого источника тока. Это поле создано переменным магнитным полем, его силовые линии не имеют ни начала, ни конца, такое поле называют вихревым. Чем быстрее меняется магнитный поток, пронизывающий контур, тем сильнее электрическое поле, тем больше его ЭДС:

$$\varepsilon_i = - \frac{\Delta \Phi}{\Delta t}, \quad (1)$$

в этом заключается закон электромагнитной индукции:

ЭДС индукции вихревого поля, созданного переменным магнитным полем, равна изменению магнитного потока через поверхность, ограниченную контуром, в единицу времени.

Если контур состоит из нескольких витков, то ЭДС возрастает в N раз:

$$\varepsilon_i = -N \frac{\Delta \Phi}{\Delta t},$$

где N – число витков.

Знак минус в записи закона определяет направление индукционного тока под воздействием вихревого поля.

II. Гипотеза Максвелла

Возникновение ЭДС индукции в неподвижном контуре, находящемся в переменном магнитном поле, можно объяснить только существованием вихревого электрического поля. Впервые существование такого поля предположил Максвелл. Он считал, что *переменное магнитное поле создает в пространстве переменное электрическое поле, линии напряженности которого охватывают линии индукции магнитного поля* (рис. 320 а, б). Свободные заряженные частицы в контуре, внесенном в вихревое электрическое поле, движутся направленно. В контуре появляется электрический ток:

$$I_i = \frac{\varepsilon_i}{R}, \quad (2)$$

где R – сопротивление контура. ε_i – ЭДС индукции вихревого тока, I_i – индукционный ток.



Возьмите на заметку

Индукционные токи в массивных сплошных проводниках, сопротивление которых ничтожно мало, достигают высоких значений. Такие токи называют токами Фуко. Их используют в индукционных печах для плавки металлов. Для уменьшения токов Фуко и потерь электроэнергии, сердечники трансформаторов и электромагнитов в генераторах и двигателях собирают из отдельных изолированных пластин.

III. ЭДС индукции в проводнике, движущемся в магнитном поле

В тех случаях, когда контур движется в магнитном поле, природа возникновения ЭДС индукции заключается в действии силы Лоренца на свободные заряды, находящиеся в нем. Пусть участок MN замкнутого контура движется со скоростью $\vec{v}$, пересекая линии магнитного поля (рис. 321). На электроны указанного участка действует сила Лоренца, направленная от конца M к концу N . Перемещаясь, электроны создают разность потенциалов между концами проводника MN длиной l , которая равна ЭДС индукции:

$$\varepsilon_i = -\frac{\Delta\Phi}{\Delta t} = -B \frac{\Delta S}{\Delta t}, \quad (3)$$

где $\Delta S = (v\Delta t)l$ (4) – изменение площади контура за время Δt .

Подставив (4) в (3), получим: $\varepsilon_i = Bvl$. (5)

В случае, когда направление вектора магнитной индукции составляет с вектором скорости угол α , необходимо определить ее составляющую, перпендикулярную скорости (рис. 322): $B_{\perp} = B \sin \alpha$, тогда уравнение (5) примет вид:

$$\varepsilon_i = Bvl \sin \alpha. \quad (6)$$

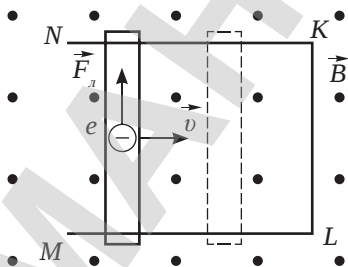
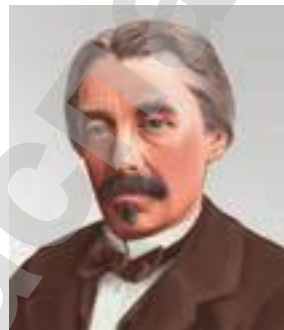


Рис. 321. Возникновение разности потенциалов на концах проводника при пересечении силовых линий магнитного поля



Жан Бернар Леон Фуко (1819–1868) – французский физик, механик и астроном, член Парижской и Берлинской АН. Известен как создатель маятника Фуко, изобретатель гироскопа. Определил скорости света в воздухе и воде. Первым обратил внимание на нагревание металлических проводников больших масс при быстром вращении их в магнитном поле.

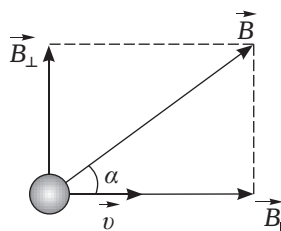


Рис. 322. Разложение вектора магнитной индукции на составляющие

ЭДС индукции может возникнуть на концах незамкнутого проводника, в том случае, если проводник движется в магнитном поле, «разсекая» его силовые линии (рис. 323). Движение электронов в проводнике, движущемся в магнитном поле,

прекратится, когда сила Лоренца и сила электрического поля, созданного избыточными зарядами на концах проводника, станут равными по модулю:

$$|F_L| = |F_{эл}|$$

или $qvB \sin \alpha = qE$.

Поскольку $E = \frac{U}{l} = \frac{\varepsilon_i}{l}$, то $vB \sin \alpha = \frac{\varepsilon_i}{l}$,
откуда $\varepsilon_i = Bvl \sin \alpha$.

При движении проводника вдоль силовых линий ЭДС индукции на его концах не возникает.

IV. Взаимодействие катушки с током и магнита с точки зрения закона сохранения энергии

В опытах с замкнутой на гальванометр катушкой и полосовым магнитом, стрелка гальванометра отклонялась то в одну, то в другую сторону (рис. 307 § 49).

Работа, которую необходимо совершить для сближения магнита с катушкой – положительная, так как сила, приложенная к магниту, и его перемещение совпадают по направлению. На основании закона сохранения энергии магнитное поле катушки, созданное индукционным током, должно оттолкнуть магнит. В противном случае возрастающая энергия индукционного тока появилась бы без затрат энергии, что противоречит закону сохранения энергии. Поскольку катушка с током представляет собой электромагнит, то не сложно прийти к выводу: индукционный ток на конце катушки, обращенном к приближающемуся магниту, создает одноименный полюс (рис. 324). Таким образом, приближая магнит, мы совершаем работу против силы отталкивания магнитного поля, созданного индукционным током.

V. Закон сохранения магнитного потока

Приближение магнита к катушке увеличивает магнитный поток (рис. 325). В этом случае внутри катушки вектора магнитной индукции магнита $\vec{B}$ и катушки $\vec{B}_i$ направлены в противоположные стороны. Поле, созданное в катушке индукционным током, препятствует увеличению магнитного потока, стремясь сохранить его прежним.

При удалении магнита плотность силовых линий поля и магнитный поток, пронизывающий катушку, уменьшаются. Внутри катушки магнитные линии индукционного тока направлены также как и силовые

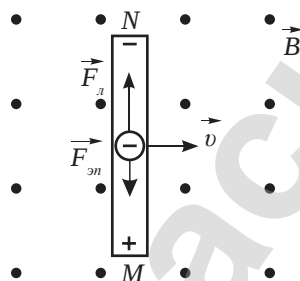
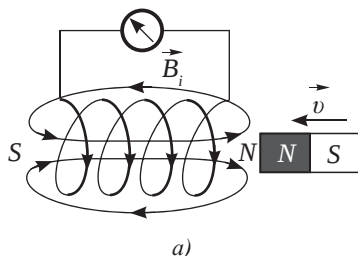


Рис. 323. На концах проводника создается ЭДС, если он пересекает силовые линии поля

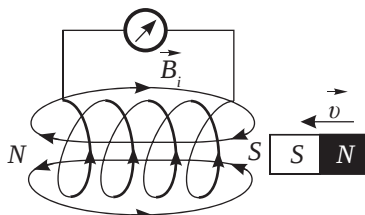


Задание 1

Изобразите силовые линии магнитного поля индукционного тока и укажите полюса катушки в том случае, когда магнит удаляется от нее.



а)



б)

Рис. 324. Индукционный ток на конце катушки, обращенном к приближающемуся магниту, создает одноименный полюс

линии магнита (рис. 326). Индукционный ток своим полем усиливает поток, пронизывающий катушку, тем самым стремясь сохранить его прежним.

При взаимодействии магнитного поля индукционного тока и переменного магнитного поля, вызвавшего его, выполняется закон сохранения магнитного потока. Знак «минус» в законе электромагнитной индукции – проявление этого закона.

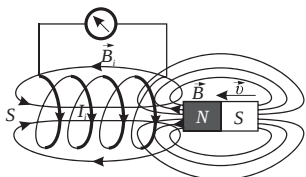


Рис. 325. Магнитное поле катушки противодействует нарастанию магнитного потока приближающегося магнита

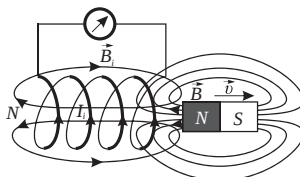


Рис. 326. Магнитное поле катушки противодействует уменьшению магнитного потока, созданного удаляющимся магнитом

VI. Правило Ленца

Взаимодействие замкнутой на гальванометр катушки и постоянного магнита в рассмотренных случаях происходит в соответствии с правилом Ленца:

Индукционный ток всегда имеет такое направление, при котором его магнитное поле противодействует изменению магнитного потока, вызывающему этот ток.

Применяя правило Ленца для определения направления индукционного тока, необходимо воспользоваться следующим алгоритмом:

1. Установить направление линий магнитной индукции внешнего для замкнутого проводящего контура поля $\vec{B}$.
2. Выяснить, увеличивается или уменьшается поток магнитной индукции, пронизывающий контур.
3. Установить направление линий магнитной индукции $\vec{B}_i$ поля, созданного индукционным током, в соответствии с правилом Ленца:
 - если поток увеличивается ($\Delta\Phi > 0$), то линии индукционного поля должны быть направлены противоположно линиям магнитной индукции внешнего поля ($\vec{B}_i \uparrow \downarrow \vec{B}$);



Ответьте на вопросы

1. Почему колебания стрелки компаса затихают быстрее, если корпус прибора латунный, и медленнее, если корпус пластмассовый?
2. Почему падающее замкнутое проводящее кольцо, насаживаясь на полосовой магнит, замедляет свое движение? Почему замедление не наблюдается, если кольцо не замкнуто?



Задание 2

Используя алгоритм, определите направление индукционного тока в замкнутом проводящем контуре, изображенном на рисунке 327. Постоянный магнит приближается к контуру.

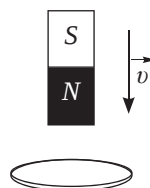


Рис. 327. К заданию 2



Запомните!

При увеличении магнитного потока внешнего магнитного поля или $\Delta\Phi > 0$, ЭДС индукции вихревого электрического поля препятствуют нарастанию магнитного потока, при этом $\mathcal{E}_i < 0$. При уменьшении магнитного потока внешнего магнитного поля или $\Delta\Phi < 0$, ЭДС индукции стремится увеличить магнитный поток, при этом $\mathcal{E}_i > 0$.

- если поток уменьшается ($\Delta\Phi < 0$), то линии магнитной индукции индукционного и внешнего поля должны быть направлены в одну сторону ($\vec{B}_i \uparrow \vec{B}$).
4. По направлению вектора $\vec{B}_i$ определить направление индукционного тока I_i , используя правило буравчика.



Эксперимент

1. Если клеммы двух демонстрационных гальванометров соединить проводами и затем покачиванием одного из приборов вызвать колебания его стрелки, то и у другого прибора стрелка тоже начнет колебаться. Объясните опыт и по возможности проверьте.
2. Как объяснить опыт Томсона: на железный стержень намотана катушка из большого числа витков медного провода. На сердечник свободно надето массивное кольцо из хорошо проводящего металла – меди. При включении катушки в цепь переменного тока кольцо подскакивает.

ПРИМЕР РЕШЕНИЯ ЗАДАЧИ

Задача.

Замкнутый прямоугольный контур расположен в плоскости прямого проводника с током. Сила тока в проводнике возрастает. Определите направление индукционного тока в контуре и силы Ампера, действующей на контур.

Решение:

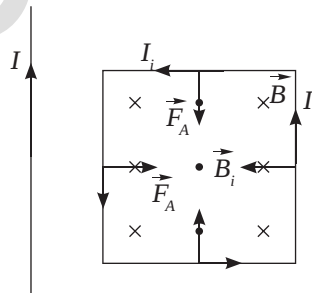
Воспользуемся алгоритмом определения направления индукционного тока.

1. Проводник с током создает внешнее поле. Линии магнитной индукции внутри контура перпендикулярны плоскости рамки и направлены от нас (см. рис.), изобразим их в виде крестиков – «оперений» стрел.
2. По условию задачи сила тока возрастает, что свидетельствует об увеличении потока $\Delta\Phi > 0$.

$\Delta\Phi > 0$, следовательно, $\vec{B}_i$ будет направлен в сторону, противоположную вектору магнитной индукции внешнего поля: ($\vec{B}_i \uparrow \vec{B}$). Изобразим вектор $\vec{B}_i$ на рисунке в виде точки – стрелы, направленной перпендикулярно плоскости рамки вверх.

4. Используя правило буравчика по направлению вектора $\vec{B}_i$ определим направление индукционного тока I_i . Индукционный ток направлен против часовой стрелки.

Направление силы Ампера, действующей на стороны рамки, определим по правилу левой руки. Силы Ампера сжимают рамку, стремясь уменьшить нарастающий магнитный поток.



Контрольные вопросы

1. Какой полюс создается у магнитного поля катушки со стороны приближающегося магнита?
2. Против каких сил необходимо совершать работу, приближая и удаляя магнит от замкнутого контура?
3. В чем заключается закон сохранения магнитного потока?
4. Сформулируйте правило Ленца.

★ Упражнение

50

1. Определите скорость изменения магнитного потока в соленоиде, состоящем из $N = 400$ витков, при возбуждении в нем ЭДС индукции $\mathcal{E}_i = 100$ В.
2. Лежащее на столе металлическое кольцо перевернули. Радиус кольца $r = 10$ см, его сопротивление $R = 2$ Ом. Какой заряд прошел при этом через кольцо, если вертикальная составляющая индукции магнитного поля Земли $B = 5 \cdot 10^{-5}$ Тл?
3. Два параллельных проводника расположены в однородном магнитном поле с индукцией $B = 1$ Тл так, что силовые линии поля перпендикулярны плоскости, в которой лежат проводники. По проводникам перпендикулярно им скользит металлическая перемычка, приближаясь к вольтметру со скоростью $v = 10$ м/с. Расстояние между проводниками $l = 1$ м (рис. 328). Определите показания вольтметра.
4. Определите направление индукционного тока в проводнике CD (рис. 329) в случаях, когда:
 - а) цепь проводника AB замыкают;
 - б) цепь проводника AB размыкают;
 - в) ручку реостата в замкнутой цепи проводника AB перемещают вверх; вниз;
 - г) прямолинейные части контуров AB и CD сближают; удаляют.
5. Магнитный поток, пронизывающий катушку, изменяется со временем, как показано на рисунке (рис. 330). Начертите график изменения ЭДС индукции, наводимой в катушке. Каково максимальное значение ЭДС индукции, если в катушке 400 витков?

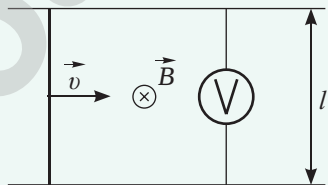


Рис. 328. К упражнению 50.3

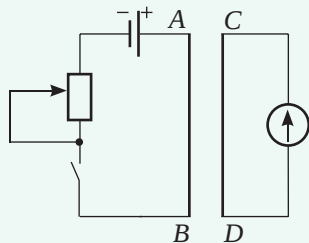


Рис. 329. К упражнению 50.4

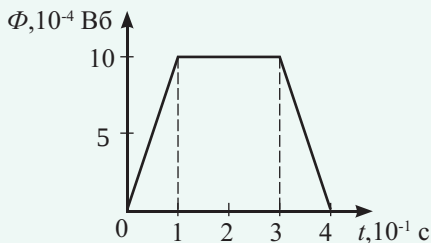


Рис. 330. К упражнению 50.5

§ 51. Явление самоиндукции. Индуктивность. Энергия магнитного поля

Ожидаемый результат

Прочитав параграф, вы сможете:

- проводить аналогии между механической и магнитной энергией.

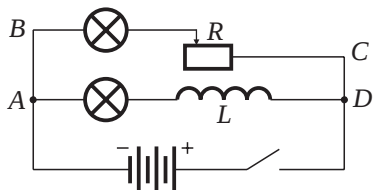


Рис. 331. В катушке с малым активным сопротивлением наблюдается явление самоиндукции, лампа А загорается с запозданием

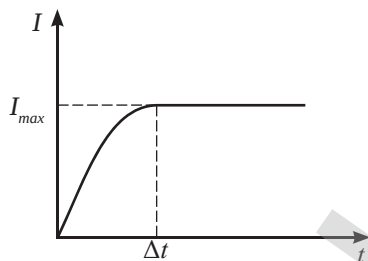


Рис. 332. Для нарастания силы тока в катушке до максимальной величины необходимо время Δt

1. Явление самоиндукции

Явление самоиндукции наблюдается в проводниках с переменным током. Переменный ток создает вокруг проводника переменное магнитное поле, которое согласно гипотезе Максвелла порождает вихревое электрическое поле. Под действием вихревого поля в проводнике появляется индукционный ток, который, по правилу Ленца, противодействует изменению магнитного потока.

Самоиндукция – это явление возникновения ЭДС индукции в проводящем контуре при изменении протекающего через контур тока.

Если проводник подключен к источнику постоянного тока, то явление электромагнитной индукции можно наблюдать в момент включения и выключения цепи. На рисунке 331 изображена схема параллельного подключения двух ламп к источнику тока. Одна из них подключена через реостат, другая – через катушку с малым активным сопротивлением. С помощью реостата можно добиться одинаковой яркости свечения ламп. При замыкании ключа лампа, подключенная через катушку, вспыхивает с запозданием. Это объясняется тем, что в катушке возникает ЭДС самоиндукции и сила тока в ветви нарастает до максимального значения за некоторый промежуток времени Δt (рис. 332).

Наблюдение явления самоиндукции в момент размыкания цепи возможно на опыте с цепью, изображенной на рисунке 333, а. При отключении цепи от источника тока в катушке согласно правилу Ленца возникает индукционный ток (рис. 333, б). Его направление совпадает с направлением тока,

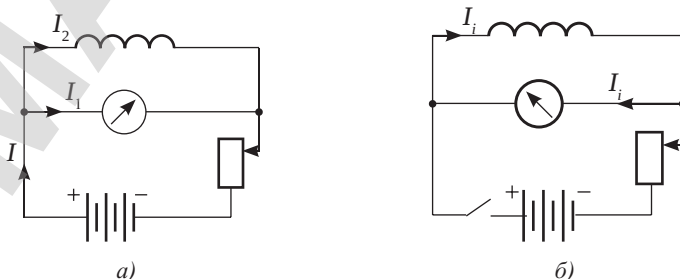


Рис. 333. Индукционный ток в катушке после отключения источника тока отклоняет стрелку гальванометра в противоположную сторону

созданного источником тока (рис. 333, а), индукционный ток проходит по замкнутому контуру, состоящему из катушки и гальванометра, при этом отбрасывает стрелку гальванометра в обратном направлении. По показаниям гальванометра можно наблюдать, что ток в цепи исчезает постепенно (рис. 334).

II. Индуктивность катушки

Явление самоиндукции аналогично явлению инерции в механике. Катушка обладает инерционными свойствами.

Физическую величину, характеризующую инертные свойства катушки, называют индуктивностью.

Установим связь индуктивности с магнитным потоком, вызывающим явление самоиндукции. Магнитный поток, пронизывающий катушку, равен:

$$\Phi = BSN \cos \alpha, \quad (1)$$

где N – число витков в катушке.

Магнитная индукция поля, созданного катушкой:

$$B = \mu \cdot \mu_0 n I, \quad (2)$$

где μ – магнитная проницаемость сердечника, n – число витков на единицу длины, определяется отношением числа витков катушки к ее длине:

$$n = \frac{N}{l}. \quad (3)$$

Подставим (2) и (3) в (1), получим:

$$\Phi = \mu \cdot \mu_0 \frac{N^2}{l} S I \cos \alpha. \quad (4)$$

Выделим в формуле (4) все величины, характеризующие свойства и размеры катушки и обозначим

$$\text{буквой } L: L = \mu \cdot \mu_0 \frac{N^2}{l} S = \mu \cdot \mu_0 n^2 l S.$$

Получена формула расчета индуктивности катушки:

$$L = \mu \cdot \mu_0 n^2 l S. \quad (5)$$

Индуктивность зависит только от размеров катушки: l и S ; материала сердечника μ и плотности намотки n . Она не зависит от силы тока в катушке и пронизывающего его потока, являясь коэффициентом пропорциональности этих величин:

$$\Phi = L I. \quad (6)$$

Единица измерения индуктивности в СИ названа *генри* в честь американского физика Джозефа Генри: $[L] = 1 \text{ Гн}$.

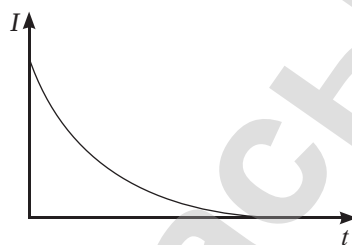


Рис. 334. Сила тока в катушке уменьшается до нулевого значения в течение некоторого времени



Джозеф Генри (1797–1878) – американский физик, один из величайших американских ученых, первый секретарь Смитсоновского института. Создавая магниты, Генри открыл новое явление в электромагнетизме – самоиндукцию. Независимо от Фарадея Генри обнаружил взаимную индукцию. Его работы по электромагнитным реле были основой для электрического телеграфа.

III. ЭДС самоиндукции

Используя закон электромагнитной индукции и формулу (5) для расчета ЭДС самоиндукции получим:

$$\varepsilon_{is} = -\frac{\Delta \Phi}{\Delta t} = -\frac{\Phi_2 - \Phi_1}{\Delta t} = -\frac{LI_2 - LI_1}{\Delta t} = -L \frac{\Delta I}{\Delta t}.$$

Таким образом, ЭДС самоиндукции равна:

$$\varepsilon_{is} = -L \frac{\Delta I}{\Delta t}. \quad (7)$$

Из полученной формулы следует, что:

$$L = \frac{\varepsilon_{is}}{|\Delta I| / \Delta t}, \text{ следовательно: } 1 \text{ Гн} = \frac{1 \text{ В}}{1 \text{ А/с}}.$$

IV. Энергия магнитного поля

Энергию магнитного поля катушки можно записать, используя аналогию инертных свойств катушки и движущегося тела, обладающего кинетической энергией:

$$W_n = \frac{mv^2}{2}. \quad (8)$$

Формула расчета энергии магнитного поля катушки по аналогии с формулой (8) примет вид:

$$W_{\text{м.п.}} = \frac{LI^2}{2}. \quad (9)$$

Определим работу источника тока по преодолению вихревого поля графическим методом. На рисунке 335 изображена зависимость магнитного потока от силы тока в катушке, площадь фигуры под графиком численно равна совершенной работе, следовательно, энергия магнитного поля в катушке равна:

$$W_{\text{м.п.}} = \frac{I\Phi}{2} = \frac{LI^2}{2}. \quad (10)$$

V. Плотность энергии магнитного поля

Магнитное поле охватывает проводник с током, занимая некоторый объем пространства. Введем *объемную плотность энергии магнитного поля*, которая является энергетической характеристикой магнитного поля:

$$\omega_{\text{м.п.}} = \frac{W_{\text{м.п.}}}{V}. \quad (11)$$

где ω – объемная плотность энергии магнитного поля. Подставим в (11) формулы (10) и (5), получим:

$$\omega = \frac{LI^2}{2V} = \frac{\mu \cdot \mu_0 n^2 l SI^2}{2lS} = \frac{\mu \cdot \mu_0 n^2 I^2}{2}. \quad (12)$$

Учитывая формулу (2), окончательно имеем:

$$\omega_{\text{м.п.}} = \frac{B^2}{2\mu \cdot \mu_0}. \quad (13)$$



Задание

Изобразите графики зависимости индуктивности катушки от ее размеров и числа обмотки.

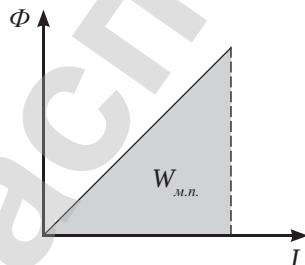


Рис. 335. График зависимости магнитного потока от силы тока в катушке



Ответьте на вопросы

1. Как можно изменить индуктивность катушки?
2. Как это повлияет на активное сопротивление катушки?

Плотность энергии прямо пропорциональна квадрату магнитной индукции в данной среде.



Ответьте на вопросы

1. Почему отключение мощных электродвигателей от питающей сети производят плавно и медленно при помощи реостата?
2. Почему в катушке с двойной обмоткой противоположного направления индукционный ток не возникает?



Запомните!

Единица измерения объемной плотности энергии в СИ:

$$[\omega] = 1 \frac{\text{Дж}}{\text{м}^3} = 1 \frac{\text{Н} \cdot \text{м}}{\text{м}^3} = 1 \frac{\text{Н}}{\text{м}^2} = 1 \text{Па}.$$



Ответьте на вопросы

Почему плотность энергии магнитного поля получила название магнитного давления?

ПРИМЕР РЕШЕНИЯ ЗАДАЧИ

Катушка сопротивлением $R = 20 \text{ Ом}$ и индуктивностью $L = 0,01 \text{ Гн}$ находится в переменном магнитном поле. Когда создаваемый этим полем магнитный поток увеличился на $\Delta\Phi = 1 \text{ мВб}$, сила тока в катушке возросла на $\Delta I = 0,05 \text{ А}$. Какой заряд Δq прошел за это время по катушке?

Дано:

$$R = 20 \text{ Ом}$$

$$L = 0,01 \text{ Гн}$$

$$\Delta\Phi = 1 \text{ мВб}$$

$$\Delta I = 0,05 \text{ А}$$

$$\Delta q = ?$$

СИ

$$10^{-3} \text{ Вб}$$

Решение:

Ток в катушке порождает ЭДС индукции $\frac{\Delta\Phi}{\Delta t}$, которой противодействует ЭДС самоиндукции $L \frac{\Delta I}{\Delta t}$.

Следовательно, закон Ома для участка цепи, состоящей из катушки, будет иметь вид:

$$\frac{\Delta\Phi}{\Delta t} - L \frac{\Delta I}{\Delta t} = IR.$$

Умножим уравнение на Δt , получим:

$$\Delta\Phi - L\Delta I = IR\Delta t,$$

откуда

$$\Delta q = I\Delta t = \frac{\Delta\Phi - L\Delta I}{R}.$$

$$\text{Выполним вычисление: } \Delta q = \frac{10^{-3} \text{ Вб} - 0,01 \text{ Гн} \cdot 0,05 \text{ А}}{20 \text{ Ом}} = 25 \cdot 10^{-6} \text{ Кл}.$$

Ответ: $\Delta q = 25 \text{ мкКл}$.

Контрольные вопросы

1. В чем заключается явление самоиндукции?
2. Какими свойствами обладает катушка индуктивности?
3. Какая величина определяет инерционность катушки?
4. Чему равна энергия магнитного поля?



Упражнение

51

1. Индуктивность контура $L = 0,04$ Гн. Сила тока в контуре увеличилась на $\Delta I = 0,4$ А. На сколько изменился магнитный поток, создаваемый током в контуре?
2. Индуктивность контура $L = 20$ мГн. Чему равна средняя ЭДС самоиндукции в этом контуре, если за время $\Delta t = 0,02$ с сила тока в нем уменьшилась на $\Delta I = 0,04$ А?
3. Соленоид, индуктивность которого $L = 6$ мГн, содержит $N = 400$ витков. Сила тока, протекающая по обмотке, $I = 10$ А. Определите магнитный поток, возникающий в соленоиде.
4. В цепь последовательно включены источник тока с электродвижущей силой $\mathcal{E} = 1,2$ В, реостат сопротивлением $R = 1$ Ом и катушка индуктивностью $L = 1$ Гн. В цепи протекал постоянный ток I_0 . С некоторого момента сопротивление реостата начинают изменять так, чтобы ток уменьшался с постоянной скоростью $\Delta I / \Delta t = 0,2$ А/с. Чему равно сопротивление R_1 цепи спустя время $t = 2$ с после начала изменения тока?
5. По длинному соленоиду течет ток $I = 10$ А, создающий внутри соленоида магнитное поле с энергией $W = 0,5$ Дж. Определите магнитный поток, пронизывающий витки соленоида.

§ 52. Электродвигатель и электрогенератор постоянного тока

Ожидаемый результат

Прочитав параграф, вы сможете:

- исследовать действующую модель электродвигателя и аргументированно объяснять полученные результаты, используя закон Фарадея и правило Ленца.

I. Устройство электродвигателя и генератора

Задание 1: Рассмотрите модели двигателя и генератора для школьных лабораторий, запишите их основные части, укажите сходства и различия (рис. 336, 337).



Ответьте на вопрос

Можно ли использовать модель электродвигателя в качестве генератора?



Рис. 336. Модель электродвигателя для школьной лаборатории

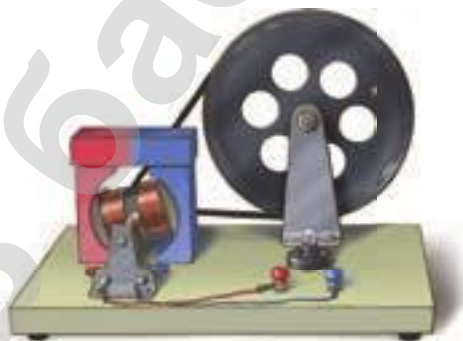


Рис. 337. Модель генератора для школьной лаборатории



Рис. 338



Рис. 339

Задание 2: Назовите устройства, которые изображены на рисунках 338–340. Поясните, по каким признакам вы отличали устройства?



Рис. 340

II. Принцип действия электродвигателя

Задание 3: Исследование работы двигателя

- 1) Подключите модель электродвигателя к источнику питания. Предварительно определите, какой источник необходим для вашей модели.
- 2) Смоделируйте, используя двигатель и подручные материалы, следующие электроприборы: вентилятор, лифт, миксер, дрель.
- 3) Изобразите одну из рамок двигателя между полюсами магнита. Обозначьте стороны рамки. Укажите направление тока в ней. Определите направление действия силы Ампера на каждую сторону рамки (рис. 341).

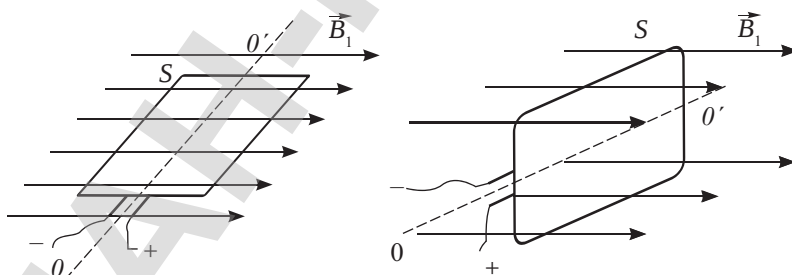


Рис. 341. Рамка с током в магнитном поле



Ответьте на вопросы

1. Какое правило вы использовали для определения направления силы Ампера?
2. Почему силы, действующие на противоположные стороны рамки, равны?
3. Почему они не компенсируют друг друга?
4. В каком положении рамки вращающий момент максимальный?

Задание 4: Рассмотрите основные части двигателя, изображенные на рисунках 342–344.



Ответьте на вопросы

1. Почему в статоре и роторе число обмоток больше, чем в модели двигателя? Как это влияет на работу двигателя?
2. Почему провод наматывают на металлические пластины?
3. Почему сердечники сделаны не из куска металла, а из пластин?
4. Для чего необходимы полукольца? На роторе какого двигателя они крепятся?



Рис. 342. Статор двигателя

Задание 5: Приведите несколько примеров использования двигателей постоянного тока.

III. Применение двигателей

Двигатели постоянного тока используют в железнодорожном транспорте для приводов колесных пар электричек, грузовых магистральных электровозов и тепловозов, а также для приводов шлагбаумов на железнодорожных переездах. В городском транспорте они обеспечивают тягу троллейбусов, трамваев и метро. В складском хозяйстве двигатели постоянного тока используют в приводах электрокаров и электрических погрузчиков, обеспечивая эффективность и безопасность проведения погрузочных работ.

В металлообработке двигатели постоянного тока устанавливают на металлорежущих станках, так как двигателям постоянного тока характерна равномерность вращения и способность выдерживать существенные перегрузки при небольшой частоте вращения.

Задание 6: Дайте определение изученным устройствам – двигателю и генератору.



Рис. 343. Ротор двигателя



Рис. 344. Полукольца



Ответьте на вопросы

1. На каком явлении основано действие генератора постоянного тока?
2. Что необходимо сделать, чтобы лампа, подключенная к генератору, горела ярче? Как это согласуется с законом электромагнитной индукции?
3. Каким способом изменяется магнитный поток, пронизывающий рамку модели генератора?
4. В чем принципиальное отличие работы генератора от работы двигателя?
5. Можем ли мы использовать двигатель как генератор? Что для этого необходимо сделать?

IV. Генератор постоянного тока



Вспомните

Работу по перемещению зарядов в обмотках ротора генератора совершает сила Лоренца, направленная вдоль обмотки. Составляющая силы Лоренца, направленная против скорости проводника перпендикулярно обмотке, совершает отрицательную работу (рис. 345). Перпендикулярная составляющая силы Лоренца появляется вследствие направленного движения заряженных частиц внутри проводника.

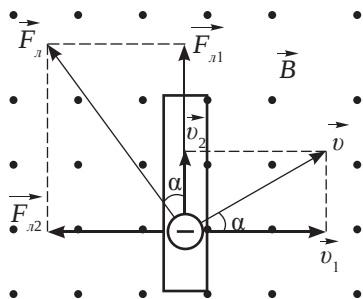


Рис. 345. Работа составляющих силы Лоренца при движении проводника в магнитном поле



Эксперимент

Приведите в действие модель генератора постоянного тока.



Ответьте на вопрос

Верите ли вы, что при вращении ротора за счет энергии падающей воды или под давлением нагретого пара в генераторах совершается механическая работа против составляющей силы Лоренца, перпендикулярной к проводнику?

Творческое задание

1. Подготовьте сообщения с ppt презентацией:
 1. «Роль двигателей и генераторов постоянного тока в промышленности РК».
 2. «Электродвигатели и транспорт».
 3. «Перспективы использования генераторов постоянного тока».
2. Изготовьте модель электродвигателя из подручных материалов.

Итоги главы 14

Магнитный поток	Закон электромагнитной индукции	Магнитное поле катушки
$\Phi = BS \cos \alpha$ α – угол между векторами $\vec{B}$ и $\vec{n}$ $\Phi = LI$	ЭДС контура $\varepsilon_i = -\frac{\Delta \Phi}{\Delta t}$ $\varepsilon_i = -N \frac{\Delta \Phi}{\Delta t}$ ЭДС проводника $\varepsilon_i = B v l \sin \alpha$ ЭДС самоиндукции $\varepsilon_{is} = -L \frac{\Delta I}{\Delta t}$	Индуктивность $L = \mu \cdot \mu_0 n^2 l S$ Энергия $W_{м.п.} = \frac{LI^2}{2}$ Плотность энергии $\omega_{м.п.} = \frac{W_{м.п.}}{V}$ $\omega_{м.п.} = \frac{B^2}{2\mu \cdot \mu_0}$

Законы, правила

Закон электромагнитной индукции

ЭДС индукции вихревого поля, созданного переменным магнитным полем, равна изменению магнитного потока проходящего через поверхность, ограниченную контуром, в единицу времени.

Гипотеза Максвелла

Переменное магнитное поле создает в пространстве переменное электрическое поле, линии напряженности которого охватывают линии индукции магнитного поля.

Правило Ленца

Индукционный ток всегда имеет такое направление, при котором его магнитное поле противодействует изменению магнитного потока, вызывающему этот ток.

Глоссарий

Индуктивность – физическая величина, характеризующая инертные свойства катушки.

Магнитный поток – число линий магнитной индукции, пронизывающих замкнутый контур, внесенный в магнитное поле.

Магнитный поток – физическая величина, равная произведению индукции магнитного поля, пронизывающего контур, на площадь контура и косинус угла между вектором магнитной индукции и нормалью к площади рамки.

Объемная плотность энергии магнитного поля – энергетическая характеристика магнитного поля, магнитное давление.

Самоиндукция – явление возникновения ЭДС индукции в проводящем контуре при изменении протекающего через контур тока.

Токи Фуко – индукционные токи в массивных сплошных проводниках.

Электрический генератор – машина, преобразующая механическую энергию вращения в электрическую энергию.

Явление электромагнитной индукции – явление возникновения индукционного тока в замкнутом проводящем контуре при изменении магнитного потока, проходящего через него.

ЛАБОРАТОРНЫЕ РАБОТЫ И ТАБЛИЦЫ

Изучив подраздел, вы сможете:

- В лабораторных работах указаны цели их проведения, необходимое оборудование, приведено описание хода работы с рисунками, таблицами и расчетными формулами.

Приложение 1. Лабораторные работы

Лабораторная работа № 1

Определение ускорения тела, движущегося по наклонному желобу

Цель работы: измерить ускорение, с которым шарик скатывается по наклонному желобу.

Оборудование: штатив с муфтой и лапкой, металлический желоб, шарик, цилиндрическое тело, измерительная лента, секундомер.

Краткая теория: Тело движется по наклонной плоскости с ускорением, перемещение тела будет равно: $s = v_0 t + \frac{at^2}{2}$.

При нулевом значении начальной скорости: $s = \frac{at^2}{2}$.

Получим формулу расчета: $a = \frac{2s}{t^2}$. (1)

Указание к работе:

1. Соберите установку, которая показана на *рисунке 1*, у основания желоба положите цилиндрическое тело.
2. Пустите шарик по желобу, измерьте время движения шарика по желобу.
3. С помощью измерительной ленты определите расстояние от начального положения шарика до цилиндра.
4. Результаты измерений занесите в таблицу 1:

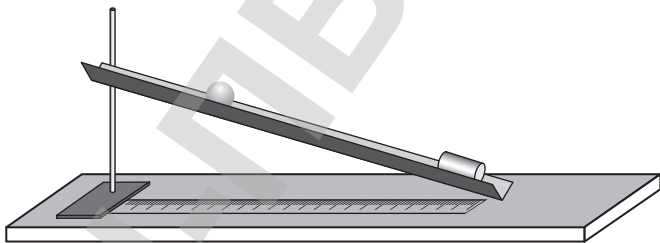


Рис. 1

Таблица 1

№ п/п	Измерено		Вычислено	
	Расстояние S , м	Время движения t , с	Ускорение a , м/с ²	Среднее значение ускорения a_{cp} , м/с ²
1				

5. Повторите опыт 5 раз, не изменяя угла наклона желоба.
6. Рассчитайте ускорение шарика по формуле (1) для каждого опыта, результат занесите в таблицу.
7. Рассчитайте среднее значение ускорения по формуле: $a_{cp} = \frac{a_1 + a_2 + a_3 + a_4 + a_5}{5}$.
8. Оцените погрешность измерений, статистическим методом, определив: абсолютную погрешность при каждом измерении: $\Delta a = |a_{cp} - a|$,

среднее значение абсолютной погрешности: $\Delta a_{cp} = \frac{\Delta a_1 + \Delta a_2 + \Delta a_3 + \Delta a_4 + \Delta a_5}{5}$

относительную погрешность: $\varepsilon = \frac{\Delta a_{cp}}{a_{cp}} \cdot 100\%$.

9. Запишите результат измерений в виде:

$$a = a_{cp} \pm \Delta a_{cp} \text{ при } \varepsilon = \dots \cdot 100\%$$

10. Сравните полученный вами результат с значением ускорения, рассчитанным по формуле $a = g \sin \alpha$, где α – угол наклона плоскости.

Вывод:

Сделайте вывод о причине возникновения ускорения шарика, скатывающегося по желобу.

Оцените погрешность, допущенную в измерениях составляющей ускорения свободного падения. Назовите основные причины погрешности измерений. К каким погрешностям: случайным или систематическим они относятся? Что бы вы изменили в постановке опыта для улучшения результатов?

Лабораторная работа № 2

Исследование зависимости дальности полета тела от угла бросания

Цель работы: выявить основные закономерности в движении тела, брошенного под углом к горизонту. Выяснить, при каких значениях угла бросания дальность полета максимальна.

Оборудование: пистолет баллистический лабораторный, измерительная лента, 2 листа писчей бумаги, 1 лист копировальной бумаги, липкая лента.

При отсутствии копировальной бумаги можно воспользоваться просеянным песком.

Краткая теория.

Дальность полета тела, брошенного под углом к горизонту (рис. 2), выражается формулой:

$$l = \frac{v_0^2 \sin 2\alpha_0}{g} \quad (1)$$

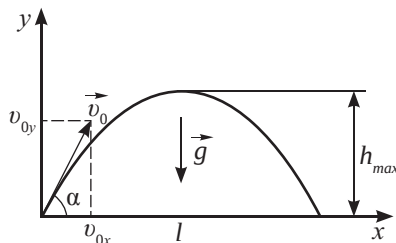


Рис. 2

Порядок выполнения работы:

1. Ознакомьтесь с устройством и действием баллистического пистолета.
2. Соберите установку, которая показана на рисунке 3.
3. Закрепите липкой лентой писчую бумагу так, чтобы после пробного выстрела под углом 45° шарик падал на ее дальний конец.
4. Наложите копировальную бумагу темной стороной на закрепленный лист.
5. Устанавливая пистолет под углом 20° , 30° , 40° , 45° , произведите по пять выстрелов в каждом положении. Следы падения шарика обведите карандашом, рядом отметьте углы бросания.

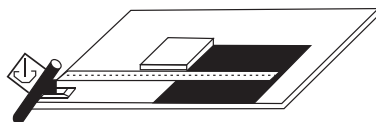


Рис. 3

6. Результаты измерений внесите в таблицу.

Угол вылета шарика α_0		20°	30°	40°	45°	50°	60°	70°	90°
Дальность полета, см	l_1								
	l_2								
	l_3								
	l_4								
	l_5								
Среднее значение дальности полета, см	l_{cp}								

7. Поменяйте лист и произведите по пять выстрелов под углом 50°, 60°, 70°, 90°.

8. Рассчитайте средние значения дальности полета по формулам:

$$l_{cp} = \frac{l_1 + l_2 + l_3 + l_4 + l_5}{5} \quad (2)$$

9. Ответьте на контрольные вопросы:

а) При каких значениях углов дальность полета приблизительно одинакова? Проверьте полученный результат, используя формулу расчета дальности полета (1).

Модуль скорости вылета шарика примите одинаковым для всех углов вылета.

б) При каком значении угла дальность полета максимальна? Как это согласуется с теорией?

10. Сделайте выводы из проведенного эксперимента.

Лабораторная работа № 3. Изучение движения тела, скатывающегося по наклонному желобу

Цель работы: научиться определять момент инерции вращательного тела, закрепить навыки обработки результатов при косвенных измерениях.

Оборудование: штатив с муфтой и лапкой, лоток дугообразный, шар диаметром 1,5–2 см, бумага копировальная, весы с разновесом, два бруска.

Краткая теория. Момент инерции шара можно определить по значению кинетической энергии вращающегося тела и его угловой скорости:

$$W_{ep} = \frac{J\omega^2}{2}, \quad J = \frac{2W_{ep}}{\omega^2}. \quad (1)$$

Шар в точке A (рис. 4) обладает потенциальной энергией mgh относительно горизонтального уровня B . При скатывания шара по желобу его потенциальная энергия преобразуется в кинетическую энергию поступательного движения тела W_n и кинетическую энергию вращательного движения тела W_{ep} . Для шара в точке B , согласно закону сохранения энергии, выполняется уравнение:

$$mgh = W_n + W_{ep}.$$

отсюда $W_{ep} = mgh - \frac{mv^2}{2},$

следовательно, $J = \frac{2W_{\text{вп}}}{\omega^2} = \frac{m(2gh - v^2)}{\omega^2}$,

где v – линейная скорость центра масс шара и ω – угловая скорость его вращения в точке B . Так как линейная скорость центра масс относительно желоба и линейная максимально удаленных от оси вращения точек на поверхности шара относительно центра масс равны между собой, то можно записать:

$$\omega = \frac{v}{R},$$

где R – радиус шара.

Тогда для момента инерции шара получим выражение:

$$J = mR^2 \left(\frac{2gh}{v^2} - 1 \right). \quad (2)$$

Линейную скорость центра масс шара v в точке B можно определить, зная дальность l и время t до поверхности стола:

$$v = \frac{l}{t}.$$

Время полета найдем из соотношения: $H = \frac{gt^2}{2}$, откуда: $t = \sqrt{\frac{2H}{g}}$.

Следовательно,

$$v = \frac{l}{\sqrt{2\frac{H}{g}}}. \quad (3)$$

Подставим значения из формулы (3) в (2) и получим:

$$J = \frac{mR^2(4hH - l^2)}{l^2}. \quad (4)$$

Ход работы:

1. Закрепите дугообразный лоток в лапке штатива таким образом, чтобы нижний участок лотка был параллелен поверхности стола. Измерив высоты h и H (рис. 4), занесите измерения в таблицу:

№ опыта	Измерено					Вычислено		
	m , кг	R , м	h , м	H , м	l , м	J , кг/м ²	$J_{\text{ср}}$, кг/м ²	ΔJ , кг/м ²
1								

2. Определите массу шарика, взвесив его на весах, результат занесите в таблицу.
3. Поместите шарик между брусками, определите его диаметр d , рассчитайте радиус $R = \frac{d}{2}$, результат внесите в таблицу.
4. Измерьте дальность полета шара, спустив его с высоты h от уровня падения, опыт повторите 5 раз.
5. Рассчитайте момент инерции для каждого опыта по формуле (4).

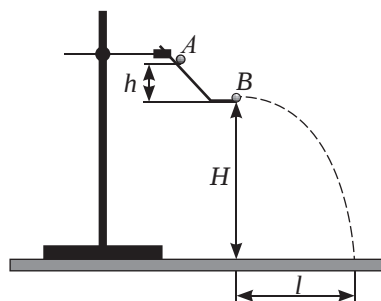


Рис. 4

- Определите среднее значение момента инерции: $J_{cp} = \frac{J_1 + J_2 + J_3 + J_4 + J_5}{5}$.
- Оцените погрешность измерения статистическим методом, определив абсолютную погрешность для каждого опыта: $\Delta J_i = |J_{cp} - J_i|$; среднее значение абсолютной погрешности: $\Delta J_{cp} = \frac{\Delta J_1 + \Delta J_2 + \Delta J_3 + \Delta J_4 + \Delta J_5}{5}$; относительную погрешность: $\varepsilon_J = \frac{\Delta J_{cp}}{J_{cp}} \cdot 100\%$.
- Рассчитайте момент инерции шара по формуле: $J_2 = \frac{2}{5} mR^2$.
Оцените погрешность измерения при однократном измерении: $\varepsilon_J = 2 \frac{\Delta R}{R} + \frac{\Delta m}{m}$;
 $\Delta J_2 = J_2 \cdot \varepsilon_J$.
- Запишите результаты измерений в виде: $J = J_{cp} \pm \Delta J_{cp}$; при $\varepsilon = \dots\%$; $J = J_2 \pm \Delta J_2$; при $\varepsilon = \dots\%$.
- Сравните полученные результаты, изобразив на прямой области значений момента инерции шара, полученных двумя методами.
- Сделайте выводы по выполненной работе.

Лабораторная работа № 4.

Сложение сил, направленных под углом друг к другу

Цель работы: определить величины сил опытным путем и экспериментально проверить правило сложения сил.

Оборудование и материалы: два динамометра, два штатива, брусок, транспортир, нить с петлями на концах.

Краткая теория. Равнодействующая сила равна векторной сумме всех сил, приложенных к телу:

$$\vec{R} = \vec{F}_{H1} + \vec{F}_{H2}.$$

Равнодействующую сил определяют построением по правилу треугольника или параллелограмма (рис. 5). Числовое значение рассчитывают по теореме косинусов. Модуль равнодействующей силы равен:

$$R = \sqrt{F_{H1}^2 + F_{H2}^2 - 2F_{H1}F_{H2} \cos \alpha}.$$

Ход работы:

- Определите силу тяжести, действующую на брусок.
- Подвесьте брусок к нити, концы которой закрепите к крючкам двух динамометров, закрепленных в лапках штативов под некоторым углом. Расположите штативы таким образом, чтобы нити натянулись и образовали со стержнями динамометров прямую линию.
- Запишите показания динамометров.
- Измерьте угол между натянутыми нитями.
- Повторите опыт, изменив угол наклона динамометров.

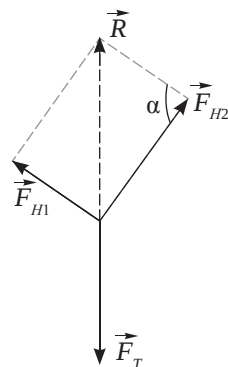


Рис. 5

№ опыта	Измерено				Вычислено
	Сила тяжести $F_T, Н$	Сила натяжения, F_{H1}	Сила натяжения, F_{H2}	Угол α	Равнодействующая сила $R, Н$

6. Обработайте полученные результаты.
 - В выбранном вами масштабе изобразите вектора сил, действующих на брусок в первом опыте, затем во втором, при этом начала векторов совместите с точкой подвеса бруска. По правилу параллелограмма постройте вектор равнодействующей двух сил натяжения нити.
 - Измерьте линейкой длину этого вектора. С учетом масштаба вычислите значение силы и сравните ее с силой тяжести.
 - Вычислите алгебраическую сумму двух сил натяжения нити, сравните ее с силой тяжести.
 - Вычислите равнодействующую силу по теореме косинусов, сравните с силой тяжести.
 - Сравните значения сил натяжения при различных углах между натянутыми нитями. Как увеличение угла влияет на величину сил натяжения?
7. Запишите выводы по проведенным исследованиям.
8. Что вы изменили бы в постановке эксперимента для улучшения результата?
9. Предложите свой способ проведения лабораторной работы. Какие приборы вам понадобятся?

Лабораторная работа № 5.

Исследование зависимости скорости шарика от его радиуса при движении в вязкой жидкости

Цель работы: определять факторы, влияющие на результат эксперимента, и предлагать пути его улучшения

Оборудование: четыре пробирки разного диаметра высотой 15–20 см с нанесенными через 1 см метками, подставка для пробирок, сосуды с моторными маслами различных марок, шарики диаметром 0,5 мм, 1 мм, 1,5 мм и 2 мм, секундомер, нагреватель (электроплитка).

Краткая теория.

На шарик, падающий в вязкой среде, действуют три силы: сила тяжести, сила Архимеда и сила сопротивления. При установившемся движении скорость падения постоянна, равнодействующая сил равна нулю:

$$\vec{F}_T + \vec{F}_A + \vec{F}_c = 0$$

С учетом направления сил имеем: $F_T = F_A + F_c$

В полученном соотношении заменим силы формулами:

$$F_T = mg = \rho_T \cdot \frac{4}{3} \pi R^3 \cdot g; \quad F_A = \rho_{ж} \cdot \frac{4}{3} \pi R^3 \cdot g; \quad F_c = 6\pi\eta Rv.$$

Решив уравнение относительно скорости, получим расчетную формулу:

$$v = \frac{2(\rho_T - \rho_{ж}) \cdot g \cdot R^2}{9\eta},$$

где ρ_T – плотность шарика, $\rho_{ж}$ – плотность жидкости, R – радиус шарика, v – установившаяся скорость шарика, η – вязкость жидкости.

Ход работы:

1. Исследование зависимости скорости шарика от его радиуса.
Для определения скорости падения шариков постройте графики зависимости пройденного пути от времени. Выберите на графике линию установившегося движения, по углу наклона прямой определите скорость падения шарика в жидкости. Как результаты эксперимента соотносятся с теоретической формулой расчета скорости падения шарика в вязкой среде?
2. Выявление факторов, влияющих на скорость падения шарика в вязкой среде:
 - а) определите скорость падения шарика диаметром 2 мм в другой жидкости;
 - б) определите скорость падения шарика диаметром 2 мм в первой среде, но большей температуры;
 - в) определите скорость падения шарика диаметром 2 мм в более широкой пробирке.
3. Сделайте выводы по проведенным исследованиям.
4. Какие изменения вы внесли бы в ход эксперимента для его улучшения?

Лабораторная работа № 6.

Изучение смешанного соединения проводников

Цель работы: получить навыки соединения проводника в качестве шунта, дополнительного сопротивления, делителя напряжения.

Изучение распределения напряжения на участках цепи со смешанным соединением проводников.

Оборудование: источник постоянного тока на 4 В, две лампы на 3,5 В (2,5 В), переменный резистор на 15–50 Ом, три вольтметра.

Краткая теория.

Соединение является смешанным, если в цепи есть и последовательное, и параллельное соединение проводников.

В зависимости от назначения проводника его соединение может быть различным:

1. Дополнительное сопротивление.

Сопротивление называется дополнительным, если оно подключено последовательно к проводникам, рассчитанным на работу с меньшим напряжением, чем напряжение на клеммах источника тока (рис. 6). Дополнительное сопротивление рассчитывается по разности этих напряжений и допустимой силе тока в цепи.

2. Шунт.

Если проводником пренебрежительно малого сопротивления замкнуть контакты электрического прибора, то потенциалы этих точек станут одинаковыми (рис. 7). Напряжение на концах проводника станет равным нулю. Ток в электрическом приборе

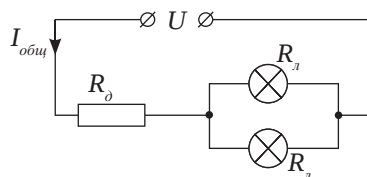


Рис. 6

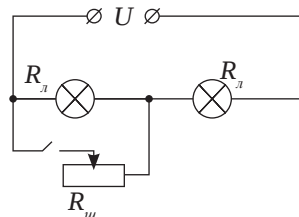


Рис. 7

не будет. Все носители зарядов пройдут через проводник. Такой проводник является шунтом.

Ключ, соединенный последовательно с шунтом, позволяет легко управлять цепью. В электрической цепи, схема которой приведена на рисунке 7, можно подключать одну или две лампы. Управлять цепью можно, используя выключатель или реостат.

3. Делитель напряжения (потенциометр).

Проводник переменного сопротивления позволяет поделить напряжение на клеммах источника тока в определенном соотношении на две ветви цепи. Для этого нужно соединить приборы так, как показано на рисунке 8.

Соотношение между напряжением на клеммах источника и напряжением на электрических приборах можно установить, собрав цепь, схема которой изображена на рисунке 9.

Порядок выполнения работы:

Задание 1. Подключение переменного резистора в качестве дополнительного сопротивления.

1. Соберите электрическую цепь по схеме, изображенной на рисунке 10.
2. Укажите назначение переменного резистора в цепи.
3. Снимите показание вольтметров при различных положениях движка реостата.
4. Результат занесите в таблицу.

№ опыта	Измерено			Вычислено
	$U_1, В$	$U_2, В$	$U, В$	$U_1 + U_2, В$
1				

5. Сравните напряжение на клеммах источника тока с суммой напряжений на участках ab и cd .
6. Объясните причину изменения яркости свечения ламп при перемещении движка резистора.
7. Сделайте выводы.

Задание 2. Подключение переменного резистора в качестве шунта.

1. Соберите электрическую цепь по схеме, изображенной на рисунке 11.
2. Укажите назначение переменного резистора в цепи.

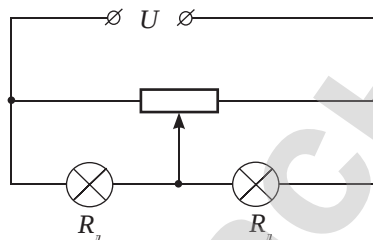


Рис. 8

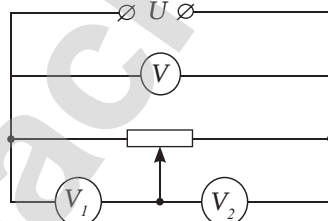


Рис. 9

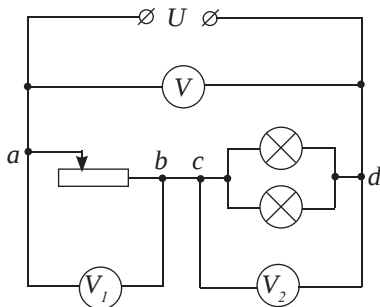


Рис. 10

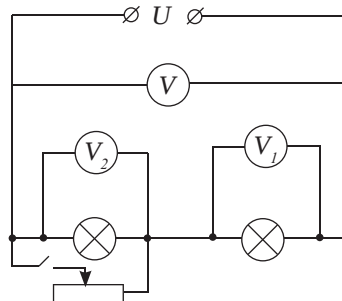


Рис. 11

- Снимите показания вольтметров при замкнутом и разомкнутом ключе. Результаты занесите в таблицу.

№ опыта	Положение ключа	Измерено			Вычислено
		$U_1, \text{В}$	$U_2, \text{В}$	$U, \text{В}$	$U_1 + U_2, \text{В}$
1	замкнутое				
2	разомкнутое				

- Снимите показание вольтметров при замкнутом ключе для крайних и среднего положения движка резистора. Проследите за яркостью свечения ламп. Результаты измерений занесите в таблицу.

№ опыта	Положение движка резистора	Измерено			Вычислено
		$U_1, \text{В}$	$U_2, \text{В}$	$U, \text{В}$	$U_1 + U_2, \text{В}$
1	Крайнее левое				
2	Среднее				
3	Крайнее правое				

- Сравните напряжение на клеммах источника тока с суммой напряжений на участках цепи.
- Укажите условия, при которых напряжение на первом вольтметре равно нулю.
- Сделайте выводы.

Задание 3. Подключение переменного резистора в качестве делителя напряжения.

- Соберите электрическую цепь по схеме, изображенной на рисунке 9.
- Перемещая движок резистора от одного крайнего положения до другого, снимите показания вольтметров в трех различных положениях движка. Результаты занесите в таблицу.

№ опыта	Измерено			Вычислено
	$U_1, \text{В}$	$U_2, \text{В}$	$U, \text{В}$	$U_1 + U_2, \text{В}$
1				

- Убедитесь, что общее напряжение в цепи при любом положении движка резистора равно сумме показаний вольтметров, подключенных к левой и правой части переменного резистора.
- Укажите назначение переменного резистора в цепи.
- Сделайте выводы.

Лабораторная работа № 7.

Определение ЭДС и внутреннего сопротивления источника тока

Цель работы: определить ЭДС источника тока и его внутреннее сопротивление.

Оборудование: источник тока – батарейка гальванических элементов на 4,5 В, амперметр, вольтметр, реостат на 6 Ом, соединительные провода.

Краткая теория.

Используя закон Ома $I = \frac{U}{R}$ для участка цепи, схема которой приводится на рисунке 12, и закон Ома для полной цепи $I = \frac{\varepsilon}{R + r}$, выразим ЭДС источника:

$$\varepsilon = U_1 + I_1 r. \quad (1)$$

Изменим с помощью реостата силу тока в цепи, тогда формула (1) примет вид:

$$\varepsilon = U_2 + I_2 r. \quad (2)$$

Из (1) и (2) следует: $U_1 + I_1 r = U_2 + I_2 r$, следовательно:

$$r = \frac{U_1 - U_2}{I_2 - I_1}. \quad (3)$$

Подставив формулу (3) в (1), получим:

$$\varepsilon = \frac{U_2 I_1 - U_1 I_2}{I_1 - I_2}. \quad (4)$$

Порядок выполнения работы:

1. Соберите цепь по схеме (рис. 12).
2. Ползун реостата расположите посередине прибора.
3. Замкнув цепь, снимите показания амперметра I_1 и вольтметра U_1 . Результаты занесите в таблицу:

№ опыта	Измерено				Вычислено				
	I_1, A	$U_1, \text{В}$	I_2, A	$U_2, \text{В}$	$\varepsilon, \text{В}$	$r, \text{Ом}$	$\varepsilon, \%$	$\Delta \varepsilon$	Δr
1									

4. Увеличивая сопротивление реостата, переместите ползун в новое положение, снимите показания амперметра I_2 и вольтметра U_2 , показания занесите в таблицу.
5. По формулам (3) и (4) рассчитайте величины внутреннего сопротивления и ЭДС источника.
6. Рассчитайте погрешности измерений по классу точности измерительных приборов.
7. Запишите ответ с учетом погрешностей.
8. Определите ЭДС источника прямым измерением, сравните полученные результаты.

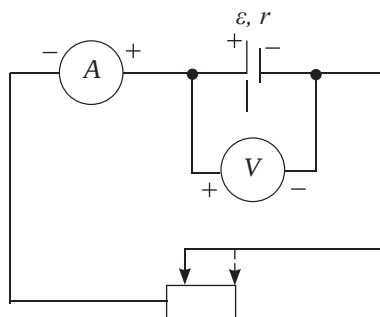


Рис. 12

Лабораторная работа № 8.

Вольт-амперная характеристика лампы накаливания, резистора и полупроводникового диода

Цель работы: исследовать вольт-амперные характеристики лампы накаливания, резистора и полупроводникового диода

Оборудование: электрическая лампа на подставке на 12 В, реостат на 15 Ом, вольтметр, миллиамперметр на 50 мА, источник тока на 6 В, магазин сопротивлений на 100 Ом, диод, ключ, соединительные провода.

Порядок выполнения работы.

Задание 1. Исследование вольт-амперной характеристики лампы накаливания.

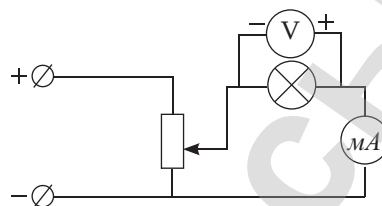


Рис. 13

1. Соберите электрическую цепь по схеме, изображенной на *рисунке 13*.
2. Приготовьте в тетради таблицу для записи результатов измерений и вычислений.

[illegible]

3. Плавное увеличивайте напряжение на лампе от 0 до 6 В с шагом 0,5 В.
4. Занесите показания вольтметра и миллиамперметра в таблицу.
5. Постройте график вольт-амперной характеристики лампы. Объясните полученный результат.
6. Определите сопротивление нити накала лампы при разных значениях силы тока и напряжения. Результаты занесите в таблицу.
7. Проанализируйте полученные значения сопротивления нити накала лампы.

Задание 2. Исследование вольт-амперной характеристики резистора.

1. Замените в электрической цепи лампу магазином сопротивлений на 100 Ом.
2. Приготовьте в тетради таблицу для записи результатов измерений

$U, \text{ В}$					
$I, \text{ мА } (R = 100 \text{ Ом})$					
$I, \text{ мА } (R = 50 \text{ Ом})$					

3. Увеличивайте напряжение на резисторе от 0 до 6 В с шагом 1 В. Показания вольтметра и миллиамперметра занесите в таблицу.
4. Замените резистор другим резистором, на 50 Ом, снимите показания миллиамперметра при тех же значениях напряжения. Результаты занесите в таблицу.
5. Начертите вольт-амперные характеристики резисторов на одной координатной сетке. Чем отличаются вольт-амперные характеристики лампы накаливания и резисторов?
6. Напишите уравнение зависимости $I = f(U)$ полученных вольт-амперных характеристик резисторов. Что в них общего? Чем они отличаются?

Задание 3. Исследование вольт-амперной характеристики полупроводникового диода.

1. Запишите предельные параметры предложенного полупроводникового диода.
2. Соберите электрическую цепь с прямым подключением диода, заменив в цепи резистор на диод. Учитывая параметры прямого подключения диода, ориентировочно 1,5 В и 300 мА – выберите пределы на измерительных приборах.

- Снимите вольт-амперную характеристику прямого включения диода с шагом 0,3 В. Результаты измерений и расчетов занести в таблицу.

U, В						
I, мА						
R, Ом						

- Соберите электрическую цепь с обратным подключением диода. Выберите пределы измерений, ориентировочно 15 В и 3 мА.
- Снимите вольт-амперную характеристику обратного включения диода с шагом 1 В. Результаты измерений и расчетов занесите в таблицу.

U, В						
I, мА						
R, Ом						

- Постройте графики зависимости силы тока от напряжения на одной координатной плоскости: для прямого включения – в 1 четверти плоскости, для обратного – в 3 четверти. Объясните полученные результаты.
- Определите сопротивление диода при разных значениях силы тока и напряжения. Результаты занесите в таблицу.
- Проанализируйте полученные значения сопротивления диода.

Лабораторная работа № 9.

Измерение электрического заряда одновалентного иона

Цель работы: экспериментально определять заряд электрона в процессе электролиза.

Оборудование: электролитическая ванна с раствором медного купороса, источник постоянного тока, амперметр, реостат, ключ, весы с разновесами, секундомер, электрическая плитка (сушильный шкаф), соединительные провода.

Краткая теория

Законы Фарадея позволяют с высокой точностью определить заряд электрона.

Выразим из объединенного закона Фарадея формулу расчета заряда электрона:

$$e = \frac{MIt}{mN_A n},$$

где m – масса выделившегося на электроде вещества, которая определяется как разность масс электродов до и после электролиза, M – молярная масса, n – валентность ионов, I – сила тока через электролит, t – время электролиза.

Порядок выполнения работы

- Зачистите и определите массу медного электрода, который будет использован в качестве катода. Значение измеренной массы m_1 занесите в таблицу.

m_1 , кг	m_2 , кг	m , кг	I , А	t , с	e , Кл

2. Поместите в электролитическую ванну с электролитом медные электроды – катод и анод. Подключите катод к отрицательной клемме источника постоянного тока, анод – к положительной клемме через реостат (рис. 14).
3. Включите источник питания, определив время начала эксперимента, который продлится 30 мин. Во время эксперимента необходимо поддерживать силу тока постоянной величиной, меняя положение ползуна реостата.
4. По истечении времени эксперимента отключите источник питания, отсоедините катод, просушите его над электроплиткой и с помощью весов определите массу m_2 . Приращение массы катода m дает разность $m_2 - m_1$. Результаты измерений занесите в таблицу.
5. Рассчитайте заряд электрона, приняв молярную массу меди равной $M = 63,5 \cdot 10^{-3}$ кг/ моль и учитывая, что медь двухвалентна $Z = 2$.
6. Сравните полученное значение заряда электрона с табличным значением. Определите погрешность измерений.

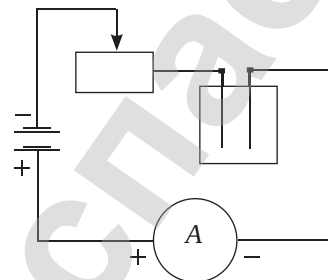


Рис. 14

Приложение 2

Греческий алфавит			Латинский алфавит		
Α α альфа	Ι ι йота	Ρ ρ ро	Α α а	Ј ј жи	Σ σ эс
Β β бета	Κ κ каппа	Σ σ сигма	Β β бе	Κ κ ка	Τ τ тэ
Γ γ гамма	Λ λ лямбда	Τ τ тау	С с це	Λ λ эль	Υ υ у
Δ δ дельта	Μ μ мю	Υ υ ипсилон	Δ δ де	Μ μ эм	Ϝ ϝ вэ
Ε ε эпсилон	Ν ν ню	Φ φ фи	Ε ε э	Ν ν эн	Ϟ ϟ дубль-вэ
Ζ ζ дзета	Ξ ξ кси	Χ χ хи	Ζ ζ эф	Ο ο о	Ϡ ϡ икс
Η η эта	Ο ο омикрон	Ψ ψ пси	Γ γ же	Ρ ρ пэ	Υ υ игрек
Θ θ тета	Π π пи	Ω ω омега	Η η аш	Q q ку	Ζ ζ зет
			Ι ι и	R r эр	

Приложение 3. Таблицы физических величин

Таблица 1. Физические постоянные

Физическая постоянная	Обозначение	Значение постоянной
Скорость света в вакууме	c	$\approx 3 \cdot 10^8$ м/с
Элементарный заряд (заряд электрона)	e	$-1,6 \cdot 10^{-19}$ Кл
Масса покоя электрона	m_e	$9,1 \cdot 10^{-31}$ кг
Масса покоя протона	m_p	$1,67 \cdot 10^{-27}$ кг
Постоянная Больцмана	k	$1,38 \cdot 10^{-23}$ Дж/К
Универсальная газовая постоянная	R	8,31 Дж/(моль К)
Гравитационная постоянная	G	$6,67 \cdot 10^{-11}$ Нм ² /кг
Постоянная Планка	h	$6,63 \cdot 10^{-34}$ Дж с
Постоянная Фарадея	F	9 648 4,56 Кл/моль
Молярный объем идеального газа при нормальных условиях ($t = 0$ °С, $p = 101,325$ кПа)	V_m	$2,24 \cdot 10^{-2}$ м ³ /моль
Постоянная Авогадро	N_A	$6,02 \cdot 10^{23}$ моль ⁻¹
Абсолютный нуль температуры	T_0	0 К = -273,15 °С
Нормальное атмосферное давление	$P_{атм н}$	101325 Па
Плотность воздуха при нормальных условиях	$\rho_{возд}$	1,293 кг/м ³

Таблица 2. Плотность веществ

Вещество	Плотность $\left(\frac{\text{г}}{\text{см}^3}, \text{ или } \rho \cdot 10^3 \frac{\text{кг}}{\text{м}^3} \right)$	Вещество	Плотность $\left(\frac{\text{г}}{\text{см}^3}, \text{ или } \rho \cdot 10^3 \frac{\text{кг}}{\text{м}^3} \right)$
Алюминий	2,7	Никель	8,9
Бронза	8,7–8,9	Олово	7,3
Вольфрам	19,34	Платина	21,6
Железо, сталь	7,8	Свинец	11,4
Золото	19,3	Серебро	10,5
Латунь	8,7	Титан	4,5
Медь	8,9	Цинк	7,18

Таблица 3. Удельная теплоемкость вещества

Вещество	$c, \frac{\text{Дж}}{\text{кг} \cdot ^\circ\text{C}}$	Вещество	$c, \frac{\text{Дж}}{\text{кг} \cdot ^\circ\text{C}}$
Алюминий	920	Песок	880
Вода	4200	Платина	140
Воздух	1000	Ртуть	130
Железо	460	Свинец	140
Керосин	2100	Серебро	250
Кирпич	880	Спирт	2500
Латунь	380	Сталь	500
Лед	2100	Стекло	840
Медь	380	Цинк	380
Никель	460	Чугун	540
Олово	250	Эфир	3340

Таблица 4. Удельная теплота плавления, температура плавления

Вещество	$t, ^\circ\text{C}$	$\lambda, 10^4 \frac{\text{Дж}}{\text{кг}}$	Вещество	$t, ^\circ\text{C}$	$\lambda, 10^4 \frac{\text{Дж}}{\text{кг}}$
Алюминий	658	39	Олово	232	5,9
Железо	1539	27	Платина	1774	11
Золото	1063	6,7	Ртуть	-39	1,0
Лед	0	34	Свинец	327	2,5
Медь	1083	21	Серебро	960	10
Нафталин	80	15	Цинк	420	12

Таблица 5. Удельная теплота парообразования и температура кипения веществ при атмосферном давлении

Вещество	$t, ^\circ\text{C}$	$r, 10^6 \frac{\text{Дж}}{\text{кг}}$	Вещество	$t, ^\circ\text{C}$	$r, 10^6 \frac{\text{Дж}}{\text{кг}}$
Вода	100	2,3	Спирт	78	0,9
Ртуть	357	0,3	Эфир	35	0,4

Таблица 6. Удельная теплота сгорания топлива

Вещество	$q, 10^6 \frac{\text{Дж}}{\text{кг}}$	Вещество	$q, 10^6 \frac{\text{Дж}}{\text{кг}}$
Бензин	46	Каменный уголь	30
Бурый уголь	17	Керосин	46
Водород	120	Нефть	44
Дизельное топливо	42,7	Порох	3,8
Дрова* (березовые)	13	Природный газ	44
Дрова* (сосновые)	13	Спирт	27
Древесный уголь	34	Торф	14

Таблица 7. Зависимость давления и плотности насыщенных паров от температуры

$t, ^\circ\text{C}$	$p, \text{кПа}$	$\rho, \text{г/м}^3$	$t, ^\circ\text{C}$	$p, \text{кПа}$	$\rho, \text{г/м}^3$	$t, ^\circ\text{C}$	$p, \text{кПа}$	$\rho, \text{г/м}^3$
0	0,61	4,84	20	2,34	17,32	40	7,38	51,2
1	0,66	5,18	21	2,49	18,14	41	7,78	53,8
2	0,71	5,54	22	2,64	19,22	42	8,21	56,5
3	0,76	5,92	23	2,81	20,35	43	8,65	59,4
4	0,81	6,33	24	2,99	21,54	44	9,11	62,3
5	0,87	6,76	25	3,17	22,80	45	9,59	65,4
6	0,94	7,22	26	3,36	24,11	46	10,10	68,6
7	1,0	7,70	27	3,57	25,49	47	10,62	72,0
8	1,07	8,21	28	3,78	26,93	48	11,17	75,5
9	1,15	8,76	29	4,01	28,45	49	11,75	79,1
10	1,23	9,33	30	4,25	30,04	50	12,34	82,8
11	1,31	9,93	31	4,50	31,70	55	15,75	104,0
12	1,40	10,57	32	4,71	33,45	60	19,93	129,5
13	1,50	11,25	33	5,03	35,27	65	25,02	160,1
14	1,60	11,96	34	5,27	37,18	70	31,18	196,4
15	1,71	12,71	35	5,63	39,18	75	38,56	239,3
16	1,82	13,50	36	5,95	41,30	80	47,37	289,7
17	1,94	14,34	37	6,28	43,50	85	57,82	348,7
18	2,06	15,22	38	6,63	45,80	90	70,12	417,3
19	2,20	16,14	39	6,99	48,20	100	101,32	588,5

Таблица 8. Критическая температура

Вещество	Критическая температура $t, ^\circ\text{C}$	Вещество	Критическая температура $t, ^\circ\text{C}$
Ртуть	1700	Углекислый газ	31
Вода	374	Кислород	-118
Спирт этиловый	243	Азот	-146
Эфир	197	Водород	-240
Хлор	146	Гелий	-263

Таблица 9. Психрометрическая таблица

Показания сухого термометра $t, ^\circ\text{C}$	Разность показаний сухого и влажного термометра $^\circ\text{C}$									
	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
	Относительная влажность, %									
1	91	80	67	53	36	18				
2	90	81	69	56	41	24	4			
3	90	79	72	59	45	29	11			
4	91	81	69	62	49	34	17			
5	92	82	71	59	52	39	23	5		
6	92	83	73	62	49	43	28	12		
7	93	84	75	64	52	38	33	18	1	

Показания сухого термометра $t, ^\circ\text{C}$	Разность показаний сухого и влажного термометра $^\circ\text{C}$									
	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
	Относительная влажность, %									
8	93	86	77	67	55	42	28	24	8	
9	94	86	78	69	58	46	33	17	14	
10	94	87	80	71	61	50	37	23	7	
11	94	88	81	73	64	53	41	28	13	
12	95	89	82	75	66	56	45	33	19	4
13	95	90	83	76	68	59	49	38	25	10
14	95	90	84	78	70	62	52	42	30	16
15	96	91	85	79	72	64	55	45	34	22
16	96	91	86	80	74	67	58	49	39	27
17	96	92	87	82	76	69	61	52	43	32
18	96	92	88	83	77	71	63	55	46	36
19	97	93	89	84	79	73	66	58	50	40
20	97	93	89	85	80	74	68	61	53	44
21	97	94	90	86	81	76	70	63	56	48
22	97	94	91	87	82	77	72	66	59	51
23	97	94	91	87	83	79	73	68	61	54
24	98	95	92	88	84	80	75	70	64	57
25	98	95	92	89	85	81	77	71	66	59
26	98	95	93	90	86	82	78	73	68	62
27	98	96	93	90	87	83	79	75	70	64
28	98	96	93	91	88	84	80	76	72	66
29	98	96	94	91	88	85	82	78	73	68
30	98	96	94	92	89	86	83	79	75	70
31	98	97	94	92	90	87	84	80	76	72
32	98	97	95	93	90	88	85	81	78	74
33	99	97	95	93	91	88	85	82	79	75
34	99	97	95	93	91	89	86	83	80	77
35	99	97	96	94	92	90	87	84	81	78
36	99	97	96	94	92	90	88	85	82	79
37	99	98	96	94	93	91	88	86	83	80
38	99	98	96	95	93	91	89	87	84	81
39	99	98	96	95	93	92	90	88	85	83
40	99	98	97	95	94	92	90	88	86	83

Таблица 10. Коэффициент поверхностного натяжения жидкостей при 20°C

Вещество	$\sigma, \frac{\text{мН}}{\text{м}}$	Вещество	$\sigma, \frac{\text{мН}}{\text{м}}$
Вода	73	Молоко	46
Бензин	21	Нефть	26
Глицерин	59	Ртуть	487
Керосин	24	Спирт	22
Мыльный раствор	40	Уксусная кислота	28

Таблица 11. Механические свойства твердых тел

Вещество	Предел прочности на растяжение $\sigma_{пч}$, МПа	Модуль упругости E , ГПа	Вещество	Предел прочности на растяжение $\sigma_{пч}$, МПа	Модуль упругости E , ГПа
Алюминий	100	70	Мрамор	140	70
Бетон	48	20	Олово	20	50
Вольфрам	3000	415	Свинец	15	16
Гранит	150	49	Серебро	140	80
Золото	140	79	Сталь	500	200
Кирпич	17	3	Стекло	90	50
Лед	1	10	Фарфор	650	150
Медь	400	120	Цинк	150	80

Таблица 12. Диэлектрическая проницаемость среды

Вещество	Диэлектрическая проницаемость	Вещество	Диэлектрическая проницаемость
Вода	81	Парафин	2,1
Керосин	2,1	Слюда	6
Масло	2,5	Стекло	7

Таблица 13. Удельное сопротивление металлов и сплавов

Вещество	ρ , Ом·м	Вещество	ρ , Ом·м
Алюминий	$2,7 \cdot 10^{-8}$	Нихром	$1,05 \cdot 10^{-6}$
Вольфрам	$5,3 \cdot 10^{-8}$	Олово	$1,13 \cdot 10^{-7}$
Железо	$9,9 \cdot 10^{-8}$	Осмий	$9,5 \cdot 10^{-8}$
Золото	$2,2 \cdot 10^{-8}$	Платина	$1,05 \cdot 10^{-7}$
Константан	$4,7 \cdot 10^{-8}$	Ртуть	$9,54 \cdot 10^{-7}$
Латунь	$6,3 \cdot 10^{-8}$	Свинец	$2,07 \cdot 10^{-7}$
Магнанин	$3,9 \cdot 10^{-8}$	Серебро	$1,58 \cdot 10^{-8}$
Медь	$1,68 \cdot 10^{-8}$	Фехраль	$1,1 \cdot 10^{-6}$
Никелин	$4,2 \cdot 10^{-8}$	Цинк	$5,95 \cdot 10^{-8}$
Никель	$7,3 \cdot 10^{-8}$	Чугун	$5 \cdot 10^{-7}$

Таблица 14. Температурный коэффициент сопротивления

Вещество	α , K^{-1}	Вещество	α , K^{-1}
Вольфрам	$5 \cdot 10^{-3}$	Никелин	10^{-4}
Константан	$5 \cdot 10^{-6}$	Нихром	$2 \cdot 10^{-4}$
Магнанин	$8 \cdot 10^{-5}$	Фехраль	$2 \cdot 10^{-4}$

Таблица 15. Электрохимический эквивалент

Вещество	$k, \frac{\text{кг}}{\text{Кл}}$	Вещество	$k, \frac{\text{кг}}{\text{Кл}}$
Алюминий	$9,32 \cdot 10^{-8}$	Натрий	$2,38 \cdot 10^{-7}$
Водород	$1,04 \cdot 10^{-8}$	Никель (двухвалентный)	$3,04 \cdot 10^{-7}$
Золото	$6,81 \cdot 10^{-7}$	Никель (трехвалентный)	$2,03 \cdot 10^{-7}$
Калий	$4,05 \cdot 10^{-7}$	Ртуть	$2,07 \cdot 10^{-6}$
Кальций	$2,08 \cdot 10^{-7}$	Свинец	$1,07 \cdot 10^{-6}$
Кислород	$8,29 \cdot 10^{-8}$	Серебро	$1,12 \cdot 10^{-8}$
Магний	$1,26 \cdot 10^{-7}$	Хлор	$3,67 \cdot 10^{-7}$
Медь	$3,29 \cdot 10^{-7}$	Цинк	$3,39 \cdot 10^{-7}$

Таблица 16. Магнитные проницаемости пара- и диамагнетиков

Парамагнитные вещества	μ	Диамагнитные вещества	μ
Азот (газообразный)	1,000013	Водород (газообразный)	0,999937
Воздух (газообразный)	1,000038	Вода	0,999991
Кислород (газообразный)	1,000017	Стекло	0,999987
Кислород (жидкий)	1,0034	Цинк	0,999991
Эбонит	1,000014	Серебро	0,999981
Алюминий	1,000023	Золото	0,999963
Вольфрам	1,000175	Медь	0,999912
Платина	1,000253	Висмут	0,999824

Таблица 17. Показатели преломления некоторых веществ

Вещество	n	Вещество	n
Азот	1,000298	Алмаз	2,42
Водород	1,000132	Железо	1,63
Водяной пар	1,000255	Золото	0,37
Воздух	1,000292	Каменная соль	1,54
Кислород	1,000271	Лед (от 0 до -4°C)	1,31
Ацетон	1,36	Медь	2,6
Бензин	1,38–1,41	Натрий	0,005
Вода	1,33	Рубин	1,75
Глицерин	1,47	Сахар	1,56
Молоко	1,35–1,36	Серебро	0,18
Спирт метиловый	1,33	Стекло	1,5–1,9
Эфир	1,35	Янтарь	1,55

ПЕРИОДИЧЕСКАЯ СИСТЕМА ХИМИЧЕСКИХ ЭЛЕМЕНТОВ Д.И. МЕНДЕЛЕЕВА

Период	Группы	I	II	III	IV	V	VI	VII	Э	Л	М	Н	Т	О	В
1	1	H 1,008													
2	2	Li 6,941	Be 9,012	B 10,811	C 12,011	N 14,007	O 15,999	F 18,998							
3	3	Na 22,990	Mg 24,305	Al 26,981	Si 28,085	P 30,974	S 32,064	Cl 35,453							
4	4	K 39,098	Ca 40,08	Sc 44,956	Ti 47,88	V 50,941	Cr 51,996	Mn 54,938	Fe 55,847	Co 58,933	Ni 58,70				
5	5	Rb 85,468	Sr 87,62	Y 88,906	Zr 91,224	Nb 92,906	Mo 95,94	Tc 98,906	Ru 101,07	Rh 102,905	Pd 106,42				
6	6	Cs 132,905	Ba 137,33	La 138,905	Hf 178,49	Ta 180,94	W 183,85	Re 186,207	Os 190,2	Ir 192,22	Pt 195,09				
7	7	Fr [223]	Ra 226,025	Ac [227]	Rf [261]	Db [261]	Sg [266]	Lr [260]							
Высшие окислы		R ₂ O	RO	R ₂ O ₃	RO ₂	R ₂ O ₅	RO ₃	R ₂ O ₇							
Летучие водородные соединения					RH ₄	RH ₃	H ₂ R	HR							
8	8	Ce 140,12	Pr 140,908	Nd 144,24	Pm [145]	Sm 150,4	Eu 151,96	Gd 157,25	Tb 158,925	Dy 162,50	Ho 164,930	Er 167,26	Tm 168,934	Yb 173,04	Lu 174,967
9	9	Th 232,038	Pa 231,036	U 238,029	Np 237,048	Pu 244	Am [243]	Cm [247]	Bk [247]	Cf [251]	Es [254]	Fm [257]	Md [258]	No [259]	Lr [260]

Химический знак

Порядковый номер

Скандий

21

44,956

Округленная атомная масса

Число электронов на внешнем энергетическом уровне

Название элемента

S-элементы

P-элементы

d-элементы

f-элементы

I энергетический уровень

II энергетический уровень

III энергетический уровень

IV энергетический уровень

V энергетический уровень

VI энергетический уровень

VII энергетический уровень

9

7

2

F

Фтор

18,998

У элементов, которым соответствуют простые вещества металлы, порядковые номера помещены в квадратике.

Mo

42

13

95,94

Молибден

У элементов, окислы и летучие водородные соединения проявляют амфотерные свойства, порядковые номера обведены кружочком.

Na

11

22,990

Натрий

У элементов, которым соответствуют простые вещества металлы, порядковые номера обведены кружочком.

Предметно-именной указатель

Анизотропность	155	Момент инерции	49
Адиабатный процесс	133	Насыщенный пар	144
Абсолютная влажность воздуха	145	Ненасыщенный пар	144
Вискозиметр	90	Напряженность электрического поля	169
Вязкость	89	Относительная влажность воздуха	146
Вечный двигатель первого рода	134	Относительная скорость	23
Гидро- и аэродинамика	80	Примесная проводимость	237
Гальваностегия	242	Парамагнетики	275
Динамика	37	Погрешность измерения	10
Динамическое равновесие	118	Плотность тока	206
Диаманетики	190	Переносная скорость	23
Диполь	189	Работа тока	223
Изотропность	84	Рекомбинация	241
Изохорный процесс	119	Равновесие	66
Изотерма	119	Радиус кривизны	34
Изобарный процесс	119	Силы поверхностного натяжения	151
Изопроцесс	118	Силовые линии электрического поля	171
Идеальная жидкость	70	Сила тока	206
Идеальный газ	81	Силовые линии магнитного поля	258
Индуктивность	294	Сила Ампера	262
Кинематика	5	Сила Лоренца	268
Кристаллическая решетка	156	Сила молекулярного давления	150
Круговой процесс или цикл	136	Сила инерции	40
Капилляры	153	Самоиндукция	293
Коэффициент поверхностного натяжения	151	Статика	59
Конденсатор	195	Степень диссоциации	241
Количество вещества	98	Тепловая машина	137
Кулон	165	Точка росы	145
Коэффициент полезного действия	225	Точечные заряды	166
Линии тока	81	Температурный коэффициент сопротивления	232
Механика	5	Термистор	236
Макроскопические величины	101	Термоэлектронная эмиссия	249
Микроскопические величины	101	Температура	102
Мощность тока	224	Термодинамическое равновесие	102
Магнитное поле	263	Тройная точка	147
Магнитная проницаемость	275	Угловое ускорение	27
Магнитный поток	283	Ударная ионизация	247
Магнитная индукция	256	Уравнение состояния газа	114
Механическое напряжение	157	Фарад	194
Молярная теплоемкость	132	Ферромагнетики	190
Молярная масса	98	Центр тяжести	42
Моль	98	Центр масс	42
Момент импульса	53	Энергия полная механическая	65

Электрическое поле	131	Электролиз	161
Электростатика	131	Энергия	103
Электродвижущая сила	145	Элемент тока	70
Электролитическая диссоциация	160	Электрохимический эквивалент	162
Эквипотенциальная поверхность	184	Электронно-дырочная проводимость	159
Энтропия	139	Емкость уединенного проводника	136
Элемент тока	80	Явление электромагнитной индукции	202
Электронно-лучевая трубка	250		
Электрический ток	206		

Ответы к упражнениям

Упр. 2. 1. $2,8 \pm 0,2$ В; $2,80 \pm 0,1$ В.

2. $14,0 \pm 0,4$ Ом.

Упр. 3. 1. $0,07$ м/с². 2. 2 м/с. 3. -1 м/с².

4. а) 2 м/с²; 0 ; 1 м/с²; -4 м/с²; 99 м; 99 м;

2) $x_1 = 5 + t^2$; $x_2 = -4 + 6t$; 3) рис. 1.

5. $3,24$ м.

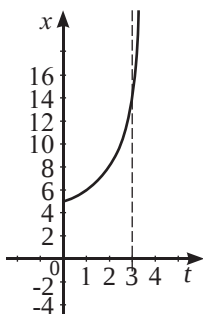


Рис. 1

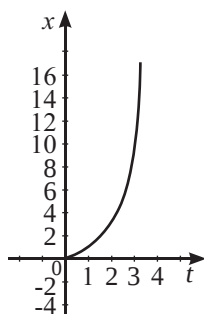


Рис. 2

Упр. 4. 1. $\approx 8,3$ м/с; $\approx -8,3$ м/с; 2. 20 с. 3. 4 м/с.

4. 90 с, 81 м, $\approx 115,6$ с.

Упр. 5. 1. 25 м/с². 2. 25 м/с; $0,71$ м/с².

3. $-0,314$ рад/с². 4. 5 с. 5. $\approx 0,49$ м/с;
 $\approx 0,015$ рад/с; $\approx 0,007$ м/с²; 0 .

Упр. 6. 1. $\approx 0,87$ м. 2. $19,8$ м. 3. 45° . 4. 540 м.

5. $5,3$ м/с.

Упр. 7. 1. $2,5$ Н. 2. $-0,1$ м/с²; $10,1$ м/с².

3. $5,4$ Н. 4. $90,4$ Н.

Упр. 8. 1. 90 мкН; 2. ≈ 1497 км. 3. $6 R_3$ от центра Луны.

$$4. F = G M m \left(\frac{1}{L^2} - \frac{1}{2(2L - R^2)} \right).$$

5. В 4 раза, в 9 раз, в 16 раз.

6. $\approx 9,4$ МДж/кг; $\approx 12,2$ ГДж.

$$7. T = 2\pi \sqrt{\frac{R_3}{g}}.$$

Упр. 9. 1. $2 \cdot 10^{-3}$ кг·м²; 7 рад/с. 2. $4 \cdot 10^4$ Н·м.

3. ≈ 1034 кг·м²; $\approx 3,6 \cdot 10^{22}$ Дж.

4. 24 Дж. 5. $4,08 \cdot 10^{-3}$ кг·м²; $5,71 \cdot 10^{-3}$ кг·м².

Упр. 10. 1. $0,8\pi$ кг·м²/с. 2. $2,512$ Н·м.

3. 6 Н·м. 4. $2,8$ м/с²; 14 Н; $12,6$ Н.

5. 3 м/с².

Упр. 11. 1. 120 кг. 2. $0,1$ м от конца с большим

грузом. 3. $11,4$ см от конца стального

стержня. 4. $0,96$ м. 6. $x_c = -R/6$.

Упр. 12. 1. 1) устойчивое равновесие;

2) безразличное равновесие;

3) и 4) неустойчивое равновесие;

5) устойчивое равновесие;

6) неустойчивое равновесие; 7) без-

различное равновесие. 2. Бревно

принимает положение с минимальной

потенциальной энергией. 3. Раньше

начнет скользить.

Упр. 13. 1. 10 м/с. 2. 1470 м. 3. 5 м/с,

10 м/с. 4. 7000 Дж, -2100 Дж.

5. $-5,37 \cdot 10^{10}$ Дж; $2,68 \cdot 10^{10}$ Дж;

$-2,68 \cdot 10^{10}$ Дж. 6. $2,4$ см. 7. $\approx 11,2$ км/с.

Упр. 14. 1. $8,8$ м/с. 2. $\approx 1,55$ мН, 10^{32} Па.

3. $\approx 8,9$ м/с, $\approx 5,3$ Н.

Упр. 15. 1. $4,5$ м/с. 2. $4,33$ м/с. 3. $\approx 2,3$ л.

$$4. v = \sqrt{\frac{8Fd^4}{\pi \rho D^2(D^4 - d^4)}}.$$

Упр. 16. 1. $0,84$ см². 2. $0,28$ м. 3. $1,38$ м³.

4. В 3 раза. 5. $\approx 4,1$ м/с. 6. 2 Па·с.

Упр. 17. 1. Неон, $\approx 2 \cdot 10^{-2}$ кг/моль.

2. 316 молей. 3. $4,18 \cdot 10^{-9}$ м.

4. 105 молей. 5. 201 м/с.

Упр. 18. 1. 297 К, 300 К, 200 К, 373 К.

2. -269°C , -73°C , 167°C , 27°C .

3. 29°C , 27°C , 22°C . 4. 86°F , 77°F ,
 68°F .

Упр. 19. 1. $\approx 106,7$ кПа. 2. $16 \cdot 10^{-3}$ кг/моль.

3. $2 \cdot 10^6$ Па, $4 \cdot 10^{-3}$ кг/моль. 4. 500 К.

5. $2,4 \cdot 10^{25}$ м⁻³.

Упр. 20. 1. $286,4$ К. 2. $1,2$ моль. 3. $1,2$ кг/м³.

4. $9,03 \cdot 10^{25}$. 5. 100 кПа. 6. В 1,7 раза.

Упр. 21. 1. $0,7$ МПа. 2. 225 К. 3. 70 К.

4. 2,5. 5. 3.

Упр. 22. 1. Уменьшится на $15,58$ кДж.

2. $18,7$ кДж. 3. Нет, 900 Дж. 4. 5.

5. $245,3$ Дж/кг·К

Упр. 23. 1. $3,3$ МДж; $6,1$ МДж.

2. 6% . 3. $373,95$ кДж. 4. $0,49$ м³.

5. -400 Дж.

Упр. 24. 1. 20 Дж, 20% . 2. 10^2 кДж.

3. $\eta = 9,3\%$. 4. $38,7\%$; $2,7$.

5. 27% ; 274 кДж.

Упр. 25. 1. $82,8$ г/м³. 2. 2400 Па, ненасы-

щенный. 3. $53,6$ г/м³. 4. 50% . 5. 35% .

Упр. 26. 1. $1,6 \cdot 10^{-3}$ Н, в сторону масла.

2. 78 мН/м. 3. $1,6$ МДж.

4. 7 мм. 5. 22 мН/м.

Упр. 27. 1. $1,9$ кН. 2. $3,6 \cdot 10^5$ Па.

3. $F \geq 2,2 \cdot 10^2 \text{ Н}$; $\varepsilon \geq 10^{-3}$. 4. $4 \cdot 10^7 \text{ Па}$, $2 \cdot 10^{11} \text{ Па}$.
5. $2 \cdot 10^{-5} \text{ м}^2$; $2,4 \cdot 10^7 \text{ Па}$, выдержит.
- Упр. 28. 1. 540 мкН. 2. $\approx 10^{-8} \text{ Кл}$.
3. -5 мкКл ; -5 мкКл ; 22,5 Н.
4. $2,8 \cdot 10^{-8} \text{ Кл}$ под шариком,
 $-2,8 \cdot 10^{-8} \text{ Кл}$ над шариком. 5. 1,3 г.
- Упр. 29. 1. $1,76 \cdot 10^{12} \text{ м/с}^2$. 2. а) 576 кВ/м,
432 кВ/м. 3. Уменьшится на 3° .
4. $4 \cdot 10^{-6} \text{ В/м}$, $\approx 1,8 \cdot 10^{-15} \text{ Кл}$.
5. $1,2 \cdot 10^4 \text{ В/м}$.
- Упр. 30. 1. -9 нКл . 2. $E_A = 0$,
$$E_B = k \frac{\sigma \cdot 4\pi r^2}{R_B^2},$$

$$E_C = k \frac{\sigma \cdot 4\pi(r^2 + R^2)}{R_C^2}. 3. E(r) = 0$$

при $r < R$. $E(r) = k \frac{\sigma \cdot 4\pi R^2}{r^2}$ при
 $R < r < R_1$. $E(r) = 0$ при $R_1 < r < R_2$.
 $E(r) = k \frac{\sigma \cdot 4\pi R^2}{r^2}$ при $R_2 < r$.
4. $E(x) = \frac{\sigma}{\varepsilon_0}$ при $0 < x < d$. $E(x) = 0$
при $x < 0$, $x > d$.
5. $-1,77 \cdot 10^{-7} \text{ Кл/м}^2$. 6. $1,73 \cdot 10^{-6} \text{ Кл/м}^2$.
- Упр. 31. 1. $\approx 1,8 \cdot 10^{-6} \text{ Дж}$.
2. $A = \frac{aq}{4\pi\varepsilon_0} \left[\frac{q_1}{(d+l)(d+l+a)} + \frac{q_1}{l(l+a)} \right]$.
3. $\approx 1,73 \cdot 10^{-19} \text{ Кл}$. 4. 25 В.
5. $\approx 1,13 \cdot 10^{-4} \text{ Дж}$.
- Упр. 32. 1. 50 кВ/м. 2. $\approx 4 \cdot 10^{42}$.
3. $3 \cdot 10^{-5} \text{ Дж}$, $-3 \cdot 10^{-5} \text{ Дж}$, 6000 В.
4. $-0,126 \text{ мкДж}$.
- Упр. 33. 1. -4 нКл , 4 нКл , $E = 0$.
2. $\Delta F = \frac{2kq_1^2(2r_1 - 3l)r_1}{l^2(3l - 4r_1)^2}$.
3. 3,56 Н; 0,14 м. 5. $\rho = \frac{\rho_m \varepsilon}{\varepsilon - 1}$.
4. 0,27 м. 5. 8,84 мН.
- Упр. 34. 1. $5 \cdot 10^{-9} \text{ Кл}$. 2. 100 В.
3. 6 мкФ, 3 мкФ. 4. 165 В, 55 В.
5. $3,2 \cdot 10^{-5} \text{ Кл}$.
- Упр. 35. 1. 0,625 мкДж. 2. 10^{-8} Кл , $5 \cdot 10^{-6} \text{ Дж}$.
3. в 2 раза. 4. $\approx 220 \text{ мкДж}$.

5. 0,25 Дж, 500 В, 0.
- Упр. 36. 1. 0,17 А; 6 мин. 2. 10^9 А/м^2 ;
 $5 \cdot 10^5 \text{ А/м}^2$. 3. $5 \cdot 10^{-4} \text{ Ом} \cdot \text{м}$. 4. 2,5 Ом;
4 Ом; 6 Ом; 10 Ом; 13,5 Ом; 25 Ом;
26,7 Ом; 40 Ом. 5. 2,5 Ом.
- Упр. 37. 1. 0,3 А. 2. 0,1 А. 3. 9,7 В.
4. $\approx 0,1 \text{ Ом}$. 5. 2 А.
- Упр. 38. 1. 0,5 А; 3,5 В. 2. 3,5 А. 3. 0,47
А. 4. 2 В. 5. 1,2 А. 6. 14 В. 7. 0,2 А;
180 Дж; 168 Дж; 12 Дж.
- Упр. 39. 1. 13,5 Ом; 2. 6,7 Ом. 3. 0,25 Ом.
4. 1,4 А.
- Упр. 40. 1. $\approx 1680 \text{ Дж}$. 2. 3,18 мин.
3. Возрастет в $\approx 1,22$ раза. 4. 24,2 Ом.
5. 20 мин; 3,75 мин. 6. 4, последова-
тельно. 7. 60 %.
- Упр. 41. 1. $5,7 \cdot 10^{-11} \text{ кг} \cdot \text{м/с}$. 2. 0,82 мм/с.
3. 0,42 В/м. 4. $\approx 12,5$. 5. $0,0045 \text{ К}^{-1}$.
6. Уменьшается на 7,9 %.
- Упр. 42. 1. $6,7 \cdot 10^{-10}$. 2. $2,3 \cdot 10^{-7} \%$.
3. $9,6 \cdot 10^{-5} \%$. 4. Уменьшилось в 3 раза.
5. В 10 раз.
- Упр. 43. 1. 53,5 мг. 2. $2,35 \cdot 10^{21}$. 3. 4,1 кг.
4. $5,68 \cdot 10^{17}$. 5. 10 мин; 4,6 мкм.
- Упр. 44. 1. 4,15 В. 2. 80 нА. 3. 3 мВ/м.
4. 4 нс. 5. 3,2 кВ.
- Упр. 45. 1. Сложить бруски в виде буквы
Т, если магнит – это брусок, обра-
щенный концом к другому бруску, то
они притянутся, в противном случае
взаимодействия не будет. 2. $4 \cdot 10^{-5} \text{ Тл}$.
3. $\approx 1,67 \cdot 10^{-4} \text{ Тл}$. 4. $\approx 12 \text{ А}$.
- Упр. 46. 1. 0. 2. 98 А. 3. $F_1 = 0,148 \text{ Н}$;
 $F_2 = 0,048 \text{ Н}$. 4. 250 кА. 5. $\approx 277 \text{ мН} \cdot \text{м}$.
- Упр. 47. 1. $2 \cdot 10^{-8} \text{ Н}$. 2. $1,6 \cdot 10^{-15} \text{ Н}$;
0,569 мм. 3. $2,8 \cdot 10^4 \text{ с}^{-1}$. 4. $5 \cdot 10^{-17} \text{ Дж}$.
5. $1,04 \cdot 10^6 \text{ м/с}$.
- Упр. 48. 1. 2000, 1000. 2. Увеличится в
1,75. 3. 0.
- Упр. 49. 1. 5 м. 2. $-1,36 \text{ мВб}$; 0.
- Упр. 50. 1. $-0,25 \text{ Вб/с}$. 2. $3,14 \cdot 10^{-6} \text{ Кл}$.
3. 10 В. 4. а) от Д к С; б) от С к Д;
в) от Д к С; г) от С к Д. 5. 4 В.
- Упр. 51. 1. 16 Вб. 2. 0,04 В. 3. $1,5 \cdot 10^{-4} \text{ Вб}$.
4. 1,75 Ом. 5. 0,1 Вб.

Список использованной литературы

1. М. Балашов. Физика. Пробный учебник для 9 класса средней школы. – Москва: Просвещение, 1993.
2. А. А. Ванеев, Э.Д. Корж, В.П. Орехов. Преподавание физики в 9 классе. Москва: Просвещение, 1980.
3. А.А. Ванеев, З.Г. Дубицкая, Е.Ф. Ярунина. Преподавание физики в 10 классе средней школы. Москва: Просвещение, 1978.
4. В.С. Волькенштейн. Сборник задач по общему курсу физики – М.: Наука. Главная редакция физико-математической литературы, 1976. – 464 с.
5. В.И. Вертельник, Э.В. Позднеева и др. Физика. Тренинговые задания: в 2 ч. – Томск. Том. политехн. ун-т, 2006. – ч.1. – 170 с.
6. Р.И. Грабовский. Курс физики: Учебное пособие. 11-е изд., стер. – СПб.: Издательство «Лань», 2009. – 608 с.
7. Р.А. Гладкова, В.Е. Добронравов, Л.С. Жданов, Ф.С. Цодиков. Сборник задач и вопросов по физике для средних специальных учебных заведений. – изд. 2. исправл.: Наука, 1974.
8. В.Г. Зубов, В.П. Шальнов. Задачи по физике. – М.: Наука. Главная редакция физико-математической литературы, 1975. – 280 с.
9. И. К. Кикоин, А. К. Кикоин Физика. Учебник для 9 класса средней школы. – М.: Просвещение, 1992.
10. О.Ф. Кабардин. Физика: справ. материалы: Учеб. пособие для учащихся. – 3-е изд. – М.: Просвещение, 1991. – 367 с.
11. Методика факультативных занятий по физике: пособие для учителей О.Ф. Кабардин, С.И. Кабардина, В.А. Орлов и др. – :Просвещение, 1980. – 191 с.
12. Г. Я. Мякишев, Б. Б. Буховцев. Физика. Учебник для 11 класса общеобразовательных учреждений. – М.: Просвещение, 1995.
13. В.П. Орехов, А.В. Усова, И.К. Турышев и др. Методика преподавания физики в 8–10 классах средней школы. Москва: Просвещение, 1980.
14. А. Парфентьева. Задачи по физике. Для поступающих в вузы, – М.: Классикс Стиль, 2005. – 480 с.
15. Практикум по физике в средней школе: дидакт. материал/В.А. Буров, Ю.И. Дик, Б.С. Зворыкин и др. – М.: Просвещение, 1987.
16. А.П. Рымкевич, П.А. Рымкевич. Сборник задач по физике. – Москва: «Просвещение», 1984.
17. Сборник задач по физике: Для 10–11 кл. общеобразовательных учреждений/ Сост. Г.Н. Степанова – М.: Просвещение, 2001.
18. Сборник задач по физике 10–11 классы: пособие для учащихся общеобразоват. учреждений: базовый и профил. уровни/А. Парфентьева – 3-е изд. – М.: Просвещение, 2010. – 206 с.
19. Сборник задач по физике: Учебное пособие/Л.П. Баканина, В.Е Белонучкин, С.М. Козел, И.П. Мазанько: Под ред. С.М. Козела – М.: Наука. Главная редакция физико-математической литературы, 1983. – 288 с.
20. Л.В. Тарасов, А.Н. Тарасова. Вопросы и задачи по физике (Анализ характерных ошибок поступающих в вузы): Учебное пособие. – 4-е изд., стереотип. – Высш. шк., 1990. – 256 с.

21. В.М. Ударцева, В.Н. Федоров, Ш.М. Шуиншина. Физика. Учебная программа для 10–11 классов естественно-математического направления общеобразовательной школы. – Нур-Султан: НАО им. И.Алтынсарина, 2013. – 19 с.
22. Физика. Перевод с английского А.С. Ахматова и др. – Москва: Наука, 1965.
23. Физика: Механика: Учеб. Пособие для шк. И классов с углубл.изуч. физики/М. Балашов, А.И. Гомонова, А.Б. Долицкий и др.; Под ред. Г.Я. Мякишева – М.: Просвещение, 1995 – 480 с.
24. Физика: Учебник для 10 классов естественно-математического направления общеобразовательных школ/Б. Кронгарт, В. Кем, Н. Койшибаев – Алматы: Мектеп, 2006. – 352 с.
25. Физика в задачах для поступающих в вузы/В. Турчина– М.: ООО Издательство «Оникс»; ООО «Издательство «Мир и образование»», 2008. – 768 с.
26. Физический практикум для классов с углубленным изучением физики: Дидакт. материалы: 9–11 кл./Ю.И. Дик, О.Ф. Кабардин, В.А. Орлов и др.М.: Просвещение, 1993.
27. Шахмаев и др. Физика. Учебник для 11 класса средних школ. – М.: Просвещение, 1991.
28. Л. Эллиот, У. Уилкоккс. Физика. Перевод с английского под редакцией проф. А.И. Китайгородского. Москва, Главная редакция физико-математической литературы издательства Наука, 1975.
29. Элементарный учебник физики под ред. акад. Ландсберга, том I. – Издательство «Наука». Главная редакция физико-математической литературы. – Москва: 1975.
30. Элементарный учебник физики под ред. акад. Ландсберга, Т.2. Электричество и магнетизм. – 13-е изд.: ФИЗМАТЛИТ, 2004. – 480 с.
31. <http://fiz.1september.ru/>. Физика: еженедельник изд. дома «Первое сентября».
32. <http://class-fizika.narod.ru/>«Классная физика».

Список интернет-ресурсов

В учебнике использованы иллюстрации со следующих общедоступных ресурсов Интернета:

1. voxpopuli.kz
2. ethnosport.kz
3. popmech.ru
4. kazteleradio.kz
5. olympic.kz
6. kolpino.ru
7. liter.kz
8. naukatv.ru
9. aliexpress.com
10. tengrinews.kz
11. ukkz.com
12. saiman.kz
13. pinterest.com.au
14. ademi-ai.kz
15. paranormal-news.ru
16. thegolfclub.info
17. nutreaunnino.com
18. citytravel.livejournal.com
19. mirkosmosa.ru
20. informburo.kz
21. s-project.com.ua
22. neomagnet.by
23. labbox.ru
24. elektrik-a.su

Содержание

Предисловие	4
РАЗДЕЛ 1. МЕХАНИКА	5
Глава 1. Кинематика	5
§ 1. Роль физики в современном мире	6
§ 2. Погрешности физических величин. Обработка результатов измерений	10
§ 3. Основные понятия и уравнения кинематики равноускоренного движения тела	15
§ 4. Инвариантные и относительные физические величины. Принцип относительности Галилея	21
§ 5. Кинематика криволинейного движения	26
§ 6. Движение тела, брошенного под углом к горизонту	31
Итоги главы 1	36
Глава 2. Динамика	37
§ 7. Силы. Сложение сил. Законы Ньютона	38
§ 8. Закон всемирного тяготения	43
§ 9. Момент инерции абсолютно твердого тела	48
§ 10. Момент импульса. Закон сохранения момента импульса и его связь со свойствами пространства. Основное уравнение динамики вращательного движения	53
Итоги главы 2	58
Глава 3. Статика	59
§ 11. Центр масс	60
§ 12. Виды равновесия	66
Итоги главы 3	70
Глава 4. Законы сохранения	71
§ 13. Законы сохранения импульса и механической энергии, их связь со свойствами пространства и времени	72
Итоги главы 4	78
Глава 5. Механика жидкостей и газов	79
§ 14. Гидродинамика. Ламинарное и турбулентное течения жидкостей и газов	80
§ 15. Уравнение неразрывности. Уравнение Бернулли. Подъемная сила	84
§ 16. Течение вязкой жидкости. Формула Стокса. Обтекание тел	89
Итоги главы 5	94
РАЗДЕЛ 2. ТЕПЛОВАЯ ФИЗИКА	95
Глава 6. Основы молекулярно-кинетической теории газов	95
§ 17. Основные положения МКТ газов и ее опытное обоснование	96
§ 18. Термодинамические системы и термодинамические параметры. Равновесное и неравновесное состояния термодинамических систем. Температура как мера средней кинетической энергии теплового движения частиц вещества	101

§ 19. Идеальный газ.	
Основное уравнение молекулярно-кинетической теории газов	106
Итоги главы 6	111
Глава 7. Газовые законы	113
§ 20. Уравнение состояния идеального газа	114
§ 21. Изопроцессы. Графики изопроцессов. Закон Дальтона	118
Итоги главы 7	123
Глава 8. Основы термодинамики	125
§ 22. Внутренняя энергия идеального газа.	
Термодинамическая работа. Количество теплоты, теплоемкость	126
§ 23. Первый закон термодинамики. Применение первого закона	
термодинамики к изопроцессам. Адиабатный процесс, уравнение Пуассона	131
§ 24. Обратимые и необратимые процессы. Энтропия.	
Второй закон термодинамики.	
Круговые процессы и их коэффициент полезного действия, цикл Карно	136
Итоги главы 8	141
Глава 9. Жидкие и твердые тела	143
§ 25. Насыщенный и ненасыщенный пар, влажность воздуха.	
Фазовые диаграммы, тройная точка, критическое состояние вещества	144
§ 26. Свойства поверхностного слоя жидкости.	
Смачивание, капиллярные явления	150
§ 27. Кристаллические и аморфные тела.	
Механические свойства твердых тел	155
Итоги главы 9	160
РАЗДЕЛ 3. ЭЛЕКТРИЧЕСТВО И МАГНЕТИЗМ	163
Глава 10. Электростатика	163
§ 28. Электрический заряд. Поверхностная и объемная плотность заряда.	
Закон сохранения заряда. Закон Кулона	164
§ 29. Электрическое поле. Однородное и неоднородное электрическое поле.	
Напряженность электрического поля.	
Принцип суперпозиции электростатических полей	169
§ 30. Поток вектора напряженности электрического поля. Теорема Гаусса	174
§ 31. Работа электрического поля по перемещению заряда.	
Потенциал, разность потенциалов электрического поля	179
§ 32. Эквипотенциальные поверхности. Связь между напряженностью	
и разностью потенциалов для однородных электрических полей	184
§ 33. Проводники и диэлектрики в электрическом поле	188
§ 34. Емкость. Конденсаторы. Соединение конденсаторов	193
§ 35. Энергия электрического поля	198
Итоги главы 10	202
Глава 11. Постоянный ток	205
§ 36. Электрический ток. Закон Ома для участка цепи.	
Смешанное соединение проводников	206

§ 37. Электродвижущая сила и внутреннее сопротивление источника тока.....	210
§ 38. Закон Ома для полной цепи	214
§ 39. Законы Кирхгофа.....	218
§ 40. Работа и мощность электрического тока. Закон Джоуля – Ленца. Коэффициент полезного действия источника тока	223
Итоги главы 11.....	227
Глава 12. Электрический ток в различных средах	229
§ 41. Электрический ток в металлах. Сверхпроводимость.....	230
§ 42. Электрический ток в полупроводниках. Полупроводниковые приборы	235
§ 43. Электрический ток в растворах и расплавах электролитов. Законы электролиза.....	241
§ 44. Электрический ток в газах. Электрический ток в вакууме. Электронно-лучевая трубка.....	246
Итоги главы 12	253
Глава 13. Магнитное поле	255
§ 45. Взаимодействие проводников с током, опыты Ампера. Вектор магнитной индукции. Индукция магнитного поля бесконечно прямого и кругового проводников с током. Правило буравчика.....	256
§ 46. Сила Ампера. Правило левой руки	262
§ 47. Сила Лоренца. Движение заряженной частицы в магнитном поле	268
§ 48. Магнитные свойства вещества. Температура Кюри	275
Итоги главы 13	279
Глава 14. Электромагнитная индукция	281
§ 49. Работа силы Ампера. Магнитный поток. Явление электромагнитной индукции.....	282
§ 50. Закон электромагнитной индукции. Правило Ленца	287
§ 51. Явление самоиндукции. Индуктивность. Энергия магнитного поля	293
§ 52. Электродвигатель и электрогенератор постоянного тока	298
Итоги главы 14	302
Приложения. Лабораторные работы и таблицы.....	303
Приложение 1. Лабораторные работы	304
Лабораторная работа № 1 Определение ускорения тела, движущегося по наклонному желобу	304
Лабораторная работа № 2 Исследование зависимости дальности полета тела от угла бросания.....	305
Лабораторная работа № 3. Изучение движения тела, скатывающегося по наклонному желобу.....	306
Лабораторная работа № 4. Сложение сил, направленных под углом друг к другу.....	308
Лабораторная работа № 5. Исследование зависимости скорости шарика от его радиуса при движении в вязкой жидкости.....	309
Лабораторная работа № 6. Изучение смешанного соединения проводников	310

Лабораторная работа № 7.	
Определение ЭДС и внутреннего сопротивления источника тока	312
Лабораторная работа № 8.	
Вольт-амперная характеристика лампы накаливания, резистора и полупроводникового диода	313
Лабораторная работа № 9.	
Измерение электрического заряда одновалентного иона.....	315
Приложение 2. Приложение 3. Таблицы физических величин	317
Предметно-именной указатель	324
Ответы к упражнениям.....	326
Список использованной литературы	328
Список интернет-ресурсов	330

Учебное издание

Назифа Анваровна Закирова
Руслан Рауфович Аширов

ФИЗИКА

Учебник для 10 класса
естественно-математического направления
общеобразовательной школы

Художники Е. Ермилова, А. Айтжанов

Главный редактор К. Караева

Методист-редактор Б. Бекетауов

Редакторы Б. Масакбаева, Г. Маликова, А. Бекболатова

Технический редактор В. Бондарев

Художественный редактор Е. Мельникова

Бильд-редактор Ш. Есенкулова

Художник-оформитель О. Подопригора

Дизайн обложки В. Бондарев, О. Подопригора

Верстка Л. Костина, С. Сулейменова, Г. Илишева,

Т. Макарова, А. Кейикбойва, Н. Нержанова



Внимание

При необходимости вы всегда сможете найти содержание CD с электронным приложением на сайте *arman-pv.kz* и загрузить его на свой компьютер для дальнейшей работы

По вопросам приобретения обращайтесь по следующим адресам:

г. Нур-Султан, м-н 4, д. 2, кв. 55.

Тел.: 8 (7172) 92-50-50, 92-50-54. E-mail: astana@arman-pv.kz

г. Алматы, м-н Аксай 1А, д. 28Б.

Тел./факс: 8 (727) 316-06-30, 316-06-31. E-mail: info@arman-pv.kz

Книжный магазин «Арман-ПВ»

г. Алматы, ул. Алтынсарина, д. 87. Тел.: 8 (727) 303-94-43.

Сдано в набор 10.08.18. Подписано в печать 04.07.19. Формат 70х100 $\frac{1}{16}$. Бумага офсетная. Гарнитура «Times New Roman». Печать офсетная. Объем 27,09 усл. печ. л. Тираж 30500 экз.

Артикул 810-008-002p-19