



# 10



Л. Э. Генденштейн  
А. А. Булатова  
И. Н. Корнильев  
А. В. Кошкина

# Ф И З И К А

2

БАЗОВЫЙ И УГЛУБЛЕННЫЙ УРОВНИ



ИЗДАТЕЛЬСТВО

**БИНОМ**

Л. Э. Генденштейн,  
А. А. Булатова, И. Н. Корнильев, А. В. Кошкина

# ФИЗИКА

10 класс

Базовый и углубленный уровни

Часть 2

Под редакцией В. А. Орлова



Москва  
БИНОМ. Лаборатория знаний  
2017

УДК 373.167.1:53  
ББК 22.3я721  
Г34

Авторы:

Л. Э. Генденштейн, А. А. Булатова, И. Н. Корнильев,  
А. В. Кошкина, под ред. В. А. Орлова

**Генденштейн Л. Э.**

Г34 **Физика. 10 класс. Базовый и углублённый уровни :**  
в 2 ч. Ч. 2 / Л. Э. Генденштейн, А. А. Булатова и др. ;  
под ред. В. А. Орлова. — М. : БИНОМ. Лаборатория зна-  
ний, 2017. — 240 с. : ил.

ISBN 978-5-9963-3064-5 (Ч. 2)

ISBN 978-5-9963-3065-2

Линия учебных изданий для среднего общего образования ориентирована на обучение решению задач. Параграфы представляют собой канву сценариев уроков, реализующих системно-деятельностный подход к обучению: тщательно подобранные задания погружены непосредственно в теорию. В 10-м классе изложены темы: кинематика, динамика, законы сохранения в механике, статика и гидростатика, молекулярная физика и термодинамика, электростатика и постоянный электрический ток; в 11-м классе — электродинамика, колебания и волны, оптика, элементы теории относительности, квантовая физика, строение Вселенной. Материал для углублённого изучения отмечен звёздочкой. Имеются задания для проектно-исследовательской деятельности.

Соответствуют федеральному государственному образовательному стандарту среднего общего образования и примерной основной образовательной программе среднего общего образования.

Предназначены для всех наименований образовательных организаций: школ, лицеев, гимназий, центров образования и пр.

УДК 373.167.1:53

ББК 22.3я721

---

*Учебное издание*

**Генденштейн Лев Элевич,**  
**Булатова Альбина Александровна и др. ;**  
под редакцией **В. А. Орлова**

**ФИЗИКА**

**10 класс**

**Базовый и углублённый уровни**

**В 2 частях**

**Часть 2**

Редактор *Г. Ершова*. Методист *Н. Лукиенко*  
Оформление *Н. Новак*. Художник *Ю. Корчмарь*  
Технический редактор *Е. Денюкова*. Корректор *И. Копылова*  
Компьютерная вёрстка *А. Борисенко*

Подписано в печать 20.02.17. Формат 70×100/16. Усл. печ. л. 19,5.  
Тираж 3000 экз. Заказ № 40047.

ООО «БИНОМ. Лаборатория знаний»

127473, Москва, ул. Краснопролетарская, д. 16, стр. 1,  
тел. (495)181-53-44, e-mail: binom@lbz.ru, http://lbz.ru, http://metodist.lbz.ru

Отпечатано в соответствии с качеством предоставленных издательством  
электронных носителей в АО «Саратовский полиграфкомбинат».

410004, г. Саратов, ул. Чернышевского, 59. www.sarpk.ru

---

ISBN 978-5-9963-3064-5 (Ч. 2)  
ISBN 978-5-9963-3065-2

© ООО «БИНОМ. Лаборатория знаний»,  
2016

# МОЛЕКУЛЯРНАЯ ФИЗИКА И ТЕРМОДИНАМИКА

## **Предмет и задачи молекулярно-кинетической теории и термодинамики**

Основная задача молекулярно-кинетической теории состоит в том, чтобы объяснить свойства вещества исходя из представлений о движении и взаимодействии атомов и молекул.

Термодинамика изучает превращения энергии в тепловых явлениях. Законы термодинамики используются в различных областях науки и техники, например при создании тепловых двигателей.



# Глава V. МОЛЕКУЛЯРНАЯ ФИЗИКА

## § 25. Строение вещества

### 1. Основные положения молекулярно-кинетической теории

- 1) Вещество состоит из атомов и молекул<sup>1)</sup>.
- 2) Атомы и молекулы находятся в непрерывном хаотическом движении.
- 3) Атомы и молекулы взаимодействуют друг с другом.

Молекулярно-кинетическую теорию разрабатывали учёные разных стран, в особенности — русский учёный Михаил Васильевич Ломоносов, английские учёные Дж. Дальтон и Дж. Максвелл, немецкий учёный Р. Клаузиус и австрийский учёный Л. Больцман.



М. В. Ломоносов  
(1711—1765)

### Опытные подтверждения молекулярно-кинетической теории

#### Броуновское движение

Английский ботаник Р. Броун, наблюдая в микроскоп крошечные частицы пыльцы, взвешенные в жидкости, обнаружил, что они находятся в непрерывном хаотическом движении. На рисунке 25.1 соединены отрезками положения одной частицы с интервалом 1 мин: в результате получилась запутанная ломаная линия.

Учёные доказали, что это движение частиц, названное «броуновским», обусловлено ударами движущихся молекул воды. Теорию броуновского движения построили выдающийся физик 20-го века А. Эйнштейн<sup>2)</sup> и польский физик М. Смолуховский.

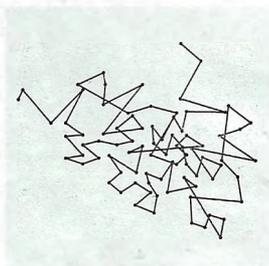


Рис. 25.1

- 1) Молекула может состоять и из одного атома: таковы, например, молекулы инертных газов.
- 2) А. Эйнштейн жил и работал в Швейцарии, Германии и США.

- ° 1. Какое положение (или положения) молекулярно-кинетической теории подтверждает броуновское движение?



### Диффузия

#### Поставим опыт



Если осторожно налить поверх раствора медного купороса чистую воду, то граница между ними поначалу будет довольно резкой (рис. 25.2, а). Но со временем она начнёт размываться (рис. 25.2, б), и через несколько дней окраска всей жидкости в сосуде станет однородной (рис. 25.2, в).

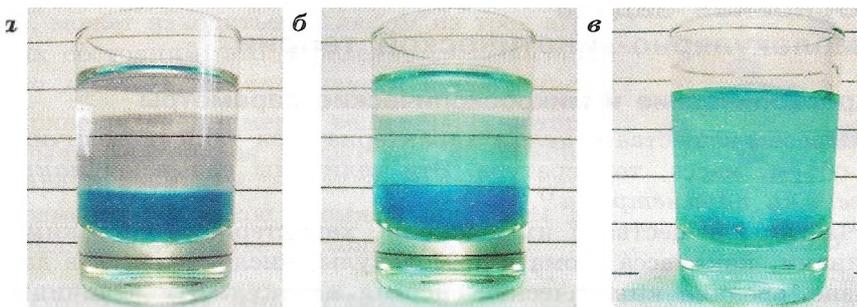


Рис. 25.2

Объяснение этого опыта состоит во *взаимном проникновении частиц одного вещества между частицами другого*. Это явление называют *диффузией*<sup>1)</sup>.

- ° 2. Какое положение (или положения) молекулярно-кинетической теории подтверждает диффузия?
- ° 3. опыты показывают, что диффузия происходит в газах, жидкостях и даже твёрдых телах. Как вы думаете: где она происходит быстрее всего, а где — медленнее всего? Обоснуйте свой ответ.



### Слипание свинцовых цилиндров

#### Поставим опыт



Зачистим торцы двух свинцовых цилиндров и сильно прижмём их друг к другу. Цилиндры слипнутся так прочно, что будут выдерживать вес килограммовой гири (рис. 25.3).



Рис. 25.3

<sup>1)</sup> От латинского «диффузио» — распространение, растекание.



- ° 4. Какое положение молекулярно-кинетической теории подтверждает описанный опыт? Какие ещё повседневные наблюдения подтверждают это положение молекулярно-кинетической теории?

Молекулы притягиваются на расстояниях, которые превышают размеры самих молекул, но отталкиваются на расстояниях, близких к размеру молекул: именно этим отталкиванием и определяются размеры молекул.

- ° 5. Какие наблюдения указывают на то, что молекулы не только притягиваются, но и отталкиваются?

## 2. Основная задача молекулярно-кинетической теории

### Макроскопические и микроскопические параметры

Образец вещества *в целом* характеризуется такими величинами, как объём, масса, температура. Эти величины называют *макроскопическими параметрами*<sup>1)</sup>.

Частицы вещества и их движение характеризуются такими величинами, как масса атома или молекулы, число молекул в данном образце, средняя кинетическая энергия молекул. Эти величины называют *микроскопическими параметрами*<sup>2)</sup>.

Основная задача молекулярно-кинетической теории состоит в том, чтобы найти соотношения между макроскопическими и микроскопическими параметрами и объяснить свойства вещества, исходя из представлений о движении и взаимодействии частиц вещества (атомов и молекул).

В одном из следующих параграфов мы найдём, например, как выражается давление газа через число молекул в единице объёма и среднюю кинетическую энергию молекул.

## 3. Агрегатные состояния вещества

Вы уже знаете из курса физики основной школы, что существуют три *агрегатных состояния* вещества: твёрдое, жидкое и газообразное.

В кристаллических твёрдых телах атомы или молекулы расположены вплотную и упорядоченно, образуя *кристаллическую решётку*, модель которой изображена на рисунке 25.4. Примерами кристаллических твёрдых тел являются поваренная соль, сахар, металлы.

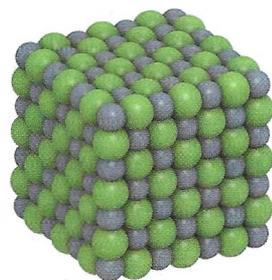


Рис. 25.4

1) От греческого слова «макро» — большой.

2) От греческого слова «микро» — малый.

В аморфных<sup>1)</sup> твёрдых телах и жидкостях атомы или молекулы тоже расположены вплотную друг к другу, но неупорядоченно (рис. 25.5). Примерами аморфных твёрдых тел являются смола и стекло, а примеры жидкостей вы можете привести сами.

В газах молекулы находятся на сравнительно больших расстояниях друг от друга — они в несколько раз превышают размеры самих молекул (рис. 25.6).

Вещество, состоящее из одних и тех же молекул, может находиться в *любом* из трёх агрегатных состояний: это определяется *свойствами его молекул, температурой и давлением*.

° 6. Приведите пример вещества, которое обычно находится вокруг нас по крайней мере в двух агрегатных состояниях одновременно. В какое время года к ним добавляется и третье состояние?

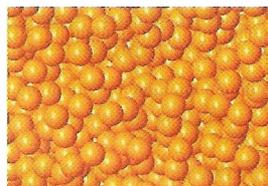


Рис. 25.5

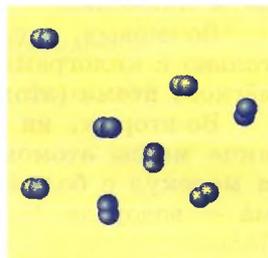


Рис. 25.6

## 4. Количество вещества

### Закон Авогадро

В 19-м веке итальянский учёный А. Авогадро, исследуя химические реакции между газами, установил, что

в равных объёмах различных газов при одинаковых температурах и давлениях содержится *одинаковое число молекул*.

Это утверждение назвали *законом Авогадро*. Из него следует, что важнейшей характеристикой образца вещества является *число молекул*. Поэтому ввели новую физическую величину, которая характеризует число молекул.

### Моль

*Число молекул* в образце вещества характеризуется *количеством вещества* и обозначается<sup>2)</sup> *ν*. *Единицей количества вещества* в СИ является *моль*. В одном моле *любого* вещества содержится *одно и то же* число молекул, которое приняли равным числу атомов в 12 г углерода.

Скоро мы выясним, почему учёные выбрали такое произвольное на первый взгляд определение моля.

1) От греческого «аморфос» — не имеющий формы.

2) Эта греческая буква читается «ню».



- ° 7. Сравните число молекул в трёх молях водорода и в одном моле кислорода.
- ° 8. Сколько молей водорода и кислорода нужно взять для того, чтобы в результате реакции между ними получить два моля воды?

### Атомная единица массы

Массы атомов и молекул можно, конечно, выражать в единицах массы в СИ, то есть в килограммах. Но это неудобно по следующим двум причинам.

Во-первых, массы атомов и молекул очень малы по сравнению не только с килограммом, но даже с граммом: например, масса самого лёгкого атома (атома водорода) равна  $1,67 \cdot 10^{-24}$  г.

Во-вторых, на мысль о том, что существует естественная единица массы атомов и молекул, наводит то, что массы всех атомов и молекул с большой точностью *кратны* массе самого лёгкого атома — водорода. Например, масса атома углерода примерно в 12 раз больше массы атома водорода.



9. Где в этом параграфе встречалось ранее число 12? На какую мысль наводит это «совпадение»?

Исходя из указанных причин, удобно было бы выбрать в качестве единицы массы для атомов и молекул массу атома водорода. Примерно так и сделали, но с небольшим изменением:

*атомной единицей массы* (сокращенно а. е. м.) называют  $1/12$  массы атома углерода:

$$1 \text{ а. е. м.} = \frac{\text{масса атома углерода}}{12} = 1,66 \cdot 10^{-24} \text{ г.}$$



10. Выразите массу атома водорода в атомных единицах массы. Какой вывод можно сделать из этого сравнения?

То, что в качестве «эталоны» при определении атомной единицы массы взяли не массу атома водорода, а очень близкую к ней величину —  $1/12$  часть массы атома углерода, объясняется только тем, что такую единицу массы легче воспроизвести, поскольку углерод входит в очень большое число химических соединений.

### Число молекул в одном моле

Мы уже знаем, что в одном моле вещества содержится столько же молекул, сколько атомов в 12 г углерода. Значит, число молекул в одном моле равно отношению массы одного моля углерода (12 г) к массе одного атома углерода (12 а. е. м.).

Отсюда следует, что *число молекул в одном моле равно отношению одного грамма к одной атомной единице массы.*

Найдём это отношение:

$$\frac{1 \text{ г}}{1 \text{ а. е. м.}} = \frac{1 \text{ г}}{1,66 \cdot 10^{-24} \text{ г}} = 6 \cdot 10^{23}.$$

Число молекул в одном моле называют *постоянной Авогадро* и обозначают  $N_A$ :

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

Обратите внимание: постоянная Авогадро выражается в  $\frac{1}{\text{моль}}$ . Поэтому число  $N$  молекул в образце выражается формулой

$$N = \nu N_A,$$

где  $\nu$  — количество вещества, выражаемое в *молях*.

°11. Чему равно число молекул, содержащихся:

- в трёх молях воды;
- в пяти молях водорода;
- в 0,1 моля углекислого газа?

Чему равно число *атомов* в приведённых выше примерах?

°12. Имеется несколько образцов вещества, число молекул в которых равно соответственно  $6 \cdot 10^{24}$ ;  $3 \cdot 10^{22}$ ;  $3,3 \cdot 10^{24}$  и  $6 \cdot 10^{20}$ . Чему равно количество вещества в каждом образце?

### Относительная атомная и молекулярная масса

Массу атома, выраженную в атомных единицах массы, называют *относительной атомной массой*.

°13. Чему равна относительная атомная масса водорода? углерода?

Относительные атомные массы можно найти с помощью Периодической системы химических элементов (таблицы Менделеева). Приведённые в ней значения относительных атомных масс химических элементов обычно округляют до целого числа.

°14. Используя таблицу Менделеева, найдите и запишите в тетради химические элементы, относительные атомные массы которых отличаются: а) в 2 раза; б) в 4 раза; в) в 5 раз; г) в 10 раз.

Массу молекулы, выраженную в атомных единицах массы, называют *относительной молекулярной массой*.

Чтобы найти значение относительной молекулярной массы заданного вещества, надо знать состав молекулы этого вещества и относительные атомные массы атомов, входящих в эту молекулу.

- °15. Чему равна относительная молекулярная масса: а) воды; б) водорода; в) кислорода; г) гелия; д) углекислого газа?

## 5. Молярная масса

Массу одного моля вещества называют *молярной массой* и обозначают  $M$ .

*Единицей молярной массы* в СИ является  $\frac{\text{кг}}{\text{моль}}$ .

- °16. Выразите массу образца  $m$  через молярную массу  $M$  вещества, из которого состоит образец, и количество вещества  $\nu$  в этом образце.
17. Докажите, что *масса одного моля вещества, выраженная в граммах, равна относительной молекулярной массе*.
- °18. Чему равна молярная масса: а) воды; б) водорода; в) кислорода; г) гелия; д) углекислого газа?

## \*6. Решение более сложных задач

### Испарение воды и капельки тумана

- °19. Цилиндрический стакан высотой 10 см и диаметром 6 см наполнили водой. Вода полностью испарилась за 20 дней.
- Какой объём воды испарялся за день?
  - Какой объём воды испарялся каждую секунду?
  - Какая масса воды испарялась каждую секунду?
  - Сколько молекул воды испарялось каждую секунду?
  - Сколько молекул воды вылетало каждую секунду с каждого квадратного миллиметра поверхности?
  - Во сколько раз это число больше числа жителей Земли (данные о числе жителей Земли можно найти в Интернете)?

### Похожая задача

- °20. Чему равно число молекул воды в капельке тумана радиусом 1 мкм?

### Чайная ложка соли в озере

- °21. В совершенно пресное озеро бросили чайную ложку соли (5 г). Площадь поверхности озера равна  $1 \text{ км}^2$ , а его средняя глубина равна 3 м. Через достаточно большое время ионы натрия и хлора распределились в озере равномерно.
- Сколько молей поваренной соли было в ложке?
  - Сколько атомов натрия и хлора было в соли, содержащейся в чайной ложке?

- в) Чему равен объём воды в озере?  
 г) Сколько ионов натрия и хлора содержится в каждом кубическом метре воды в озере?  
 д) Сколько ионов натрия и хлора содержится в напёрстке воды, взятой из озера? Объём напёрстка равен 2 мл.

### Похожая задача

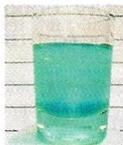
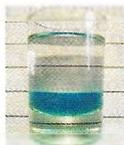
22. Оцените, чего больше — молекул воды в столовой ложке воды или столовых ложек воды в Мировом океане? Во сколько раз больше? Для оценки примите, что в одной столовой ложке содержится 20 мл воды, океаны занимают 70 % поверхности Земли, а средняя глубина океанов составляет 3,7 км.

### ЧТО МЫ УЗНАЛИ

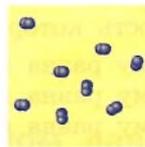
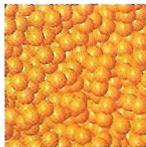
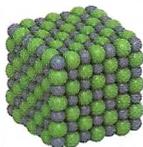
#### Основные положения молекулярно-кинетической теории

- вещество состоит из атомов и молекул;
- атомы и молекулы движутся непрерывно и хаотично;
- атомы и молекулы взаимодействуют друг с другом.

Опытные подтверждения:



#### Агрегатные состояния вещества



$$1 \text{ а. е. м.} = \frac{\text{масса атома углерода}}{12}$$

$$\text{Постоянная Авогадро} \\ N_A = 6 \cdot 10^{23} \frac{1}{\text{моль}}$$

В одном моле любого вещества  $6 \cdot 10^{23}$  молекул.

Молярная масса — масса одного моля.

$$N = \nu N_A \quad m = \nu M$$

**? ДОПОЛНИТЕЛЬНЫЕ ВОПРОСЫ И ЗАДАНИЯ****Базовый уровень**

23. Сравните диффузию и броуновское движение: что у них общего и чем они отличаются друг от друга?
24. Можно ли беспорядочное движение пылинок в воздухе считать броуновским движением? Обоснуйте свой ответ.
25. Найдём некоторые соотношения между макроскопическими и микроскопическими параметрами. Как связаны между собой:
- число молекул  $N$  в образце вещества массой  $m$  с массой одной молекулы  $m_0$ ;
  - число молекул  $N$  в образце вещества объёмом  $V$  с размером одной молекулы  $d$ ? Примите для оценки, что объём молекулы равен объёму куба с ребром  $d$ .
26. Перечислите основные свойства твёрдых тел, жидкостей и газов. Приведите несколько примеров таких тел.
27. Чему равна молярная масса: а) серной кислоты ( $\text{H}_2\text{SO}_4$ ); б) азота; в) поваренной соли ( $\text{NaCl}$ )?
28. Как связаны между собой масса молекулы вещества  $m_0$ , молярная масса  $M$  и постоянная Авогадро  $N_A$ ?
29. Чему равна масса:
- 10 моль азота;
  - $6 \cdot 10^{24}$  молекул кислорода;
  - атома кремния?
30. В закрытом сосуде объёмом 10 л содержится аммиак ( $\text{NH}_3$ ), плотность которого равна  $0,8 \text{ кг/м}^3$ .
- Чему равна молярная масса аммиака?
  - Чему равна масса одной молекулы аммиака?
  - Чему равна масса аммиака, содержащегося в сосуде?
  - Какое число молекул аммиака содержится в сосуде?

**Повышенный уровень**

31. Капля масла массой  $0,06 \text{ мг}$  растекается по поверхности воды ровным слоем. Чему равна максимальная площадь масляного пятна, если плотность масла  $920 \text{ кг/м}^3$ , а диаметр одной молекулы масла составляет  $3,3 \text{ нм}$ ?
32. Сколько молей вещества содержится:
- в ведре воды объёмом  $10 \text{ л}$ ;
  - в баллоне, содержащем  $8 \text{ кг}$  кислорода;

- в) в кристалле поваренной соли кубической формы, если плотность соли равна  $2100 \text{ кг/м}^3$ , а длина ребра куба составляет  $2 \text{ см}$ ?
33. Сравните число молекул, содержащихся в  $28 \text{ г}$  азота и  $44 \text{ г}$  углекислого газа. Сравните число содержащихся в этих газах атомов.
34. На столе лежат алюминиевый и медный шары. Сравните количество атомов, содержащихся в шарах, если:
- шары имеют равные массы;
  - шары имеют равные объёмы.

### Высокий уровень

35. В наполненном пресной водой бассейне длиной  $25 \text{ м}$ , шириной  $10 \text{ м}$  и глубиной  $2 \text{ м}$  растворили кристаллик соли массой  $0,1 \text{ г}$ . Сколько ионов натрия окажется в стакане воды объёмом  $200 \text{ мл}$ , которую зачерпнули из бассейна спустя длительное время?
36. Вода объёмом  $200 \text{ мл}$  за  $10$  суток полностью испарилась. Какое число молекул ежесекундно вылетало с поверхности воды при её испарении? Оцените, во сколько раз это число больше числа жителей Земли.
37. Оцените, сквозь какое число слоёв атомов золота пролетает альфа-частица в опыте Резерфорда, «пробивая» золотую фольгу толщиной  $0,1 \text{ мкм}$ . Плотность золота равна  $19\,300 \text{ кг/м}^3$ . Помните ли вы, какое открытие сделал Резерфорд в этом опыте?

## § 26. Изопроцессы

### 1. Изобарный процесс (при постоянном давлении)

Процессы с данной массой газа, в которых один из его параметров: давление, объём или температура — *не изменяется*, называют *изопроцессами*<sup>1)</sup>.

Рассмотрим сначала процесс, который происходит при *постоянном давлении*. Его называют *изобарным*<sup>2)</sup>.

1) От греческого слова «изос» — равный.

2) От греческих слов «изос» и «барос» — тяжесть.



### Поставим опыт

На рисунке 26.1 показано, как можно определить на опыте зависимость объёма газа от температуры *при постоянном давлении*: газ под поршнем расширяется при нагревании.

По шкале измеряют объём газа в цилиндре, а термометром измеряют температуру газа. Опыт показывает, что графиком зависимости объёма газа от температуры в изобарном процессе является *отрезок прямой* (рис. 26.2).

Продлив график в сторону *отрицательных* температур, мы увидим, что если бы эта зависимость объёма от температуры сохранялась, то объём газа обратился бы в *нуль* при  $t = -273\text{ }^{\circ}\text{C}$ . Но на самом деле при достаточно сильном охлаждении газ превращается сначала в жидкость, а потом — в твёрдое тело. Поэтому участок графика в области низких температур намечен пунктиром.

**Абсолютная шкала температур.** опыты и теоретические исследования показывают, что температура  $-273\text{ }^{\circ}\text{C}$  является *наинизшей* возможной температурой. Поэтому английский учёный У. Томсон предложил принять эту температуру за *нуль* по шкале температур, которую назвали *шкалой Кельвина*<sup>1)</sup>, или *абсолютной шкалой температур*. Температуру, заданную по этой шкале, называют *абсолютной температурой* и обозначают *большой буквой T*.

*Изменение* температуры на один градус по шкале Кельвина равно *изменению* температуры на один градус по шкале Цельсия.

*Единицей абсолютной температуры* является *кельвин (К)*.

- ° 1. Выведите и запишите соотношение между значением температуры  $t$  по шкале Цельсия и значением температуры  $T$  по шкале Кельвина.
- ° 2. Чему равны по шкале Кельвина: а) температура таяния льда; б) температура кипения воды при нормальном атмосферном давлении?

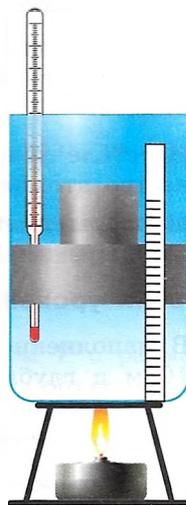


Рис. 26.1

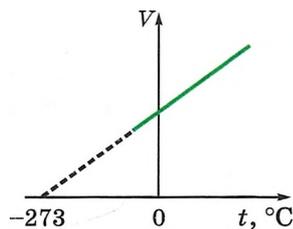


Рис. 26.2



<sup>1)</sup> У. Томсон за научные достижения получил титул лорда Кельвина.

- ° 3. Температура тела увеличилась на  $10\text{ }^\circ\text{C}$ . Какому изменению температуры по шкале Кельвина это соответствует?

При рассмотрении газовых процессов мы будем использовать главным образом *абсолютную* температуру. Но будьте внимательны: если в описании ситуации или в условии задачи значения температуры заданы по шкале Цельсия, надо первым делом перевести их в значения по шкале Кельвина!

- ° 4. Газ находится при  $0\text{ }^\circ\text{C}$ . Какой станет его абсолютная температура, если увеличить её в 2 раза?

Чтобы получить график зависимости объёма газа  $V$  от его *абсолютной* температуры  $T$ , надо просто сдвинуть шкалу температур на рисунке 26.2 на  $273$  градуса влево. Мы получим график, показанный на рисунке 26.3.

Мы видим, что *при постоянном давлении объём данной массы газа прямо пропорционален абсолютной температуре*. Это означает, что

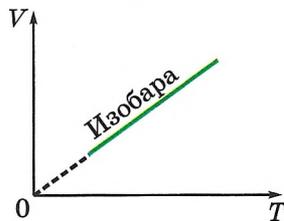


Рис. 26.3

при *изобарном* процессе отношение объёма данной массы газа к его абсолютной температуре остаётся постоянным:

$$\frac{V}{T} = \text{const при } p = \text{const}.$$

Это соотношение называют *законом Гей-Люссака* в честь французского учёного Ж. Гей-Люссака, который одним из первых изучал изобарный процесс. График зависимости  $V$  от  $T$  при постоянном давлении называют *изобарой*.

- ° 5. Докажите, что значения объёма и абсолютной температуры данной массы газа в двух состояниях 1 и 2 *при одном и том же давлении* связаны соотношением

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

- ° 6. Как изменяется объём данной массы газа при увеличении его абсолютной температуры в 3 раза, если давление газа не изменяется?

7. Данная масса газа расширяется изобарно. Начальная и конечная температура газа  $27\text{ }^\circ\text{C}$  и  $327\text{ }^\circ\text{C}$ . Изобразите в тетради графики зависимости  $V(T)$ ,  $p(V)$  и  $p(T)$  для данного процесса, поставьте два вопроса по этой ситуации и найдите ответы на них.

## 2. Изохорный процесс (при постоянном объёме)

Процесс, происходящий с данной массой газа при постоянном объёме, называют *изохорным*<sup>1)</sup>.

### Поставим опыт

На рисунке 26.4 показано, как можно определить на опыте зависимость давления газа от температуры при *постоянном объёме*.



Рис. 26.4

Давление газа измеряют манометром, а температуру — термометром.

Опыт показывает, что *при постоянном объёме давление данной массы газа прямо пропорционально абсолютной температуре*. Это означает, что

при *изохорном* процессе отношение давления данной массы газа к его абсолютной температуре остаётся постоянным:

$$\frac{p}{T} = \text{const при } V = \text{const.}$$

Это соотношение установил на опыте французский учёный Ж. Шарль, поэтому его называют *законом Шарля*.

График зависимости  $p$  от  $T$  при постоянном объёме называют *изохорой* (рис. 26.5).

- ° 8. Докажите, что значения давления и абсолютной температуры данной массы газа в двух состояниях 1 и 2 при *одном и том же объёме* связаны соотношением

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

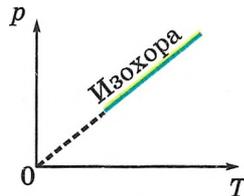


Рис. 26.5

1) От греческих слов «изос» — равный и «хорема» — сосуд.

9. Как изменяется давление данной массы газа при уменьшении абсолютной температуры в 2 раза, если объём газа не изменяется?
10. Начальная и конечная температура данной массы газа в изохорном процессе равны соответственно 327 °С и 27 °С. Изобразите графики зависимости  $p(T)$ ,  $V(T)$  и  $p(V)$  для данного процесса, поставьте два вопроса по этой ситуации и найдите ответы на них.

### 3. Изотермический процесс (при постоянной температуре)

Процесс, происходящий с данной массой газа при постоянной температуре, называют *изотермическим*.

#### Поставим опыт

На рисунке 26.6 показано, как можно определить на опыте зависимость давления газа от объёма при *постоянной температуре*.

Опыт показывает, что

при *изотермическом* процессе произведение давления данной массы газа на его объём остаётся *постоянным*:

$$pV = \text{const при } T = \text{const.}$$

Это означает, что при *постоянной температуре* давление данной массы газа *обратно пропорционально* его объёму (рис. 26.7).

График такой зависимости называют *изотермой*. Это гипербола.

Изотермический процесс изучали во второй половине 17-го века английский учёный Р. Бойль и французский учёный Э. Мариотт. Поэтому написанное выше уравнение называют *законом Бойля — Мариотта*.

11. Докажите, что значения давления и объёма данной массы газа в двух состояниях 1 и 2 при одной и той же температуре связаны соотношением

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

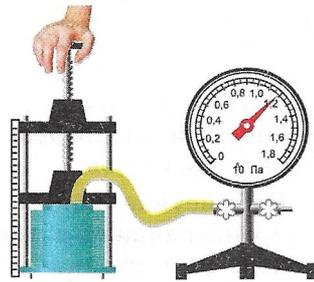


Рис. 26.6

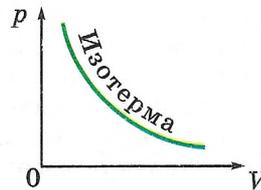


Рис. 26.7



°12. Как изменяется давление данной массы газа при увеличении его объёма в 3 раза, если температура газа не изменяется?

13. При изотермическом расширении объём данной массы газа увеличился в 2 раза. Начальное давление газа равно *нормальному атмосферному давлению* ( $10^5$  Па).

- Изобразите графики зависимости  $p(V)$ ,  $p(T)$  и  $V(T)$  для данного процесса.
- Во сколько раз уменьшилось давление газа?
- Насколько уменьшилось давление газа?

#### \*4. Газовые процессы, не являющиеся изопроцессами

Изучение газовых процессов мы начали с изопроцессов как более простых, потому что в этих процессах изменяются только два параметра газа. Но на самом деле в большинстве газовых процессов, происходящих в природе и используемых в технике, одновременно изменяются все три параметра газа: давление, объём и температура, то есть эти процессы не являются изопроцессами. Однако знание особенностей изопроцессов позволяет найти закономерности и других газовых процессов.



14. На рисунке 26.8 изображён график процесса, происходящего с данной массой газа при переходе из состояния 1 в состояние 2.

- Объясните, почему данный процесс не является каким-либо *изопроцессом*.

Итак, в данном процессе изменяются *все* три макроскопических параметра газа: *температура, объём и давление*. Выясним теперь: *как* они изменяются — *увеличиваются* или *уменьшаются*?

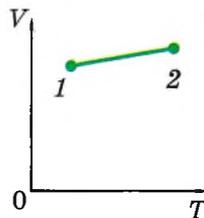


Рис. 26.8

По графику видно, что при переходе из состояния 1 в состояние 2 как температура, так и объём газа *увеличились*. А как изменилось *давление* газа: *увеличилось* или *уменьшилось*? Чтобы найти ответ на этот вопрос, продолжим *исследование* данной ситуации.

- Перенесите рисунок 26.8 в тетрадь и проведите изобары  $a$  и  $b$ , проходящие соответственно через состояния 1 и 2.

Теперь надо выяснить: какой изобаре ( $a$  или  $b$ ) соответствует большее давление? Если большее давление соответствует изобаре  $a$ , то при переходе из состояния 1 в состояние 2 давление газа уменьшалось, а если большее давление соответствует изобаре  $b$ , то при переходе из состояния 1 в состояние 2 давление газа увеличивалось.

Чтобы определить, какой изобаре соответствует большее давление, можно осуществить мысленно переход из какого-либо состояния на изобаре  $a$  в состояние на изобаре  $b$  посредством одного из

*изопроцессов.* В качестве начального состояния на изобаре *a* можно взять, например, состояние *1*.

- в) Посредством каких изопроцессов можно перейти из состояния *1* в некоторое состояние на изобаре *b*? Изобразите в тетради графики этих процессов.
- г) Как изменялось давление газа в изотермическом процессе при переходе из состояния *1* в некоторое состояние, лежащее на изобаре *b*?
- д) Как изменялось давление газа в изохорном процессе при переходе из состояния *1* в состояние, лежащее на изобаре *b*?

Итак, мы приходим к выводу, что при переходе из состояния *1* в состояние *2* давление газа *увеличивалось*.

**Похожие задачи**

- 15. Поставьте три вопроса по графику на рисунке 26.9 и найдите ответы на них.
- 16. Поставьте три вопроса по графику на рисунке 26.10 и найдите ответы на них.

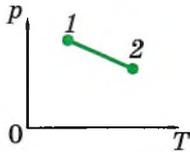


Рис. 26.9

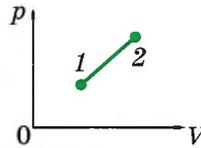


Рис. 26.10

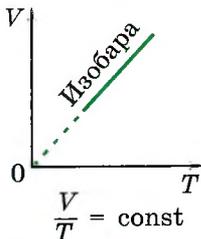
**ЧТО МЫ УЗНАЛИ**

Соотношение между значениями температуры по шкале Кельвина и шкале Цельсия

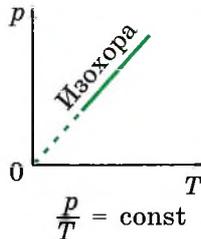
$$T = t + 273$$

**Изопроцессы**

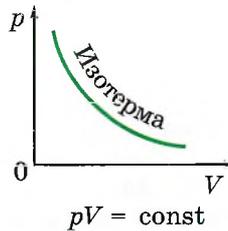
при  $p = \text{const}$



при  $V = \text{const}$



при  $T = \text{const}$



## ? ДОПОЛНИТЕЛЬНЫЕ ВОПРОСЫ И ЗАДАНИЯ

### Базовый уровень

17. По графику зависимости объёма данной массы газа  $V$  от его абсолютной температуры  $T$  (рис. 26.11) определите:
- изменяется ли давление газа при переходе из состояния 1 в состояние 2;
  - изменяется ли объём газа при переходе из состояния 1 в состояние 2, и если да, то во сколько раз;
  - чему равна температура газа в состоянии 2, если в состоянии 1 она равна  $0^\circ\text{C}$ .

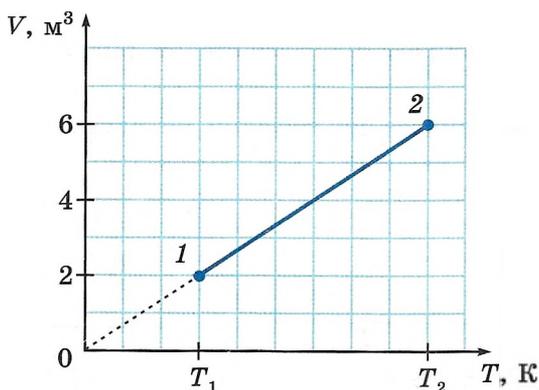


Рис. 26.11

18. Данную массу газа, первоначально находившегося при нормальных условиях, нагревают в закрытом сосуде так, что давление газа увеличивается на  $3 \cdot 10^5$  Па. Чему равна конечная температура газа по шкалам Кельвина и Цельсия?
19. Во сколько раз увеличивается давление данной массы газа, когда его объём изотермически изменяют от  $12 \text{ м}^3$  до  $3 \text{ м}^3$ ? Постройте графики зависимости  $V(T)$ ,  $p(V)$  и  $p(T)$  для данного процесса.
20. По графику зависимости давления  $p$  данной массы воздуха от объёма  $V$  (рис. 26.12) определите, чему равны объём и давление воздуха в состоянии 2.

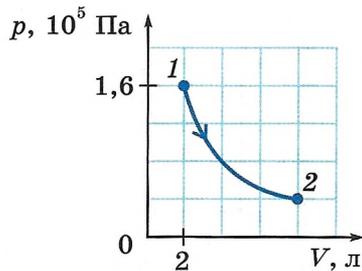


Рис. 26.12

21. По графику зависимости давления  $p$  данной массы газа от объёма  $V$  (рис. 26.13) определите, чему равна температура газа в состояниях 2 и 3, если температура в состоянии 1 равна  $50 \text{ К}$ .
22. По графику зависимости объёма  $V$  данной массы газа от абсолютной температуры  $T$  (рис. 26.14) определите, чему равно давление газа в состояниях 2 и 3, если давление в состоянии 1 равно  $10^5 \text{ Па}$ .

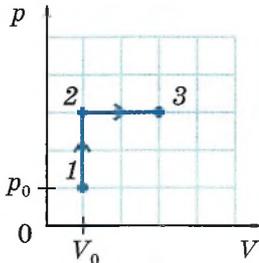


Рис. 26.13

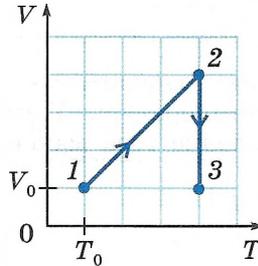


Рис. 26.14

### Повышенный уровень

23. Чему равна начальная температура газа данной массы, если при изобарном нагревании на  $15^\circ \text{C}$  его объём увеличился на  $4\%$ ?
24. Чему равно начальное давление газа данной массы, если при изохорном нагревании от  $27$  до  $127^\circ \text{C}$  его давление возросло на  $40 \text{ кПа}$ ?
25. Газ данной массы, находящийся в сосуде под поршнем, сначала изотермически сжимают, а затем изобарно расширяют до первоначального объёма. Начертите в тетради графики зависимости  $p(T)$ ,  $V(T)$  и  $p(V)$  для указанных процессов.
26. Газ данной массы, находящийся в сосуде под поршнем, сначала изобарно охлаждаают, затем изотермически расширяют и наконец изохорно возвращают в состояние с первоначальными макроскопическими параметрами. Начертите в тетради графики зависимости  $p(T)$ ,  $V(T)$  и  $p(V)$  для указанных процессов.
27. Пузырёк воздуха всплывает со дна озера на поверхность, при этом его объём увеличивается в  $6$  раз. Чему равна глубина озера, если давление воздуха равно нормальному атмосферному давлению? Считайте процесс изотермическим.

28. В сосуде находится некоторая масса газа при некоторых начальных значениях давления, объёма и температуры. В конечном состоянии давление газа в 2 раза больше начального, а объём — в 3 раза меньше начального. Известно, что переход из начального состояния в конечное был осуществлён с помощью двух изопроцессов. Найдите отношение конечной абсолютной температуры газа к начальной.
29. По графику зависимости давления  $p$  данной массы газа от абсолютной температуры  $T$  (рис. 26.15) определите, в каком состоянии объём газа минимальный.
30. По графику зависимости объёма  $V$  данной массы газа от абсолютной температуры  $T$  (рис. 26.16) определите, в каком состоянии давление газа максимально.

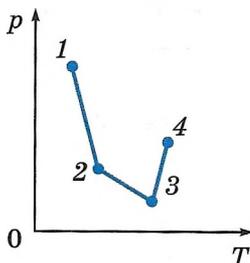


Рис. 26.15

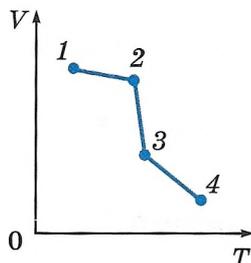


Рис. 26.16

### Высокий уровень

31. По графику (рис. 26.17) определите: при переходе между какими из указанных состояний газа его давление уменьшалось? увеличивалось?
32. По графику зависимости давления  $p$  данной массы газа от температуры  $T$  (рис. 26.18) определите, какая из указанных точек соответствует наибольшему объёму газа, а какая — наименьшему.

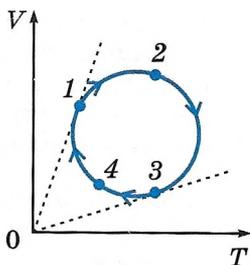


Рис. 26.17

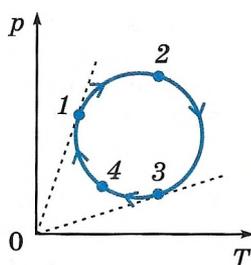


Рис. 26.18

33. По графику зависимости давления  $p$  данной массы газа от объёма  $V$  (рис. 26.19) определите, на каких этапах процесса температура газа увеличивалась, а на каких уменьшалась.
34. Чему равна абсолютная температура данной массы газа в состоянии 2, если температура газа в состоянии 1 равна  $T_1$ , в состоянии 3 она равна  $T_3$ , а состояния 2 и 4 лежат на одной изотерме (рис. 26.20)?

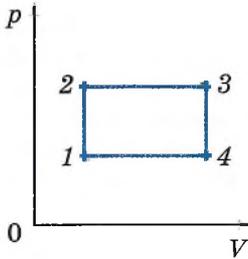


Рис. 26.19

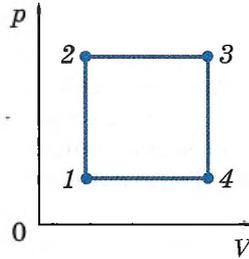


Рис. 26.20

## § 27. Уравнение состояния идеального газа

### 1. Уравнение Клапейрона

Французский физик Б. Клапейрон вывел соотношение, которое связывает давление, объём и температуру для данной массы газа:

для данной массы газа произведение давления газа на его объём, делённое на абсолютную температуру газа, есть величина постоянная:

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

Это соотношение называют *уравнением Клапейрона*.

- ° 1. Докажите, что уравнения всех трёх изопроцессов являются частными случаями уравнения Клапейрона.
- ° 2. Докажите, что для двух состояний 1 и 2 данной массы газа справедливо соотношение

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

- ° 3. При переходе данной массы газа из состояния 1 в состояние 2 давление газа увеличилось в 3 раза, а абсолютная температура увеличилась в 2 раза. Как изменился объём газа?

## \*2. Применение уравнения Клапейрона в более сложных случаях

### Газ в сосуде под поршнем с гирей

4. В цилиндрическом сосуде под лёгким поршнем площадью  $S = 10 \text{ см}^2$  находится газ при нормальном атмосферном давлении. Цилиндр помещён в смесь воды со льдом. Затем цилиндр перемещают в кипяток, а на поршень ставят гирю массой  $m = 10 \text{ кг}$  и ждут, когда поршень снова окажется в положении равновесия. Трением между поршнем и стенкой сосуда можно пренебречь.
- Каковы начальная и конечная температура газа по шкале Кельвина?
  - Как изменилось давление газа?
  - Чему равно отношение конечного объёма газа к начальному?

### Похожая задача

5. В цилиндрическом сосуде под лёгким поршнем площадью  $S = 10 \text{ см}^2$ , на котором стоит гиря массой 10 кг, находится некоторая масса газа при  $0 \text{ }^\circ\text{C}$ . Газ нагревают до некоторой температуры и с поршня убирают гирю. В результате объём газа увеличивается в 4 раза по сравнению с начальным. Внешнее давление равно нормальному атмосферному давлению. Трением между поршнем и стенкой сосуда можно пренебречь. Поставьте три вопроса по этой ситуации и найдите ответы на них.

### Задана зависимость давления от объёма

6. В некотором газовом процессе давление данной массы газа прямо пропорционально объёму газа.
- Может ли данный процесс быть каким-либо изопроцессом?
  - Запишите систему двух уравнений, одно из которых справедливо только для *данного* процесса, а другое представляет собой уравнение Клапейрона.
  - Используя полученную систему уравнений, напишите соотношение, в которое входят только  $p$  и  $T$ , и соотношение, в которое входят только  $V$  и  $T$ .
  - Как изменяется в данном процессе давление, когда абсолютная температура газа увеличивается в 4 раза?
  - Как изменяется в данном процессе температура, когда объём газа увеличивается в 2 раза?

## Похожие задачи

7. В некотором процессе давление данной массы газа обратно пропорционально абсолютной температуре. Как изменяется давление газа, когда его объём увеличивается в 4 раза?
8. В некотором процессе температура и объём данной массы газа связаны соотношением  $TV^2 = \text{const}$ . Поставьте четыре вопроса по этой ситуации и найдите ответы на них.

### 3. Уравнение состояния идеального газа (уравнение Менделеева — Клапейрона)

Из уравнения Клапейрона следует, что для *данной массы* газа выражение  $\frac{pV}{T}$  остаётся *постоянным*. Итальянский учёный Авогадро установил на опыте, что это выражение пропорционально *числу молекул* в данном образце газа. Поэтому можно записать:

$$\frac{pV}{T} = kN.$$

Коэффициент пропорциональности  $k$  называют *постоянной Больцмана* в честь австрийского физика Л. Больцмана. Измерения показали, что  $k = 1,38 \cdot 10^{-23}$  Дж/К.

- °9. Докажите, что написанное уравнение можно переписать в виде

$$\frac{pV}{T} = kvN_A.$$

Произведение постоянной Больцмана  $k$  на постоянную Авогадро  $N_A$  называют *универсальной газовой постоянной*  $R$ :

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

- °10. Докажите справедливость формул:

$$pV = \nu RT,$$

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

Соотношение  $pV = \frac{m}{M} RT$  называют *уравнением состояния идеального газа*<sup>1)</sup>.

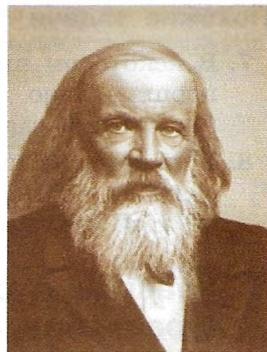
<sup>1)</sup> *Идеальным газом* называют модель реального газа (мы рассмотрим её в следующем параграфе). Опыты показывают, что эта модель хорошо описывает свойства несильно сжатых газов — в частности, окружающего нас воздуха.

Это уравнение вывел русский учёный Д. И. Менделеев, поэтому его называют также *уравнением Менделеева — Клапейрона*.

### Примеры применения уравнения Менделеева — Клапейрона

Напомним, что *нормальными условиями* называют давление, равное нормальному атмосферному давлению ( $10^5$  Па), и температуру, равную  $0^\circ\text{C}$ . Воздух представляет собой смесь газов (в основном азота и кислорода). В расчётах воздух обычно считают газом с молярной

массой  $29 \cdot 10^{-3} \frac{\text{кг}}{\text{моль}}$ .



Д. И. Менделеев  
(1834—1907)

11. В сосуде объёмом 20 л содержится газ при нормальных условиях. Чему равна масса этого газа, если это: а) водород; б) кислород; в) углекислый газ?
12. Горизонтально расположенный цилиндрический сосуд разделён подвижным металлическим поршнем на две части. В одной части находится водород, а в другой — кислород. Массы газов равны. Какую часть всего объёма сосуда занимает водород, а какую — кислород?

### Плотность газа

13. Докажите, что плотность газа  $\rho$  можно найти по формуле

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

14. Найдите плотность воздуха при нормальных условиях (для большей точности найдите значение нормального атмосферного давления в Интернете). Во сколько раз она меньше плотности воды?

### Концентрация молекул газа

*Концентрацией молекул* газа  $n$  называют отношение числа молекул в данном образце газа к его объёму:

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

*Единицей концентрации молекул* является  $1/\text{м}^3$ .

15. Докажите справедливость формулы

$$p = nkT.$$

16. Сколько молекул содержится в  $1 \text{ мм}^3$  воздуха при нормальных условиях? Сравните это число с числом звёзд в нашей Галактике (по современным представлениям, в ней около 300 миллиардов звёзд).

#### \*4. Применение уравнения Менделеева — Клапейрона в более сложных случаях

17. В погружённом в кипяток сосуде объёмом 0,5 л содержится 0,9 г газа при давлении, в 2 раза большем нормального атмосферного. Поставьте два вопроса по этой ситуации и найдите ответы на них.
18. В цилиндре под поршнем находился озон (трёхатомный кислород  $\text{O}_3$ ) при температуре  $727^\circ\text{C}$  под постоянным давлением. Когда температуру понизили до  $127^\circ\text{C}$ , весь озон превратился в кислород  $\text{O}_2$ . Поставьте два вопроса по этой ситуации и найдите ответы на них.
19. В вертикальном цилиндрическом сосуде под не очень плотно пригнанным подвижным поршнем находится газ. Сосуд погружён в кипяток. Когда сосуд перенесли в ванну, содержащую воду со льдом, объём газа уменьшился в 2 раза. Трением между поршнем и стенкой сосуда можно пренебречь.
- Какой была начальная и конечная температура газа по шкале Кельвина?
  - Изменилось ли давление газа?
  - Во сколько раз изменился бы объём газа, если бы не было утечки?
  - Какая доля начальной массы газа осталась в сосуде?

### 5. Закон Дальтона

Окружающий нас воздух представляет собой *смесь* газов: примерно  $3/4$  его массы составляет азот, а  $1/4$  — кислород. Во многих задачах рассматриваются и другие смеси газов.

Каждый входящий в состав смеси газ вносит свой вклад в общее давление газа. Давление, которое оказывал бы один из входящих в смесь газов, если удалить все остальные газы, называют *парциальным* давлением данного газа.

Английский физик Дж. Дальтон установил на опыте, что для достаточно разрежённых газов

давление смеси газов равно сумме их парциальных давлений:

$$p = p_1 + p_2 + p_3 + \dots$$

Это утверждение называют *законом Дальтона*.



20. В сосуде объёмом 2 л при нормальных условиях содержится смесь газов, состоящая из 4 г кислорода и 4 г гелия. Поставьте три вопроса по этой ситуации и найдите ответы на них.



### ЧТО МЫ УЗНАЛИ

Уравнение состояния идеального газа  
(уравнение Менделеева — Клапейрона)

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

$$pV = \nu RT$$

Закон Дальтона

$$p = p_1 + p_2 + p_3 + \dots$$

### ? ДОПОЛНИТЕЛЬНЫЕ ВОПРОСЫ И ЗАДАНИЯ

#### Базовый уровень

21. В сосуде под поршнем находится газ объёмом 5 л при температуре 27 °С и нормальном атмосферном давлении. Газ нагревают до 227 °С и, перемещая поршень, увеличивают объём сосуда до 10 л. Каким становится давление газа при этом? Масса газа не изменилась.
22. Какой объём займёт данная масса газа при давлении  $1,5 \cdot 10^5$  Па и температуре  $-73$  °С, если при нормальных условиях эта масса газа занимала объём 300 см<sup>3</sup>?
23. В сосуде под поршнем содержится данная масса воздуха при температуре 300 К. Объём воздуха уменьшают в 16 раз, при этом его давление увеличивается в 20 раз. Чему равна конечная температура воздуха?
24. В баллоне объёмом 50 л содержится 0,29 кг воздуха при температуре 27 °С. Чему равно давление воздуха в баллоне?
25. Азот массой 2,8 г находится в закрытом сосуде объёмом 500 см<sup>3</sup> при давлении 400 кПа. Чему равна температура газа?
26. В закрытом сосуде объёмом 100 см<sup>3</sup> содержится газ при давлении 1 МПа и температуре 27 °С. Чему равно количество вещества в газе?
27. Во сколько раз при нормальных условиях плотность гелия меньше плотности кислорода?
28. Чему равно давление аргона, помещённого в сосуд при температуре 25 °С, если концентрация молекул газа равна  $2 \cdot 10^{25}$  м<sup>-3</sup>?

29. В сосуде объёмом 5 л при температуре  $0\text{ }^{\circ}\text{C}$  содержится смесь газов, состоящая из 16 г кислорода и 8 г гелия. Чему равно давление смеси газов?

### Повышенный уровень

30. В открытом стеклянном сосуде нагрели воздух до  $100\text{ }^{\circ}\text{C}$ , затем сосуд герметично закрыли и понизили температуру воздуха в нём до  $20\text{ }^{\circ}\text{C}$ . На сколько процентов изменилось в результате давление воздуха в сосуде?

31. По графику зависимости давления данной массы газа от объёма (рис. 27.1) определите, чему равна температура газа в состоянии 2, если в состоянии 1 она равна  $T_1$ .

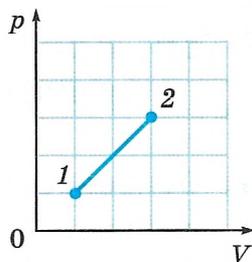


Рис. 27.1

32. Половину массы азота, находящегося в сосуде при температуре  $400\text{ K}$  и давлении  $400\text{ кПа}$ , выпустили из сосуда, а затем температуру оставшегося газа понизили до  $300\text{ K}$ . Чему стало равно давление оставшегося в сосуде азота?

33. В сосуде объёмом  $2\text{ см}^3$  содержится  $10^{20}$  молекул газа при температуре  $27\text{ }^{\circ}\text{C}$ . Чему равно давление газа в сосуде?

34. В открытом сосуде содержится газ. Увеличилась или уменьшилась концентрация газа после того, как абсолютную температуру газа увеличили на  $25\%$ ? На сколько процентов изменилась концентрация газа в сосуде?

35. Газ, находящийся в вертикальном цилиндрическом сосуде под неплотно подогнанным подвижным поршнем при температуре  $46\text{ }^{\circ}\text{C}$ , охлаждают до  $-7\text{ }^{\circ}\text{C}$ . При этом объём газа уменьшается в 3 раза по сравнению с начальным. Какая доля начальной массы газа вытекла из сосуда? Трением между поршнем и стенкой сосуда можно пренебречь.

### Высокий уровень

36. Вертикальный закрытый цилиндрический сосуд высотой  $0,8\text{ м}$  разделён на две части лёгким скользящим без трения поршнем. В верхней части сосуда находится гелий, а в нижней — азот. На какой высоте находится поршень, если массы газов одинаковы?

37. Оцените, чему равно среднее расстояние между молекулами газа, находящегося при температуре  $123\text{ }^{\circ}\text{C}$  и давлении  $100\text{ кПа}$ .

38. В вертикальном цилиндре под лёгким поршнем, находящимся на высоте 0,6 м от дна цилиндра, содержится воздух при температуре 7 °С. Площадь поршня 100 см<sup>2</sup>, давление над поршнем равно 150 кПа. На сколько сантиметров и в каком направлении сместится поршень по сравнению с первоначальным положением, если воздух в цилиндре нагреть до 47 °С, а давление над поршнем увеличить на 100 кПа? Примите, что трением можно пренебречь.

## § 28. Абсолютная температура и средняя кинетическая энергия молекул

### 1. Основное уравнение молекулярно-кинетической теории

**Идеальный газ.** Если газ достаточно разреженный, то объёмом молекул и их взаимодействием между столкновениями можно пренебречь. Такую *модель* реального газа называют *идеальным газом*.

Движущиеся хаотически молекулы газа сталкиваются не только друг с другом, но и со стенками содержащего газ сосуда.

#### Поставим опыт

Если сыпать на лист тонкого картона песок, то лист будет оставаться *постоянно* согнутым, будто на него действует *постоянная* сила, хотя его деформация обусловлена ударами *отдельных* песчинок (рис. 28.1).

Подобным образом частые *удары молекул газа* о стенку сосуда создают *постоянное давление* на неё.

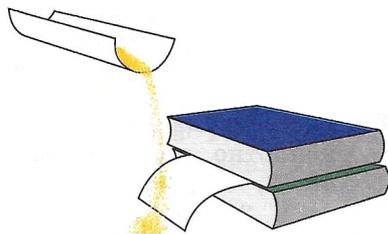


Рис. 28.1

В середине 19-го века немецкий физик Р. Клаузиус вывел соотношение, выражающее давление газа  $p$  через его концентрацию  $n$ , массу одной молекулы  $m_0$  и среднее значение квадрата скорости <sup>1)</sup> молекул  $\overline{v^2}$ .

1) Среднее значение квадрата скорости молекул определяется формулой  $\overline{v^2} = \frac{v_1^2 + v_2^2 + \dots + v_N^2}{N}$ , где  $N$  — число молекул в газе.

Это уравнение, которое называют *основным уравнением молекулярно-кинетической теории идеального газа*, имеет вид

$$p = \frac{1}{3} n m_0 \overline{v^2}.$$

Вывод этого уравнения мы приведём ниже, а сейчас выразим давление газа через среднюю кинетическую энергию *поступательного*<sup>1)</sup> движения молекулы  $\bar{E}$ .

° 1. Докажите, что

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

Обратите внимание: полученное соотношение выражает *макроскопический* параметр газа (давление) через *микроскопические* параметры (концентрацию молекул и их среднюю кинетическую энергию).

° 2. В сосуде объёмом 20 л содержится 1 моль неона при нормальном атмосферном давлении.

- Сколько молекул газа в сосуде?
- Чему равна концентрация молекул?
- Чему равна средняя кинетическая энергия поступательного движения молекул?
- Есть ли в условии лишние данные?

## 2. Связь между температурой и средней кинетической энергией молекул

Запишем теперь рядом две формулы для давления газа (вторая формула получена в предыдущем параграфе):

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

° 3. Используя эти формулы, докажите, что

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

Это соотношение раскрывает физический смысл абсолютной температуры:

абсолютная температура является мерой средней кинетической энергии движения молекул.

<sup>1)</sup> Если молекула состоит более чем из одного атома, у неё есть также кинетическая энергия вращательного движения. Расчёт, выходящий за рамки нашего курса, показывает, что при нахождении давления газа её учитывать не нужно. Далее под кинетической энергией молекул понимается обычно кинетическая энергия поступательного движения (если иное не оговорено).

Из последнего уравнения следует, что *средняя кинетическая энергия поступательного движения молекул газа зависит только от абсолютной температуры газа.*

Например, молекулы кислорода и водорода при одинаковой температуре имеют *одинаковые средние кинетические энергии* поступательного движения (независимо от того, равны ли давления газов). Но *скорости молекул при этом различны!*

° 4. В сосуде содержится смесь аргона и неона. Чему равна средняя кинетическая энергия молекул<sup>1)</sup> этих газов при нормальных условиях? Есть ли в условии задания лишние данные?

### 3. Скорости молекул

*Среднеквадратичной скоростью* молекул  $\bar{v}$  называют корень квадратный из среднего квадрата скорости молекул:

$$\bar{v} = \sqrt{\overline{v^2}}.$$

Среднеквадратичную скорость молекул газа можно выразить через абсолютную температуру газа и его молярную массу. Сделаем это в несколько шагов.

° 5. Докажите, что

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

° 6. Докажите, что

$$\bar{v} = \sqrt{\frac{3RT}{M}}.$$

Обратите внимание: чем меньше молярная масса данного газа, тем больше среднеквадратичная скорость молекул этого газа при той же температуре.

° 7. Чему равны среднеквадратичные скорости молекул водорода, кислорода и радона при 20 °С? Ответы округлите до двух значащих цифр.

Ответ этой задачи может показаться удивительным: молекулы газов движутся со скоростями *артиллерийских снарядов!* Ниже мы расскажем об опыте, который подтверждает это.

° 8. Выразите среднеквадратичную скорость молекул через давление газа и его плотность.

<sup>1)</sup> Это одноатомные молекулы, поэтому их кинетическая энергия — это кинетическая энергия только поступательного движения.

- °9. В сосуде находится 30 г криптона при нормальных условиях. Объем сосуда 5 л. Чему равна среднеквадратичная скорость молекул газа? Есть ли в условии лишние данные?

### Измерение скоростей молекул

В начале 20-го века немецкий физик О. Штерн впервые измерил скорости молекул на опыте. Вдоль оси двух соединённых цилиндров *A* и *B* он поместил покрытую серебром проволоку (рис. 28.2). В цилиндре *A* прорезана узкая вертикальная щель. Воздух из системы был откачан.

Когда проволоку нагревали электрическим током, атомы серебра испарялись и вылетали через узкую щель, вследствие чего напротив щели на внутренней поверхности цилиндра *B* появлялась узкая серебристая полоса *1*.

Когда соединённые цилиндры вращались с большой скоростью вокруг их общей оси, вместо узкой полосы *1* напротив щели наблюдалась *широкая* и к тому же *смещённая* полоса *2*.

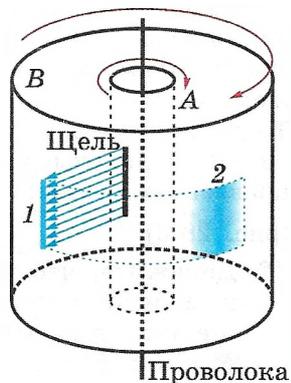


Рис. 28.2

- °10. Почему полоса смещалась, когда цилиндры вращались?
- °11. Почему полоса расширялась?

Опыт Штерна стал ещё одним подтверждением молекулярно-кинетической теории.

### \*4. Вывод основного уравнения молекулярно-кинетической теории идеального газа

Мы уже знаем, что *давление газа на стенку сосуда обусловлено ударами молекул*.

Давление газа на стенку сосуда площадью *S* выражается формулой

$$p = \frac{F}{S},$$

где *F* — модуль силы давления газа на стенку.

Согласно второму закону Ньютона в импульсной форме

$$F = \frac{\Delta p}{\Delta t},$$

где  $\Delta p$  — модуль импульса, переданного молекулами газа стенке за промежуток времени  $\Delta t$ .



Переданный за это время молекулами импульс равен произведению числа столкновений  $Z$  молекул со стенкой на средний импульс  $\Delta p_1$ , переданный одной молекулой:

$$\Delta p = Z \cdot \Delta p_1.$$

Предположим на время, что проекции скоростей всех молекул на ось  $x$  равны по модулю (в дальнейшем мы рассмотрим общий случай). Тогда за малый промежуток времени  $\Delta t$  молекулы пролетают по направлению к стенке расстояние  $v_x \Delta t$  (рис. 28.3).

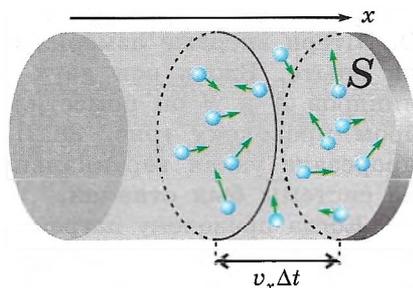


Рис. 28.3

12. Докажите, что число молекул  $N$  в слое толщиной  $v_x \Delta t$  вблизи стенки выражается формулой  $N = n S v_x \Delta t$ , где  $n$  — концентрация молекул.

13. Докажите, что число ударов молекул о стенку за время  $\Delta t$  выражается формулой

$$Z = \frac{n S v_x \Delta t}{2}.$$

Если температура газа не изменяется, то можно считать, что в результате ударов о стенку модуль скорости молекул не изменяется.

14. Докажите, что модуль импульса, переданного стенке одной молекулой, выражается формулой

$$\Delta p_1 = 2 m_0 v_x.$$

Подставляя последние два выражения в формулу для модуля импульса, переданного стенке молекулами,  $\Delta p = Z \cdot \Delta p_1$ , получаем:

$$\Delta p = Z \cdot \Delta p_1 = \frac{n S v_x \Delta t}{2} \cdot 2 m_0 v_x = n S m_0 \overline{v_x^2} \Delta t.$$

Используя формулы  $F = \frac{\Delta p}{\Delta t}$  и  $p = \frac{F}{S}$ , получаем:

$$p = n m_0 \overline{v_x^2}.$$

Осталось учесть, что на самом деле молекулы летят не только по направлению к стенке или от неё.

Квадрат скорости молекулы выражается через квадраты проекций скорости следующей формулой (обобщение теоремы Пифагора на трёхмерный случай):

$$v^2 = v_x^2 + v_y^2 + v_z^2.$$

Так как *все* направления скоростей молекул *равновероятны*,

$$\overline{v_x^2} = \overline{v_y^2} = \overline{v_z^2}.$$

Из двух последних формул получаем:

$$\overline{v_x^2} = \frac{1}{3} \overline{v^2}.$$

Подставляя это соотношение в формулу  $p = nm_0 \overline{v_x^2}$ , получаем *основное уравнение молекулярно-кинетической теории идеального газа*:

$$p = \frac{1}{3} nm_0 \overline{v^2}.$$

15. Как изменилось бы давление газа на стенку сосуда, если бы она *поглощала* все налетающие на неё молекулы?

## ЧТО МЫ УЗНАЛИ

Связь между абсолютной температурой и средней кинетической энергией поступательного движения молекул

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

Среднеквадратичная скорость молекул

$$\bar{v} = \sqrt{\frac{3RT}{M}}$$

**Основное уравнение молекулярно-кинетической теории идеального газа**

$$p = \frac{1}{3} nm_0 \overline{v^2}$$

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

## ? ДОПОЛНИТЕЛЬНЫЕ ВОПРОСЫ И ЗАДАНИЯ

### Базовый уровень

16. Как изменится давление газа,
- если концентрацию молекул газа увеличить в 4 раза при неизменной среднеквадратичной скорости молекул;
  - если среднеквадратичную скорость молекул газа увеличить в 4 раза при неизменной концентрации молекул;
  - если среднюю кинетическую энергию молекул увеличить в 3 раза при неизменной концентрации молекул;
  - если среднюю кинетическую энергию молекул увеличить в 4 раза, а концентрацию молекул уменьшить в 2 раза;
  - если концентрацию молекул газа увеличить в 2 раза, а среднеквадратичную скорость уменьшить в 4 раза?

17. Средняя кинетическая энергия молекул газа увеличилась в 2 раза. Чему стала равной абсолютная температура газа, если его начальная температура была равна 200 К?
18. Чему равно давление газа плотностью  $1,2 \text{ кг/м}^3$ , если среднеквадратичная скорость его молекул равна 600 м/с?
19. Чему равна среднеквадратичная скорость молекул газа массой 2 кг, находящегося в сосуде объёмом  $3 \text{ м}^3$ , если давление в сосуде равно 200 кПа?
20. Как изменится кинетическая энергия поступательного движения молекул и среднеквадратичная скорость их движения, если газ нагреть от  $27^\circ \text{C}$  до  $627^\circ \text{C}$ ?

### Повышенный уровень

21. Сколько молекул газа содержится в сосуде объёмом 2 л при нормальном атмосферном давлении, если средняя кинетическая энергия поступательного движения молекул равна  $1,5 \cdot 10^{-19}$  Дж?
22. Чему равна концентрация молекул кислорода при давлении  $2 \cdot 10^5$  Па, если среднеквадратичная скорость их поступательного движения равна 700 м/с?
23. В сосуде, разделённом на две части теплонепроницаемой перегородкой, находятся: в одной части — гелий при температуре 300 К, а во второй части — неон при температуре 600 К.
  - а) Чему равно отношение средних кинетических энергий атомов неона и гелия?
  - б) Чему равно отношение среднеквадратичных скоростей атомов неона и гелия?
24. В открытом сосуде находится воздух. Как изменятся при увеличении его абсолютной температуры на 25 %:
  - а) давление газа;
  - б) концентрация молекул газа;
  - в) средняя кинетическая энергия поступательного движения молекул газа;
  - г) среднеквадратичная скорость движения молекул?

### Высокий уровень

25. В баллоне с очень малым отверстием поддерживается температура воздуха  $T_1$ . Температура окружающего воздуха равна  $T_2$ , а его давление равно  $p_2$ . Чему равно давление  $p_1$  воздуха в баллоне?

26. Чему равна начальная температура газа, если при его нагревании на 150 К среднеквадратичная скорость движения молекул увеличилась с 500 м/с до 600 м/с?
27. В баллоне находится смесь двух инертных газов общей массой 6 г. Среднеквадратичная скорость молекул первого газа в 3,16 раза больше среднеквадратичной скорости молекул второго газа, а суммарная кинетическая энергия молекул первого газа в 2 раза больше суммарной кинетической энергии второго газа.
- Какие газы находятся в баллоне?
  - Чему равна масса каждого газа?

## § 29. Насыщенный пар. Влажность

### 1. Насыщенный и ненасыщенный пар

*Парообразованием* называют превращение жидкости в пар. Процесс, обратный парообразованию, то есть превращение пара в жидкость, называют *конденсацией*.

Парообразование со свободной<sup>1)</sup> поверхности жидкости называют *испарением*.

° 1. Приведите примеры парообразования воды и конденсации водяного пара, которые можно наблюдать в повседневной жизни.

Почему уровень воды, налитой в открытую банку, постепенно понижается, а уровень воды в плотно закрытой банке остаётся *неизменным*?

Дело в том, что в открытой банке испарение происходит интенсивнее, чем конденсация, а в закрытой банке испарение и конденсация идут с одинаковой интенсивностью (рис. 29.1).

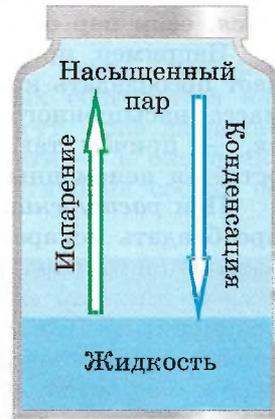


Рис. 29.1

<sup>1)</sup> Так называют поверхность жидкости, граничащую с газом (например, воздухом).

Когда интенсивность двух встречных процессов одинакова, говорят, что имеет место *динамическое равновесие*.

Пар, находящийся в динамическом равновесии со своей жидкостью, называют *насыщенным*.

Если сосуд с жидкостью открыть, пар начнёт выходить из сосуда наружу, и процесс испарения пойдёт быстрее, чем процесс конденсации. Уровень жидкости начнёт понижаться.

Если испарение жидкости происходит быстрее, чем конденсация пара, говорят, что над жидкостью находится *ненасыщенный* пар.

## 2. Зависимость давления насыщенного пара от температуры

Отличительное свойство насыщенного пара состоит в том, что

давление насыщенного пара не зависит от объёма, а зависит *только от температуры*.

Таким образом *насыщенный пар не подчиняется уравнению Клапейрона*  $\frac{pV}{T} = \text{const}$ , потому что уравнение Клапейрона справедливо только для *постоянной* массы газа, а при расширении или сжатии насыщенного пара его масса *изменяется*, если пар остаётся насыщенным.

Например, при *сжатии* пара начинает преобладать конденсация, поэтому масса насыщенного пара *уменьшается*, — причём так, что его давление остаётся неизменным.

При *расширении* же пара начинает преобладать испарение, поэтому масса насыщенного пара *увеличивается*, — и снова так, что его давление остаётся неизменным. Это возможно, конечно, только при условии, что «рядом» с паром находится «его» жидкость, которая при этом испаряется.

На рисунке 29.2 приведён график зависимости давления насыщенного водяного пара от температуры. Мы видим, что *давление насыщенного пара*

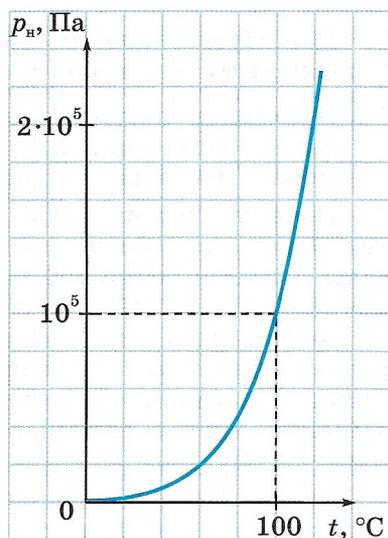


Рис. 29.2

очень быстро увеличивается с ростом температуры. Это увеличение давления обусловлено в основном увеличением концентрации молекул пара: при увеличении температуры испарение происходит интенсивнее.

Ниже приведены значения давления насыщенного водяного пара при некоторых значениях температуры.

|                            |      |      |     |    |    |     |     |
|----------------------------|------|------|-----|----|----|-----|-----|
| $t, ^\circ\text{C}$        | 0    | 20   | 40  | 60 | 80 | 100 | 120 |
| $p_{\text{н}}, \text{кПа}$ | 0,61 | 2,34 | 7,4 | 20 | 47 | 100 | 200 |

Заметим, что если масса пара не изменяется, то к пару можно применять уравнение Менделеева — Клапейрона. Воспользуйтесь этим при решении следующей задачи.

° 2. Пустой герметически закрытый сосуд объёмом 20 л заполнили насыщенным водяным паром при температуре  $100^\circ\text{C}$ .

- Чему равно давление пара?
- Чему равна масса пара?

### 3. Кипение

По графику, приведённому на рисунке 29.2, видно, что при температуре кипения воды ( $100^\circ\text{C}$ ) давление насыщенного водяного пара равно атмосферному (пунктир на рис. 29.2). Случайно ли это?

#### Поставим опыт

Поставим на огонь прозрачный сосуд с водой. Через некоторое время в сосуде появятся пузырьки, в которых содержится насыщенный пар. Но расти эти пузырьки не могут, пока давление насыщенного пара меньше давления в жидкости — а оно практически равно атмосферному давлению (если глубина сосуда не очень велика).

Однако с ростом температуры давление насыщенного пара в пузырьках увеличивается. И когда давление насыщенного водяного пара станет равным атмосферному давлению, пузырьки будут расти, подниматься под действием силы Архимеда и лопаться на поверхности жидкости (рис. 29.3). Это — кипение.



Рис. 29.3

Итак,

кипение жидкости происходит при температуре, при которой давление  $p_{\text{н}}$  насыщенного пара равно внешнему давлению  $p_{\text{внеш}}$ :

$$p_{\text{н}} = p_{\text{внеш}}.$$

Из этого равенства следует, что *температура кипения зависит от давления*. При увеличении внешнего давления температура кипения жидкости повышается.

- ?
- ° 3. Объясните, почему для стерилизации медицинских инструментов воду кипятят в специальных приборах — автоклавах, где давление в 1,5—2 раза выше нормального атмосферного.
  - ° 4. Почему высоко в горах трудно сварить мясо?
  - ° 5. Используя таблицу зависимости давления насыщенного водяного пара от температуры, найдите температуру кипения воды: а) при давлении, равном одной пятой нормального атмосферного давления; б) при давлении, в 2 раза большем нормального атмосферного давления.

#### 4. Влажность воздуха

В воздухе всегда есть водяной пар, потому что непрерывно происходит испарение воды из океанов, морей и рек.

Содержание водяного пара в воздухе часто характеризуют давлением, которое оказывал бы пар, если бы не было других газов, то есть *парциальным давлением* водяного пара.

*Относительной влажностью воздуха*  $\varphi$  называют выраженное в процентах отношение парциального давления  $p$  водяного пара к давлению  $p_{\text{н}}$  насыщенного пара при той же температуре:

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

Человек чувствует себя комфортно при относительной влажности воздуха 50—60 %. При более низкой влажности воздух считают сухим, а при более высокой — влажным.

Если относительная влажность воздуха близка к 100 %, то есть водяной пар в воздухе является почти насыщенным, мы воспринимаем воздух как сырой.

- ?
- ° 6. Чему равна относительная влажность воздуха, если лужи после дождя не высыхают?

### Измерение влажности

Относительную влажность воздуха измеряют следующими приборами.

**Волосяной гигрометр.** Его действие основано на том, что длина обезжиренного волоса немного изменяется при изменении влажности воздуха. При изменении длины волос поворачивает на некоторый угол стрелку прибора.

**Психрометр** (рис. 29.4). Его действие<sup>1)</sup> основано на том, что жидкость при испарении *охлаждается*, благодаря чему показания влажного термометра (правый на фотографии: его баллон обернут влажной тканью) ниже, чем показания сухого. Влажность воздуха определяют по двум величинам: показаниям сухого термометра и *разности* показаний сухого и влажного термометров. При этом используют *психрометрическую таблицу*, расположенную обычно на самом приборе.

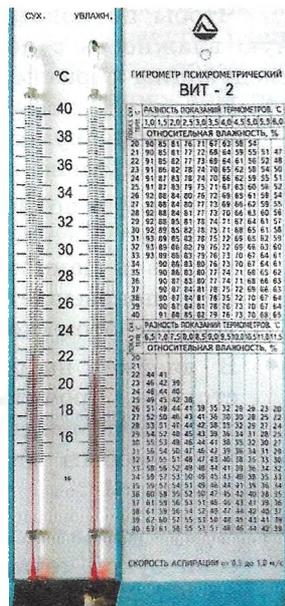


Рис. 29.4

Психрометрическая таблица

| Показания сухого термометра, °С | Разность показаний сухого и влажного термометров, °С |    |    |    |    |    |
|---------------------------------|------------------------------------------------------|----|----|----|----|----|
|                                 | 0                                                    | 1  | 2  | 3  | 4  | 5  |
|                                 | Относительная влажность, %                           |    |    |    |    |    |
| 20                              | 100                                                  | 91 | 83 | 74 | 66 | 59 |
| 21                              | 100                                                  | 91 | 83 | 75 | 67 | 60 |
| 22                              | 100                                                  | 92 | 83 | 76 | 68 | 61 |
| 23                              | 100                                                  | 92 | 84 | 76 | 69 | 61 |
| 24                              | 100                                                  | 92 | 84 | 77 | 69 | 62 |
| 25                              | 100                                                  | 92 | 84 | 77 | 70 | 63 |
| 26                              | 100                                                  | 92 | 85 | 78 | 71 | 64 |
| 27                              | 100                                                  | 92 | 85 | 78 | 71 | 65 |
| 28                              | 100                                                  | 93 | 85 | 78 | 72 | 65 |
| 29                              | 100                                                  | 93 | 86 | 79 | 72 | 66 |
| 30                              | 100                                                  | 93 | 86 | 79 | 73 | 67 |

1) См. «Задания для проектно-исследовательской деятельности».

Чтобы по показаниям двух термометров определить относительную влажность с помощью психрометрической таблицы, поступают следующим образом.

- Используя левый столбец, находят строку, в которой указаны показания *сухого* термометра. В приведённой таблице для примера выделена цветом строка, соответствующая  $22\text{ }^{\circ}\text{C}$ .
  - Используя показания влажного термометра, находят столбец, в котором указана *разность* показаний сухого и влажного термометров в данном помещении. Например, если влажный термометр показывает  $17\text{ }^{\circ}\text{C}$ , эта разность равна  $5\text{ }^{\circ}\text{C}$ . В приведённой таблице этот столбец тоже выделен цветом.
  - В ячейке, находящейся на пересечении найденных строки и столбца, прочитывают значение относительной влажности воздуха в помещении. В приведённой таблице эта ячейка выделена особым цветом: в ней указана относительная влажность, равная  $61\%$ .
- °7. Чему равна относительная влажность воздуха в помещении, если сухой термометр показывает  $20\text{ }^{\circ}\text{C}$ , а влажный показывает  $16\text{ }^{\circ}\text{C}$ ?

- °8. О чём «говорит» столбец таблицы, в котором все числа одинаковы?

### Точка росы

Относительная влажность воздуха *при повышении температуры уменьшается, а при понижении — увеличивается*. И если температура достаточно низкая, относительная влажность воздуха становится равной  $100\%$ , то есть водяной пар в воздухе становится *насыщенным*.

Температуру, при которой данный водяной пар становится насыщенным, называют *точкой росы* для этого пара.

- °9. Что наблюдается при понижении температуры ниже точки росы?
- °10. Почему роса выпадает часто в предутренние часы?

Найти точку росы для воздуха определённой температуры с заданной влажностью можно с помощью всё той же таблицы зависимости давления насыщенного водяного пара от температуры. Приведём другую часть этой таблицы.

|                               |      |      |      |      |      |      |      |      |      |
|-------------------------------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|
| $t, \text{ }^{\circ}\text{C}$ | 8    | 9    | 10   | 11   | 12   | 13   | 14   | 15   | 20   |
| $p_{\text{н}}, \text{ кПа}$   | 1,07 | 1,15 | 1,23 | 1,31 | 1,40 | 1,50 | 1,60 | 1,70 | 2,34 |

Рассмотрим пример использования данной таблицы.

11. Когда Саша зашёл в дом, его очки запотели. Посмотрев на термометр и психрометр, Саша установил: температура равна  $20\text{ }^{\circ}\text{C}$ , относительная влажность  $60\%$ . Примите, что сразу после входа в дом температура стёкол очков равна наружной температуре.

- Почему стёкла очков дома запотели?
- Чему равно парциальное давление водяного пара в комнате?
- При какой температуре содержащийся в воздухе комнаты водяной пар стал бы насыщенным?
- Какова температура воздуха на улице?

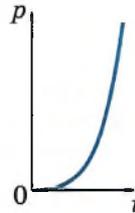
## ЧТО МЫ УЗНАЛИ

### Насыщенный пар

Находится в динамическом равновесии с жидкостью.

Давление насыщенного пара зависит только от температуры.

При температуре кипения давление насыщенного пара равно внешнему давлению:  $p_{\text{н}} = p_{\text{внеш}}$



### Относительная влажность

$$\varphi = \frac{p}{p_{\text{н}}} 100\%$$

Точка росы: температура, при которой водяной пар становится насыщенным

## ? ДОПОЛНИТЕЛЬНЫЕ ВОПРОСЫ И ЗАДАНИЯ<sup>1)</sup>

### Базовый уровень

12. В одной части сосуда, разделённого перегородкой, находится насыщенный водяной пар, а во второй части — ненасыщенный при той же температуре. Если убрать перегородку, то каким станет пар в сосуде — насыщенным или ненасыщенным?

<sup>1)</sup> При решении задач этого параграфа считайте, что при неизменной массе водяной пар удовлетворяет уравнению Менделеева — Клапейрона, а объёмом воды, образовавшейся в результате конденсации пара, можно пренебречь по сравнению с объёмом сосуда.

13. Чему равна плотность водяного пара, если при температуре  $7\text{ }^{\circ}\text{C}$  насыщенный водяной пар оказывает давление  $1\text{ кПа}$ ?
14. Используя таблицу зависимости давления насыщенного водяного пара от температуры, найдите температуру кипения воды при внешнем давлении  $47,3\text{ кПа}$ .
15. Чему равна относительная влажность воздуха, если:
  - а) сухой термометр психрометра показывает  $25\text{ }^{\circ}\text{C}$ , а разность показаний сухого и влажного термометров составляет  $2\text{ }^{\circ}\text{C}$ ;
  - б) влажный термометр психрометра показывает  $26\text{ }^{\circ}\text{C}$ , а разность показаний сухого и влажного термометров составляет  $4\text{ }^{\circ}\text{C}$ ;
  - в) сухой термометр психрометра показывает  $20\text{ }^{\circ}\text{C}$ , а показания влажного термометра равны  $17\text{ }^{\circ}\text{C}$ ?
16. Парциальное давление водяного пара при температуре  $20\text{ }^{\circ}\text{C}$  равно  $1,5\text{ кПа}$ . Чему равна относительная влажность воздуха?
17. Чему равно парциальное давление водяного пара, если при температуре  $30\text{ }^{\circ}\text{C}$  относительная влажность воздуха составляет  $40\text{ }%$ ?
18. Когда температура воздуха была равна  $30\text{ }^{\circ}\text{C}$ , относительная влажность воздуха составляла  $80\text{ }%$ . Чему будет равна относительная влажность воздуха, если его нагреть на  $20\text{ }^{\circ}\text{C}$ ?
19. Является ли водяной пар, находящийся при температуре  $15\text{ }^{\circ}\text{C}$ , насыщенным, если его парциальное давление равно  $1,23\text{ кПа}$ ? Какова точка росы для этого пара?
20. После того, как в стакан, стоящий на столе в комнате, температура воздуха в которой равна  $20\text{ }^{\circ}\text{C}$ , налили холодную воду, стенки стакана запотели. Чему может быть равна температура воды, налитой в стакан, если относительная влажность воздуха в комнате составляет  $53\text{ }%$ ?

### Повышенный уровень

21. В запаянном сосуде, объём которого равен  $1,1\text{ л}$ , содержится  $100\text{ г}$  кипятка и водяной пар при температуре  $100\text{ }^{\circ}\text{C}$ . Чему равна масса водяного пара?
22. В сосуде объёмом  $3\text{ м}^3$  содержится насыщенный водяной пар при температуре  $18\text{ }^{\circ}\text{C}$ . Чему равно число молекул водяного пара в этом сосуде?
23. В герметично закрытом сосуде объёмом  $10\text{ л}$  содержится насыщенный водяной пар при температуре  $80\text{ }^{\circ}\text{C}$ . Содержимое сосуда охлаждают на  $70\text{ }^{\circ}\text{C}$ .
  - а) Чему равно начальное давление пара?

- б) Чему равна начальная масса насыщенного водяного пара?  
 в) Чему равно конечное давление пара в сосуде?  
 г) Чему равна конечная масса водяного пара?  
 д) Чему равна масса воды в сосуде в конечном состоянии?
24. Как изменятся давление насыщенного водяного пара в сосуде, его плотность и концентрация молекул, если объём сосуда уменьшить с 13 до 3 л при неизменной температуре, равной 60 °С? Какая масса водяного пара сконденсируется при этом?
25. Чему равна масса водяного пара, содержащегося в воздухе в комнате объёмом 60 м<sup>3</sup> при температуре 20 °С, если относительная влажность воздуха равна 60 %?
26. В закрытом сосуде объёмом 5 л находится воздух при температуре 40 °С и относительной влажности 80 %. Какая масса воды образуется в сосуде, если его охладить до 20 °С?

### Высокий уровень

27. В закрытом сосуде объёмом 0,01 м<sup>3</sup> находится сухой воздух при температуре 10 °С и давлении 100 кПа. Чему станет равно давление в сосуде, если в него налить 10 г воды, а сосуд нагреть до 100 °С?
28. В цилиндрическом сосуде под поршнем содержится воздух при температуре 10 °С и относительной влажности 60 %.
- а) Чему станет равна влажность воздуха, если воздух в сосуде нагреть до 100 °С, а его объём уменьшить в 4 раза?  
 б) Как изменится ответ, если начальная температура воздуха была равна 80 °С?
29. В сосуде под поршнем содержится водяной пар. Поршень медленно вдвигают в сосуд, при этом температура содержимого сосуда остаётся постоянной. По графику зависимости давления пара от его объёма (рис. 29.5) определите:

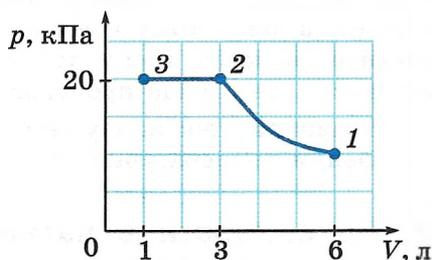


Рис. 29.5

- а) температуру, при которой происходил процесс 1—2;  
 б) массу пара в начальном состоянии;  
 в) массу воды в конечном состоянии.

30. В помещение надо подать  $10^4$  м<sup>3</sup> воздуха при температуре 20 °С и относительной влажности 50 %. Осушать или увлажнять придётся наружный воздух, находящийся при температуре 10 °С и относительной влажности 60 %? Какой объём воды для этого потребуется испарить или сконденсировать?

## § 30. Свойства жидкостей и твёрдых тел

### 1. Модель строения жидкостей

В предыдущих параграфах этой главы мы рассматривали в основном свойства газов. В этом параграфе мы кратко рассмотрим свойства твёрдых тел и жидкостей.

Начнём с жидкостей. Молекулы в жидкости расположены почти вплотную: это следует из того факта, что жидкости практически несжимаемы.

Модель строения жидкостей предложил советский учёный Я. И. Френкель. Её справедливость подтверждена опытами.

Согласно модели Френкеля в расположении молекул жидкости есть только «ближний порядок», проявляющийся в том, что молекулы, *ближайшие* к данной, располагаются в некотором порядке, однако отсутствует «дальний порядок»: на расстояниях, превышающих размеры молекулы в несколько раз, упорядоченности в расположении молекул нет.

Большую часть времени каждая молекула жидкости колеблется около своего положения равновесия под действием сил притяжения и отталкивания со стороны молекул-соседей, но время от времени она «перескакивает» в новое положение равновесия. Эти перескоки происходят в действительности очень часто, и именно ими обусловлено главное свойство жидкости — *текучесть*. Чем выше температура жидкости, тем чаще происходят указанные перескоки.

- ° 1. Увеличивается или уменьшается текучесть жидкости при повышении температуры?

### 2. Поверхностное натяжение

На границе с газом (например, воздухом) жидкость образует так называемую *свободную поверхность*. Поверхностный слой жидкости немного «растянут»: молекулы в этом слое расположены чуть-чуть дальше друг от друга, чем в толще жидкости. Вследствие «растянутости» поверхностного слоя жидкости молекулы в этом слое

обладают *избыточной энергией* по сравнению с молекулами в толще жидкости. Эту энергию называют *поверхностной энергией*.

Поверхностная энергия  $E_{\text{пов}}$  пропорциональна площади  $S$  свободной поверхности жидкости:

$$E_{\text{пов}} = \sigma S.$$

Коэффициент пропорциональности  $\sigma$  называют *поверхностным натяжением* данной жидкости.

Если выпустить воздух из воздушного шарика, площадь его поверхности значительно уменьшится вследствие того, что потенциальная энергия упругой деформации стремится к минимуму. Аналогично этому и жидкость при прочих равных условиях принимает форму, при которой площадь её свободной поверхности минимальна.

Именно этим объясняется то, что небольшие капли жидкости имеют шарообразную форму.

Такая форма капле обусловлена тем, что при заданном объёме тела наименьшую площадь поверхности имеет *шар*. Эту «естественную» форму жидкости можно наблюдать только для достаточно малых каплей: большие капли растекаются по поверхности вследствие действия силы тяжести, а для маленькой капли роль поверхностного натяжения более существенна, чем сила тяжести.

° 2. Почему мыльные пузыри круглые?

## Смачивание и несмачивание

### Поставим опыт

Поместим каплю воды на чисто вымытое стекло. Капля *растечётся* по стеклу. Это обусловлено тем, что молекулы воды сильнее притягиваются к молекулам, из которых состоит стекло, чем друг к другу.

Если молекулы жидкости притягиваются к молекулам некоторого вещества сильнее, чем друг к другу, говорят, что жидкость *смачивает* данное вещество. Таким образом, наш опыт показывает, что вода смачивает стекло.

А теперь поместим каплю воды на стекло, покрытое тонким слоем жира (например, сливочного масла). Мы увидим, что на этот раз капля *не растекается* по поверхности. В таком случае говорят, что жидкость *не смачивает* поверхность тела.

° 3. Какой вывод о силах взаимодействия молекул воды друг с другом и молекулами жира можно сделать из этого опыта? Смачивает ли вода жир?

4. Опыт показывает, что капельки ртути, помещённые на стекло, не растекаются по стеклу.

а) Смачивает ли ртуть стекло?

- б) Почему лежащие на несмачиваемой поверхности капельки стремятся собраться в более крупные капли?

### Капиллярные явления

#### Поставим опыт

Опустим в сосуд с водой тонкие стеклянные трубки. Мы увидим, что вода поднимается внутри трубок, причём чем меньше внутренний диаметр трубки, тем выше поднимается вода (схема опыта показана на рисунке 30.1).

Это явление называют *капиллярностью*, так как тонкие трубки называют *капиллярами*<sup>1)</sup>. Капиллярность обусловлена тем, что вода смачивает чистое стекло.

Капиллярность играет огромную роль в жизни растений: например, отчасти благодаря этому вода поднимается из почвы по стеблям. Это явление очень важно и для нас: благодаря ему кровь доносит кислород до всех клеток тела по мельчайшим сосудам, которые тоже называют капиллярами.

- ° 5. Почему при строительстве дома необходимо проложить между фундаментом и стенами гидроизолирующие материалы?

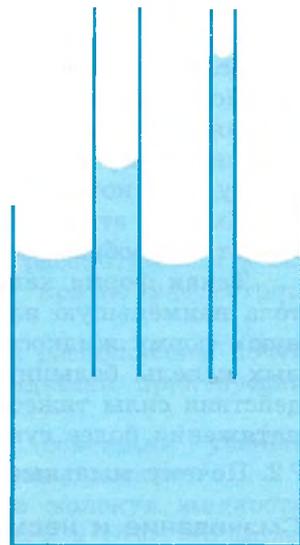


Рис. 30.1

### \*3. Модель строения твёрдых тел

Твёрдые тела бывают *кристаллическими* и *аморфными*. Рассмотрим сначала кристаллы.

#### Кристаллы

Примерами кристаллов являются поваренная соль, алмаз, металлы.

В кристаллах атомы или молекулы расположены *упорядоченно*, образуя *кристаллическую решётку*.

Поэтому говорят, что в кристаллических телах существует *дальний порядок* в расположении атомов. Например, в кристалле поваренной соли атомы натрия и хлора строго чередуются, располагаясь в вершинах куба.

1) От латинского слова «капиллярис» — волос.

На рисунке 30.2 схематически изображена кристаллическая решётка поваренной соли (NaCl).

Ионы натрия и хлора для наглядности условно обозначены шариками разных цветов и диаметров. В кристалле эти атомы расположены практически вплотную друг к другу.

Что же «заставляет» атомы выстраиваться в таком порядке? Ответ на этот вопрос даёт следующий опыт.

### Поставим опыт

Поместим на вогнутое часовое стекло одинаковые маленькие металлические шарики и будем слегка потряхивать стекло. Шарики вскоре расположатся в строгом порядке, напоминающем расположение атомов в кристалле (рис. 30.3).

Разгадка упорядочения шариков состоит в том, что на вогнутом стекле они располагаются в самом низком положении, которому соответствует *минимальное значение потенциальной энергии шариков*.

По той же самой причине упорядочиваются и атомы кристалла: они занимают положение, соответствующее минимальному значению потенциальной энергии взаимодействия атомов.

Опыты показывают, что кристаллические тела плавятся при определённой температуре, называемой *температурой плавления*. Более подробно мы рассмотрим это, когда будем изучать фазовые переходы.

### Аморфные тела

Примерами аморфных тел являются смола и стекло.

В аморфных телах сохраняется порядок в расположении только ближайших «соседей», поэтому говорят, что

в аморфных телах есть «ближний порядок» в расположении атомов и молекул.

Из-за наличия только ближнего порядка атомы или молекулы в аморфных телах время от времени «перескакивают» из одного положения в другое. Если на аморфное тело действуют внешние силы,

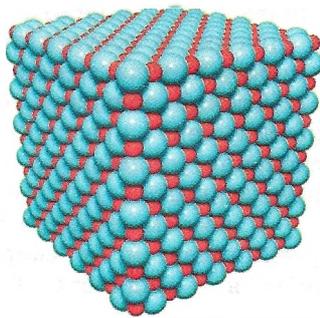


Рис. 30.2

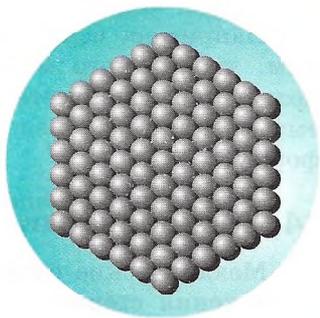


Рис. 30.3

«перескоки» молекул в одном направлении происходят чаще, чем в других. В результате форма тела постепенно изменяется, то есть аморфные тела обладают *текучестью*<sup>1)</sup>.

Стекло обладает текучестью даже при комнатной температуре, хотя и течёт чрезвычайно медленно: например, оконные стёкла постепенно утолщаются книзу, но это заметно только в окнах старинных зданий.

С ростом температуры частота перескоков молекул или атомов увеличивается, и аморфное тело, *постепенно размягчаясь*, превращается в жидкость. Таким образом, в отличие от кристаллов,

аморфные тела не имеют определённой температуры плавления.

Например, если стекло нагреть, оно становится настолько мягким, что из него можно лепить. Это свойство стекла широко используется в искусстве и в стеклодувном производстве — благодаря ему стеклянным изделиям можно придавать практически любую форму.

#### \*4. Механические свойства твёрдых тел

Механические свойства твёрдого тела мы рассмотрим на примере растяжения стержня.

При растяжении стержня возникает уже знакомая нам сила упругости. Если растяжение достаточно мало (ниже мы остановимся на этом подробнее), модуль силы упругости  $F$  стержня прямо пропорционален удлинению стержня  $\Delta l$ :

$$F = k\Delta l.$$

Коэффициент пропорциональности  $k$  называют *жёсткостью* стержня.

Опыт показывает, что жёсткость стержня  $k$  прямо пропорциональна площади  $S$  его поперечного сечения и обратно пропорциональна длине  $l$ . Поэтому написанную выше формулу можно переписать в виде

$$F = ES \frac{\Delta l}{l}.$$

Коэффициент  $E$  в этой формуле называют *модулем Юнга* в честь английского учёного Т. Юнга. Единицу модуля Юнга мы рассмотрим ниже.

1) Потому такие тела и названы аморфными: по-гречески «аморфос» — не имеющий формы.

Модуль Юнга, в отличие от жёсткости, характеризует не данный стержень, а *вещество*, из которого он изготовлен.

При рассмотрении механических свойств твёрдых тел часто используют такие физические величины как механическое напряжение и относительное удлинение.

*Механическим напряжением*  $\sigma$  (или просто напряжением) стержня называют отношение модуля силы упругости  $F$  к площади поперечного сечения стержня  $S$ :

$$\sigma = \frac{F}{S}.$$

6. В каких единицах измеряется механическое напряжение?

Относительным удлинением  $\varepsilon$  называют отношение удлинения стержня  $\Delta l$  к его длине  $l$ :

$$\varepsilon = \frac{\Delta l}{l}.$$

7. В каких единицах измеряется относительное удлинение?

8. Докажите, что справедлива формула

$$\sigma = E\varepsilon.$$

9. В каких единицах измеряется модуль Юнга?

10. Алюминиевый стержень длиной 50 см и площадью поперечного сечения 5 мм<sup>2</sup> растягивают силой 350 Н. Модуль Юнга для алюминия 70 ГПа.

а) Чему равно механическое напряжение стержня  $\sigma$ ?

б) Чему равно относительное удлинение стержня  $\varepsilon$ ?

в) Чему равно удлинение стержня  $\Delta l$ ?

### Похожая задача

11. Стальная вертикальная опора в виде цилиндрической колонны высотой 2 м должна выдерживать нагрузку  $10^6$  Н, причём сжатие опоры не должно превышать 2 мм. Каков минимально допустимый диаметр  $d$  колонны? Модуль Юнга для стали примите равным 200 ГПа.



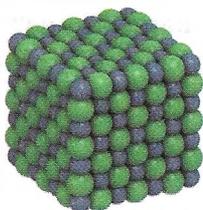
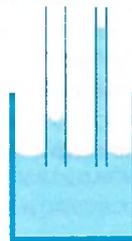
## ЧТО МЫ УЗНАЛИ

Поверхностная энергия

$$E_{\text{пов}} = \sigma S$$

$\sigma$  — поверхностное натяжение

Капиллярные явления при смачивании



В кристаллах атомы или молекулы расположены упорядоченно, образуя *кристаллическую решётку*.

В аморфных телах есть «ближний порядок» в расположении атомов и молекул

Механические свойства твёрдых тел

$$F = ES \frac{\Delta l}{l}$$

$$\sigma = \frac{F}{S}$$

$$\sigma = E\varepsilon$$

$$\varepsilon = \frac{\Delta l}{l}$$

$E$  — модуль Юнга

$\sigma$  — механическое напряжение

$\varepsilon$  — относительное удлинение



## ДОПОЛНИТЕЛЬНЫЕ ВОПРОСЫ И ЗАДАНИЯ

### Повышенный уровень

12. Чему равен диаметр стального стержня, если при силе 25 кН механическое напряжение в нём составляет  $6 \cdot 10^7$  Па?
13. Стальную проволоку длиной 3,6 м и площадью поперечного сечения  $10^{-6}$  м<sup>2</sup> растягивают, прикладывая некоторую силу  $\vec{F}$ . Чему равен модуль этой силы, если проволока удлинилась на 2 мм, а модуль Юнга для стали равен 200 ГПа?
14. К медной проволоке подвешен груз массой 5 кг. Чему равны механическое напряжение в проволоке и её относительное удлинение, если площадь её поперечного сечения равна 0,5 мм<sup>2</sup>, а модуль Юнга для меди 120 ГПа?

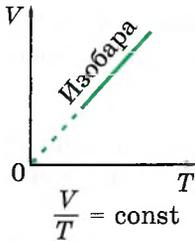
ГЛАВНОЕ В ГЛАВЕ V

**Основные положения молекулярно-кинетической теории**

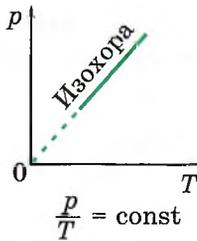
- вещество состоит из атомов и молекул;
- атомы и молекулы движутся непрерывно и хаотично;
- атомы и молекулы взаимодействуют друг с другом

**Изопроцессы**

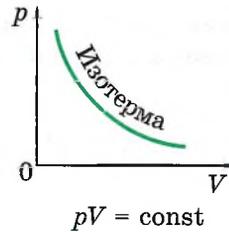
при  $p = \text{const}$



при  $V = \text{const}$



при  $T = \text{const}$



**Уравнение Менделеева — Клапейрона**

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

$$pV = \nu RT$$

**Основное уравнение**

**молекулярно-кинетической теории идеального газа**

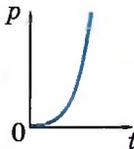
$$p = \frac{1}{3} nm_0 \bar{v}^2$$

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

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

$$\bar{v} = \sqrt{\frac{3RT}{M}}$$

**Зависимость давления насыщенного пара от температуры**



**Относительная влажность воздуха**

$$\varphi = \frac{p}{p_H} 100 \%$$

**Поверхностная энергия**

$$E_{\text{пов}} = \sigma S$$

$\sigma$  — поверхностное натяжение

**Механические свойства твёрдых тел**

$$\sigma = \frac{F}{S}$$

$$\sigma = E \varepsilon$$

$$\varepsilon = \frac{\Delta l}{l}$$

# Глава VI. ТЕРМОДИНАМИКА

## § 31. Первый закон термодинамики

### 1. Внутренняя энергия и способы её изменения

С понятием внутренней энергии тела вы уже познакомились в курсе физики основной школы при изучении тепловых явлений. Напомним:

*внутренней энергией* называют сумму кинетической энергии хаотического движения частиц и потенциальной энергии их взаимодействия между собой.

Будем обозначать внутреннюю энергию  $U$ .

#### Два способа изменения внутренней энергии тела

Напомним, какими способами можно изменять внутреннюю энергию тела.

##### Посредством совершения работы

Потрите друг о друга два деревянных бруска — они *нагреются*. Значит, их внутренняя энергия *увеличилась* благодаря совершённой вами *работе*.

Когда вы накачиваете велосипедное колесо, насос нагревается вследствие *нагревания* воздуха при сжатии. Увеличение внутренней энергии воздуха также происходит благодаря совершённой вами работе.

##### Посредством теплопередачи

Внутреннюю энергию тела можно изменить и без совершения работы. Например, брусок можно *нагреть*, положив его на горячую батарею отопления (рис. 31.1): внутренняя энергия бруска *увеличится* вследствие *теплопередачи*<sup>1)</sup>.

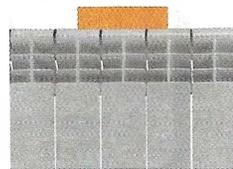


Рис. 31.1

Меру изменения внутренней энергии тела при теплопередаче называют *количеством теплоты* и обозначают  $Q$ .

*Единица количества теплоты* в СИ такая же, как и единица энергии, то есть *джоуль* (Дж).

1) Теплопередачу называют также *теплообменом*.

### Какими формулами выражается количество теплоты?

При изучении тепловых явлений в курсе физики основной школы вы встречались с формулами

$$Q = cm(t_k - t_n),$$

$$Q = qm.$$

- ° 1. Что обозначает каждая буква в приведённых формулах?
- ° 2. Какое количество теплоты надо передать двум литрам воды, чтобы нагреть воду от 0 °С до температуры кипения? Оцените, на какой этаж можно было бы поднять всех учеников вашего класса, совершив работу, равную этому количеству теплоты.

Удельная теплоёмкость воды  $4,2 \frac{\text{кДж}}{\text{кг} \cdot ^\circ\text{С}}$ .

- ° 3. Какое количество теплоты выделяется при сгорании 1 кг бензина? Оцените, на какую высоту можно было бы поднять легковой автомобиль, совершив работу, равную этому количеству теплоты. Удельная теплота сгорания бензина  $44 \cdot 10^6 \text{ Дж/кг}$ .

## 2. Как внутреннюю энергию частично превратить в механическую?

Решив предыдущие задачи, вы могли убедиться, как велика внутренняя энергия тел. *Можно ли хотя бы часть внутренней энергии превратить в механическую?*

Казалось бы, это невозможно: в большинстве явлений, которые мы наблюдаем вокруг себя, происходит противоположный процесс — механическая энергия превращается во внутреннюю вследствие трения.

Но человек всё-таки догадался, как можно частично превратить внутреннюю энергию в механическую! Для этого он использовал замечательное свойство газа.

### Поставим опыт

В цилиндрическом сосуде под массивным поршнем находится газ (рис. 31.2, а).

Зажжём огонь под сосудом. При сгорании топлива его *внутренняя энергия*<sup>1)</sup> *уменьшается*, при этом выделяется некоторое количество теплоты.

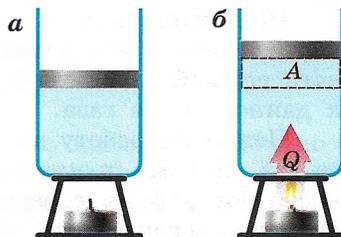


Рис. 31.2

1) Внутренняя энергия топлива — это потенциальная энергия взаимодействия атомов в молекулах. При сгорании топлива происходит химическая реакция, в результате которой потенциальная энергия взаимодействия атомов в молекулах уменьшается.

Часть его посредством теплопередачи передаётся газу (рис. 31.2, б). Нагреваясь, газ *расширяется* и *поднимает* массивный поршень, совершая *механическую работу*: механическая энергия поршня при подъёме *увеличивается!*

Мы повторили одно из самых великих изобретений за всю историю человечества — «изобрели» *тепловой двигатель*, в котором *внутренняя энергия топлива превращается частично в механическую энергию*. Появление тепловых двигателей изменило ход мировой истории.

Главная особенность теплового двигателя состоит в том, что работу в нём совершает *расширяющийся газ*. В отличие от жидкостей и твёрдых тел газ может *значительно изменять свой объём* (в десятки раз!). При *расширении* газ совершает *механическую работу*.

«Работающий» в тепловом двигателе газ так и называют: *рабочее тело*. На работе газа при расширении основано действие всех тепловых двигателей — от моторов автомобилей до турбин электростанций. Действие тепловых двигателей мы рассмотрим подробнее в одном из следующих параграфов.

### 3. Первый закон термодинамики

Раздел физики, изучающий превращения энергии в тепловых процессах, называют *термодинамикой*. Основы термодинамики заложил в начале 19-го века французский учёный и инженер С. Карно в работе «Размышления о движущей силе огня и о машинах, способных развивать эту силу».

Закон сохранения энергии применительно к тепловым явлениям называют *первым законом термодинамики*. Согласно этому закону изменение внутренней энергии тела  $\Delta U$  равно сумме количества теплоты  $Q$ , переданного телу, и работы  $A$ , совершённой *над* телом:

$$\Delta U = Q + A.$$

При использовании первого закона термодинамики «телом» является обычно некоторая масса *газа*<sup>1)</sup>. Поэтому мы будем рассматривать первый закон термодинамики главным образом применительно к данной массе газа.

Полезную работу в тепловом двигателе совершает расширяющийся газ, поэтому практический интерес представляет *работа газа*. Так называют работу, совершаемую силой давления газа (например, на поршень, соединённый передаточным механизмом с ведущим колесом автомобиля).

Работа газа  $A_r$  равна по модулю работе  $A$ , совершённой над газом внешними силами, но имеет противоположный знак:  $A_r = -A$ . Используя эту замену в написанной выше формуле, *первый закон*

1) Напомним, что именно газ является рабочим телом в тепловых двигателях.

*термодинамики* применительно к газовым процессам формулируют так:

количество теплоты, переданное газу, равно сумме изменения внутренней энергии  $\Delta U$  газа и работы  $A_r$ , совершённой газом:

$$Q = \Delta U + A_r.$$

## 4. Адиабатный процесс

### Поставим опыт

Поместим кусочек ваты в толстостенный прозрачный цилиндр<sup>1)</sup>. Если *резким* толчком вдвинуть в цилиндр поршень, то вата *воспламенится* (рис. 31.3)!

Объяснить этот опыт можно с помощью первого закона термодинамики, который в данном случае удобнее записать в виде

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

где  $A$  — работа внешних сил.

В нашем опыте сжатие газа произошло настолько быстро (толчок был *резким!*), что теплообмен с окружающей средой не успел произойти. Поэтому можно принять, что  $Q = 0$ . В таком случае изменение внутренней энергии газа равно работе внешних сил. Если эта работа достаточно велика (напомним, что толчок был резким, то есть мы прикладывали довольно большую силу!), повышение температуры газа вследствие увеличения его внутренней энергии оказывается достаточным, чтобы зажечь вату.

Нагревание газа при резком сжатии используют в дизельных двигателях: при сжатии горючая смесь в цилиндре нагревается настолько, что воспламеняется *без искры*.

Газовый процесс, который происходит без теплообмена со внешней средой, называют *адиабатным*.

Адиабатным можно считать также процесс, когда теплообменом можно пренебречь: например, если процесс происходит за время, в течение которого теплообмен с окружающей средой не успевает произойти (как в описанном выше опыте).

° 4. Как изменяется температура газа при адиабатном сжатии и при адиабатном расширении?

5. Попробуйте объяснить образование облаков.

<sup>1)</sup> Можно смочить ватку бензином или спиртом.



Рис. 31.3

- ° 6. При адиабатном расширении данной массы газа газ совершил работу, равную 200 Дж. Чему равно изменение внутренней энергии газа?
- ° 7. На рисунке 31.4 приведены графики зависимости  $p(V)$  для данной массы газа при изотермическом и адиабатном расширении. Какой график описывает адиабатное расширение?

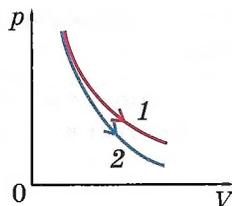


Рис. 31.4

## 5. Следствия первого закона термодинамики для изопроцессов

### Изотермический процесс



- ° 8. Изменяется ли внутренняя энергия данной массы газа в изотермическом процессе?
- ° 9. Запишите первый закон термодинамики для изотермического процесса.
- ° 10. Какой знак имеет работа газа при изотермическом расширении? при изотермическом сжатии?
- ° 11. Получает или отдаёт газ некоторое количество теплоты при изотермическом расширении? изотермическом сжатии?

### Изохорный процесс



- ° 12. Совершает ли газ работу при изохорном процессе?
- ° 13. Запишите первый закон термодинамики для изохорного процесса.
- ° 14. Как изменяется внутренняя энергия данной массы газа при изохорном нагревании? при изохорном охлаждении?
- ° 15. Получает или отдаёт газ некоторое количество теплоты при изохорном нагревании? при изохорном охлаждении?

### Изобарный процесс



- ° 16. Как изменяется внутренняя энергия данной массы газа при изобарном нагревании? при изобарном охлаждении?
- ° 17. Какой знак имеет работа газа при изобарном нагревании? при изобарном охлаждении?
- ° 18. Получает или отдаёт газ некоторое количество теплоты при изобарном нагревании? изобарном охлаждении?

### Адиабатный процесс



- ° 19. Получает или отдаёт газ некоторое количество теплоты в адиабатном процессе?

- °20. Запишите первый закон термодинамики для адиабатного процесса.
- °21. Какой знак имеет работа газа при адиабатном расширении? при адиабатном сжатии?
- °22. Как изменяется внутренняя энергия данной массы газа при адиабатном расширении? при адиабатном сжатии?

## ЧТО МЫ УЗНАЛИ

Два способа  
изменения  
внутренней энергии

$A$        $Q$

**Первый закон  
термодинамики**

$$\Delta U = Q + A$$

$$Q = \Delta U + A_T$$

## ? ДОПОЛНИТЕЛЬНЫЕ ВОПРОСЫ И ЗАДАНИЯ<sup>1)</sup>

### Базовый уровень

23. По графику зависимости температуры двух тел массой по 100 г от переданного им количества теплоты (рис. 31.5) определите, чему равна удельная теплоёмкость вещества, из которого изготовлено каждое тело.
24. Чему равна температура смеси 37 л воды, взятой при температуре 20 °С, и 20 л воды, взятой при температуре 60 °С?
25. Медный цилиндр вынули из кипятка и погрузили в воду, масса которой равна массе цилиндра. Чему была равна начальная температура воды, если при тепловом равновесии температура стала равной 30 °С?
26. Какую работу совершил газ данной массы, если его внутренняя энергия уменьшилась на 300 Дж и при этом газ отдал количество теплоты 300 Дж?

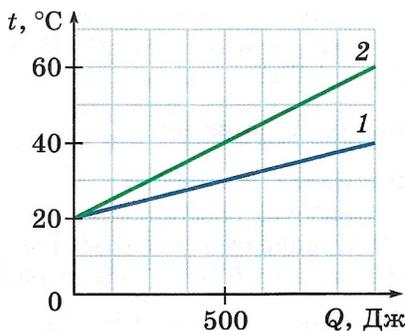


Рис. 31.5

<sup>1)</sup> В задачах этого параграфа предполагается, что теплообменом с окружающей средой можно пренебречь (если иное не оговорено в условии).

27. Насколько изменилась внутренняя энергия данной массы газа, если газ получил 300 Дж количества теплоты и совершил при этом работу 200 Дж?
28. Какую работу совершила данная масса газа при адиабатном расширении, если внутренняя энергия газа при этом уменьшилась с 300 до 150 Дж?
29. Какую работу совершил газ данной массы, если его внутренняя энергия увеличилась от 100 до 500 Дж и при этом газу передали количество теплоты 2 кДж?

### Повышенный уровень

30. Данная масса газа в некотором изопроцессе совершила работу 300 Дж. При этом количество теплоты, полученное газом, оказалось тоже равным 300 Дж. Каким был данный газовый процесс?
31. Количество теплоты, отданное данной массой газа в некотором изопроцессе, равно 500 Дж. При этом внутренняя энергия газа уменьшилась тоже на 500 Дж. Каким изопроцессом был данный газовый процесс?
32. Чему стала равной внутренняя энергия данной массы газа, если при изохорном нагревании газ получил количество теплоты, равное 6 кДж? Начальная внутренняя энергия газа равна 1 кДж.

### Высокий уровень

33. Какое количество теплоты получила данная масса газа, если работа, совершённая газом, равна 200 Дж, а полученное газом количество теплоты в 3 раза больше изменения его внутренней энергии? Чему равно изменение внутренней энергии газа?
34. Чтобы определить удельную теплоёмкость вещества, тело из этого вещества массой 0,4 кг, нагретое до температуры 100 °С, опустили в железный стакан калориметра массой 0,1 кг, содержащий 200 мл воды при температуре 30 °С. Чему равна удельная теплоёмкость вещества, если после установления теплового равновесия температура оказалась равной 40 °С?
35. По трубе внутренним диаметром 15 мм течёт вода. Чему равна скорость течения воды в трубе, если ей каждую секунду сообщают 50 кДж количества теплоты и при этом вода нагревается на 25 °С?

## § 32. Применение первого закона термодинамики к газовым процессам

### 1. Изменение внутренней энергии газа

Чтобы использовать первый закон термодинамики

$$Q = \Delta U + A_r,$$

нужно уметь находить выражения для изменения внутренней энергии газа  $\Delta U$  и работы газа  $A_r$ .

Начнём с внутренней энергии газа. В модели идеального газа потенциальной энергией взаимодействия между молекулами пренебрегают, поэтому внутренняя энергия  $U$  газа равна суммарной кинетической энергии всех молекул в данном образце газа, то есть произведению средней кинетической энергии  $\bar{E}$  одной молекулы на число молекул  $N$ :

$$U = \bar{E}N.$$

Мы уже знаем, что средняя кинетическая энергия *поступательного* движения молекул газа выражается формулой

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

где  $k$  — постоянная Больцмана, а  $T$  — абсолютная температура.

Кинетическая энергия молекулы является суммой кинетических энергий поступательного и вращательного движений. Расчёты, выходящие за рамки нашего курса, показывают, что для *одноатомных* молекул кинетическую энергию вращательного движения учитывать не нужно, поэтому для таких газов (напомним, что одноатомными являются все *инертные газы*) средняя кинетическая энергия молекул равна средней кинетической энергии их поступательного движения:

$$\bar{E} = \bar{E}_{\text{пост}}.$$

○ 1. Докажите, что внутренняя энергия *одноатомного* идеального газа выражается формулой

$$U = \frac{3}{2} \nu RT.$$

Отсюда следует, что *изменение внутренней энергии одноатомного идеального газа* при изменении температуры от  $T_H$  до  $T_K$  выражается формулой

$$\Delta U = \frac{3}{2} \nu R \Delta T,$$

где  $\Delta T = T_K - T_H$ .





° 2. Два моля гелия нагрели от 300 до 500 °С. Как изменилась внутренняя энергия газа?

° 3. В баллоне, погружённом в воду с тающим льдом, содержится неон. После того как баллон погрузили в кипяток, внутренняя энергия газа увеличилась на 500 Дж.

а) Чему равно количество вещества в газе?

б) Чему равна масса неона?

Из приведённой выше формулы для внутренней энергии газа следует, что *внутренняя энергия газа зависит только от его температуры и количества вещества*. Однако при решении многих задач нужно найти изменение внутренней энергии при некотором изменении давления и объёма газа. Поэтому полезно знать, как выражается внутренняя энергия через давление и объём газа.



° 4. Докажите, что внутреннюю энергию одноатомного идеального газа можно найти по формуле

$$U = \frac{3}{2}pV.$$

Из этой формулы следует, что *изменение* внутренней энергии одноатомного газа можно выразить формулой

$$\Delta U = \frac{3}{2}\Delta(pV).$$

Обратите внимание:  $\Delta(pV)$  — это изменение *произведения* давления на объём. Обозначим давление и объём газа в состоянии 1 соответственно  $p_1$  и  $V_1$ , а в состоянии 2 —  $p_2$  и  $V_2$ . Тогда при переходе газа из состояния 1 в состояние 2 изменение произведения давления на объём можно найти по формуле

$$\Delta(pV) = p_2V_2 - p_1V_1.$$

Следовательно, *изменение* внутренней энергии одноатомного газа выражается формулой

$$\Delta U = \frac{3}{2}(p_2V_2 - p_1V_1).$$

Применим эту формулу к некоторым газовым процессам.



° 5. Запишите выражение для изменения внутренней энергии данной массы одноатомного идеального газа при изобарном расширении, если начальное давление газа равно  $p_0$ , а объём газа увеличился от  $V_0$  до  $3V_0$ .

° 6. Чему равно изменение внутренней энергии 2 л аргона при изохорном охлаждении, если начальное давление газа было в 3 раза больше нормального атмосферного давления, а конечное — равно нормальному атмосферному давлению?

7. В вертикальном цилиндрическом сосуде под лёгким подвижным поршнем площадью 5 см<sup>2</sup> находится криптон. Давление

над поршнем равно 200 кПа. Начальный объём газа равен 5 л. Давление над поршнем увеличили на 200 кПа и нагрели газ так, что его объём стал равным 10 л.

- а) Чему равно начальное значение внутренней энергии газа?
- б) Чему равно конечное значение внутренней энергии газа?
- в) Чему равно изменение внутренней энергии газа при переходе из начального состояния в конечное?

**\*Внутренняя энергия многоатомного газа**

Кинетическая энергия молекулы *многоатомного* газа является суммой кинетической энергии поступательного движения молекулы и кинетической энергии её вращательного движения. Расчёт, выходящий за рамки нашего курса, показывает, что средняя кинетическая энергия молекул *двухатомного* газа (в частности, азота и кислорода, из которых в основном состоит воздух) выражается формулой

$$\bar{E} = \frac{5}{2}kT.$$

Следовательно, внутреннюю энергию *двухатомного* газа

можно найти по формулам:

$$U = \frac{5}{2}\nu RT \text{ или } U = \frac{5}{2}pV.$$

8. Чему равна внутренняя энергия  $U$  воздуха в комнате площадью  $S = 20 \text{ м}^2$  и высотой  $h = 3 \text{ м}$  при температуре  $t = 20 \text{ }^\circ\text{C}$  и нормальном атмосферном давлении  $p$  (равном  $10^5 \text{ Па}$ )? На какую высоту можно поднять автомобиль массой 1 т, затратив такую энергию? Есть ли в условии лишние данные?

Полученный ответ может удивить: ведь кажется, что комната «пуста»!

**2. Работа газа**

Проще всего найти работу газа при изобарном расширении. Пусть газ изобарно расширяется под поршнем (рис. 32.1). Обозначим давление газа  $p$ , площадь поршня  $S$ . Тогда модуль силы давления газа  $F = pS$ .

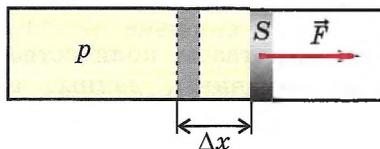


Рис. 32.1

9. Докажите, что при изобарном расширении работа газа выражается формулой

$$A_T = p \cdot \Delta V.$$

- °10. Докажите, что в изобарном процессе работа газа численно равна площади фигуры под графиком зависимости давления от объёма (рис. 32.2).

Покажем, что это замечательное свойство графика зависимости  $p(V)$  сохраняется и тогда, когда давление газа *изменяется* (рис. 32.3).

Разобьём мысленно весь процесс расширения газа на последовательность процессов, при каждом из которых давление газа практически не изменяется, — это разбиение обозначено пунктирными линиями на рисунке 32.3. Для каждого процесса из этой последовательности работа газа численно равна площади соответствующей узкой полоски на графике. А отсюда следует, что вся работа, совершённая газом при расширении, численно равна площади фигуры под графиком зависимости  $p(V)$ . Обычно рассматриваются задачи, в которых площадь этой фигуры несложно найти: например, если фигура является прямоугольником, треугольником или трапецией.

Запомним: для нахождения работы газа удобнее всего использовать график зависимости давления газа от объёма, то есть  $p(V)$ . Поэтому если в условии задачи спрашивается о работе газа и приведён график газового процесса в координатах  $(p, T)$  или  $(V, T)$ , то первым делом надо изобразить график этого же процесса в координатах  $(p, V)$ .

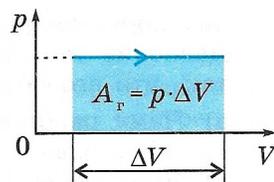


Рис. 32.2

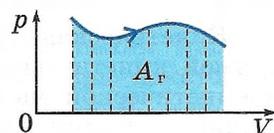


Рис. 32.3

- °11. На рисунке 32.4 изображён график зависимости объёма от температуры для  $\nu$  молей одноатомного газа. Начальная и конечная температуры газа равны соответственно  $T_1$  и  $T_2$ .

- Выразите работу газа через величины, данные в условии.
- Выразите изменение внутренней энергии газа  $\Delta U$  через величины, данные в условии.
- Выразите полученное газом количество теплоты  $Q$  через величины, данные в условии.

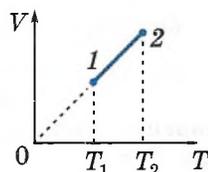


Рис. 32.4

12. Данную массу газа переводят из состояния 1 в состояние 2 двумя различными способами: *a* и *b* (рис. 32.5).

- При каком способе работа газа больше? Во сколько раз больше?

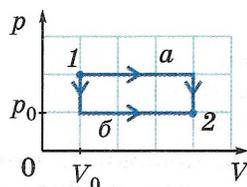


Рис. 32.5

- б) При каком способе изменение внутренней энергии газа больше? Во сколько раз больше?

**Похожая задача**

13. Данную массу газа переводят из состояния 1 в состояние 2 двумя различными способами: *a* и *b* (рис. 32.6). При каком из этих способов переданное газу количество теплоты больше? Во сколько раз больше?

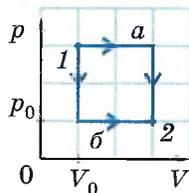


Рис. 32.6

**\*3. Циклические процессы**

*Циклическим процессом* или *циклом* называют газовый процесс, в результате которого газ возвращается в начальное состояние.

Циклические процессы удобнее всего изучать с помощью графиков зависимости давления от объёма, то есть в координатах ( $p, V$ ).

На рисунке 32.7 приведён один из примеров графика циклического процесса в указанных координатах.

При переходе из состояния 1 в состояние 2 (эта часть графика изображена красным) газ *расширялся* и, следовательно, совершал *положительную работу*  $A_{\Gamma}$ .

Эта работа численно равна площади фигуры под данной частью графика (рис. 32.8).

При переходе же из состояния 2 в состояние 1 (эта часть графика изображена синим) газ *сжимался* — при этом работу совершали внешние силы.

Напомним, что при сжатии газа внешними силами площадь фигуры под графиком зависимости  $p(V)$  равна *работе внешних сил*  $A_{\text{внеш}}$  (рис. 32.9).

*Полезной работой* газа  $A_{\text{пол}}$  называют разность работы газа и работы внешних сил:

$$A_{\text{пол}} = A_{\Gamma} - A_{\text{внеш}}.$$

Отсюда следует, что *полезная работа газа численно равна площади фигуры, заключённой внутри цикла в координатах ( $p, V$ )*. Эта фигура закрашена на рисунке 32.10.

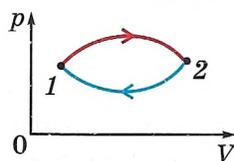


Рис. 32.7

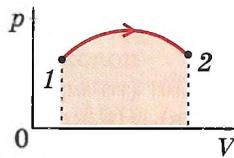


Рис. 32.8

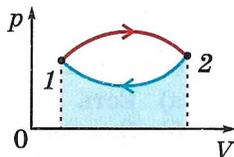


Рис. 32.9

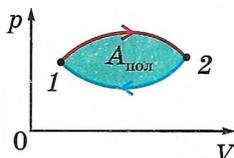


Рис. 32.10



14. На рисунке 32.11 изображён график циклического процесса, состоящий из четырёх этапов:  $a$ ,  $b$ ,  $c$ ,  $d$ .

- На каких этапах внутренняя энергия газа увеличивалась, а на каких — уменьшалась?
- На каком этапе газ совершал положительную работу?
- На каком этапе положительную работу совершали внешние силы?
- На каких этапах газ получал некоторое количество теплоты, а на каких — отдавал?
- Выразите полезную работу газа через приведённые на рисунке значения давления и объёма.

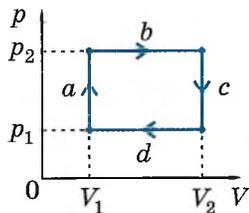


Рис. 32.11

### Похожие задачи



15. На рисунке 32.12 изображён график циклического процесса, происходящего с некоторой массой одноатомного идеального газа. Одним из этапов этого процесса является изотермический процесс, а другим — адиабатный.

- Какой из этапов процесса представляет собой изотермический процесс, а какой — адиабатный?
- На каких этапах процесса работа газа положительна, а на каких этапах работа газа отрицательна (то есть работу совершают над газом)?
- На каких этапах процесса газ получает некоторое количество теплоты, а на каких этапах — отдаёт?

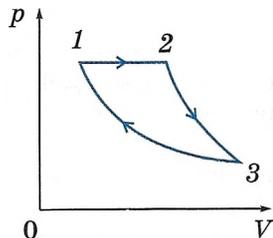


Рис. 32.12

16. Рассмотрим тот же циклический процесс (см. рис. 32.12). Обозначим  $\nu$  количество вещества в одноатомном газе,  $T_1$ ,  $T_2$  и  $T_3$  — значения его абсолютной температуры соответственно в состояниях 1, 2, 3.

- Есть ли среди значений  $T_1$ ,  $T_2$  и  $T_3$  одинаковые?
- Выразите работу газа в изобарном процессе через величины, приведённые в условии.
- Выразите изменение внутренней энергии газа в изобарном процессе через величины, приведённые в условии.
- Выразите количество теплоты, полученное газом в изобарном процессе, через величины, приведённые в условии.
- Выразите работу газа в адиабатном процессе через величины, приведённые в условии.
- Как связаны количество теплоты, отданное газом в изотермическом процессе, с работой внешних сил над газом?

ЧТО МЫ УЗНАЛИ



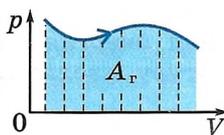
Внутренняя энергия  
одноатомного  
идеального газа

$$U = \frac{3}{2} \nu RT \quad U = \frac{3}{2} pV$$

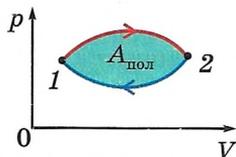
Изменение внутренней энергии  
одноатомного  
идеального газа

$$\Delta U = \frac{3}{2} \nu R \Delta T \quad \Delta U = \frac{3}{2} \Delta(pV)$$

Работа газа



Полезная работа газа



Адиабатный  
процесс

$$Q = 0$$

$$\Delta U = -A_r$$

? ДОПОЛНИТЕЛЬНЫЕ ВОПРОСЫ И ЗАДАНИЯ

Базовый уровень

17. Внутренняя энергия одноатомного газа, находящегося в сосуде объёмом 4 л, равна 1,5 кДж. Чему равно давление данной массы газа в сосуде?
18. Насколько изменилась при нагревании внутренняя энергия одноатомного газа, содержащегося в сосуде объёмом 10 л, если при этом давление газа увеличилось на 50 кПа?
19. По графикам зависимости давления данной массы газа от его объёма (рис. 32.13, а--в) найдите, чему равна работа газа в каждом случае.

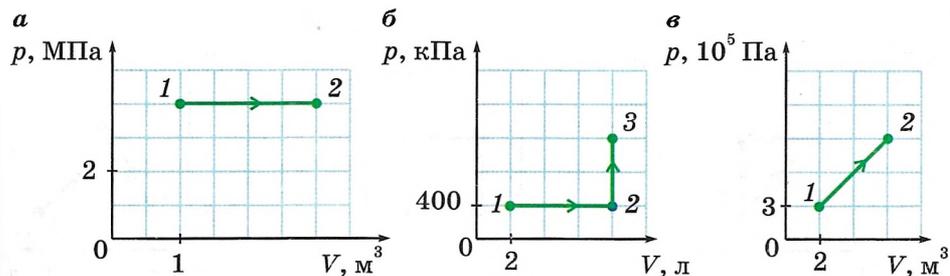


Рис. 32.13

20. Температуру пяти молей одноатомного газа, находящегося в закрытом стеклянном сосуде, увеличили на 20 К. Какое количество теплоты получил газ?
21. Как изменилась температура пяти молей одноатомного газа, находящегося в закрытом металлическом сосуде, если ему передали количество теплоты, равное 5 кДж?

### Повышенный уровень

22. В закрытом сосуде содержится 5 г гелия и 30 г аргона при температуре 300 К. Чему равна внутренняя энергия этой смеси газов?
23. На сколько процентов увеличится внутренняя энергия данной массы одноатомного газа, если его температуру увеличить от 0 °С до 127 °С?
24. Чему равна концентрация молекул одноатомного газа, находящегося в сосуде объёмом 5 л при температуре 27 °С, если внутренняя энергия газа равна 300 Дж?
25. Чему равна работа газа в каждом из случаев, изображённых на рисунках 32.14, а—е?

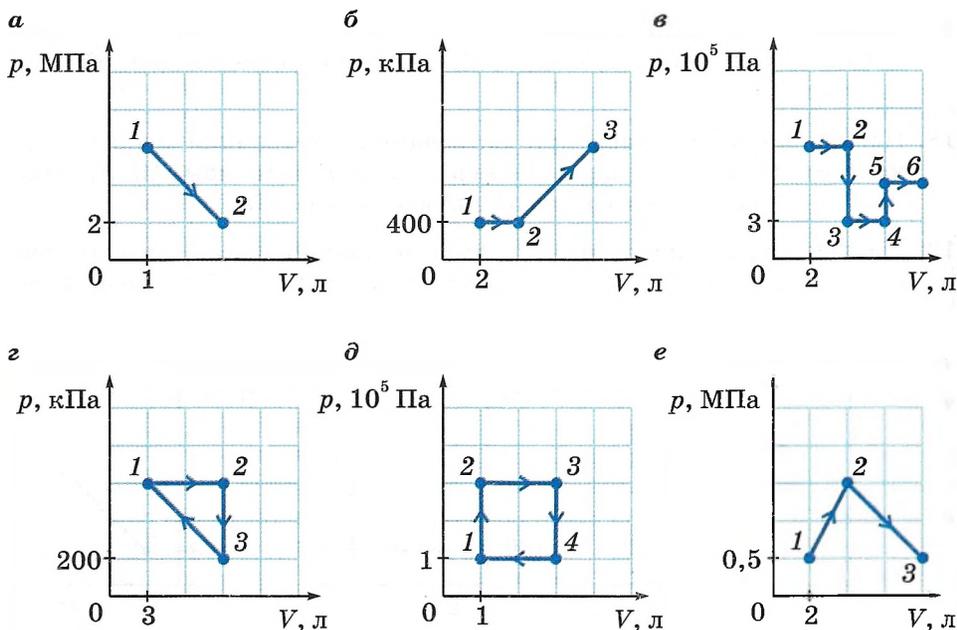


Рис. 32.14

26. График зависимости давления данной массы газа от объёма представляет собой отрезок прямой. Чему равна работа газа, давление которого при расширении от 3 до 6 л уменьшилось с 300 до 100 кПа?

**Высокий уровень**

27. Объём газа массой 20 г при изобарном расширении увеличился в 4 раза, при этом газ совершил работу 6,23 кДж. Какой это может быть газ, если его начальная температура равна 127 °С?
28. Начальная температура одного моля одноатомного газа равна 300 К. Насколько изменилась внутренняя энергия газа, если состояние газа изменялось по закону  $p^3V = \text{const}$ , а его объём увеличился в 8 раз?
29. Внутренняя энергия данной массы одноатомного газа при изохорном охлаждении уменьшилась на 120 кДж. Какое количество теплоты надо сообщить газу для последующего изобарного нагревания до начальной температуры?

30. Какое количество теплоты получили 2 моля одноатомного газа в процессе 2—3 (рис. 32.15), если начальная температура газа равна 400 К?

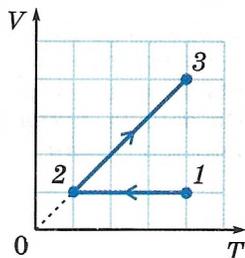


Рис. 32.15

31. Какое количество теплоты получили 4 моля одноатомного газа в результате изобарного нагревания и последующего изохорного нагревания, если в результате этих процессов как объём, так и давление газа увеличились в 3 раза, а начальная температура газа была 100 К?

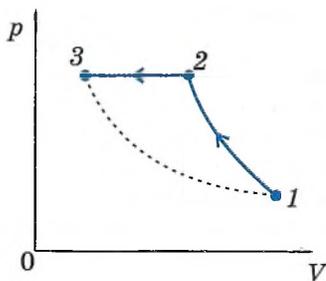


Рис. 32.16

32. Одноатомный газ сжимается сначала адиабатно, а затем изобарно так, что конечная температура газа равна начальной (рис. 32.16). Чему равна работа внешних сил в процессе 2—3, если при адиабатном сжатии внешние силы совершили работу, равную 6 кДж?

33. В сосуде под поршнем содержится насыщенный водяной пар при температуре 80 °С. Чему равна работа пара, если при медленном вдвигании поршня в сосуде образовался 1 г воды, а температура содержимого сосуда не изменилась?

## § 33. Тепловые двигатели. Второй закон термодинамики

### 1. Принцип действия и основные элементы теплового двигателя

Тепловым двигателем называют устройство, совершающее механическую работу за счёт использования внутренней энергии топлива.

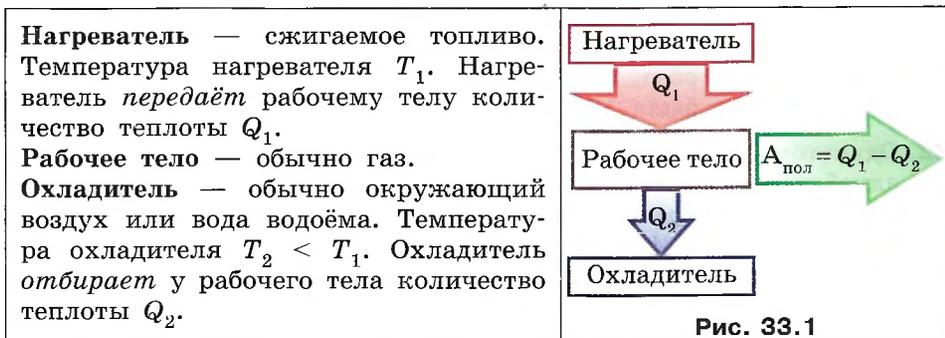
При сгорании топлива рабочее тело (напомним, что рабочим телом является некоторая масса *газа*) *нагревается и расширяется* под большим давлением, совершая *полезную* работу. При этом рабочему телу (газу) передаётся количество теплоты  $Q_1$  от *нагревателя* (сгорающего топлива).

Чтобы рабочее тело (газ) могло расшириться снова, его необходимо *сжать* до прежнего объёма. Работа внешних сил при сжатии газа должна быть меньше, чем работа газа при расширении, чтобы тепловой двигатель мог совершать полезную работу. Для этого необходимо, чтобы сжатие газа происходило при меньшем давлении, чем расширение. Чтобы уменьшить давление при сжатии газа, его *охлаждают*, отбирая у него некоторое количество теплоты  $Q_2$ , которое передаётся *охладителю*<sup>1)</sup>. Охладителем является обычно окружающий воздух или вода водоёмов.

Из закона сохранения энергии следует, что полезная работа теплового двигателя выражается формулой

$$A_{\text{пол}} = Q_1 - Q_2.$$

На следующей схеме (рис. 33.1) показаны основные элементы теплового двигателя. Слева приведены пояснения к схеме.



<sup>1)</sup> Охладитель теплового двигателя часто называли ранее *холодильником*, что приводило к недоразумениям, потому что холодильником называют также устройство для охлаждения различных предметов (например, продуктов). В настоящее время более точное название «охладитель» для одного из основных элементов теплового двигателя получает всё большее распространение, что обусловлено также единообразием терминов *нагреватель* и *охладитель*.

## 2. Коэффициент полезного действия (КПД) теплового двигателя

Коэффициентом полезного действия (КПД)  $\eta$  теплового двигателя называют выраженное в процентах отношение полезной работы  $A_{\text{пол}}$ , совершённой двигателем, к количеству теплоты  $Q_1$ , полученному двигателем от нагревателя:

$$\eta = \frac{A_{\text{пол}}}{Q_1} \cdot 100 \%$$

° 1. Докажите, что

$$\eta = \frac{Q_1 - Q_2}{Q_1} \cdot 100 \%,$$

где  $Q_2$  — количество теплоты, отданное охладителю.

Поскольку  $Q_2 > 0$ , коэффициент полезного действия любого теплового двигателя меньше 100 %.

° 2. За некоторое время тепловой двигатель получил от нагревателя количество теплоты, равное 5 кДж. Чему равно количество теплоты, отданное за это же время охладителю, если КПД теплового двигателя равен 20 %?

### Максимально возможный КПД теплового двигателя

Французский учёный С. Карно доказал, что максимально возможный коэффициент полезного действия теплового двигателя достигается при условии, что цикл<sup>1)</sup> рабочего тела двигателя состоит из *двух изотерм и двух адиабат* (рис. 33.2). Такой цикл называют *циклом Карно*.

Рассматривая упомянутый цикл, учёный доказал, что

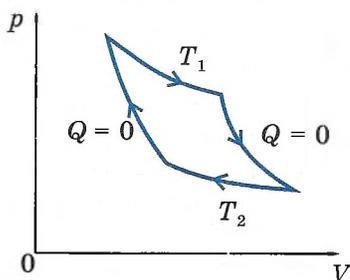


Рис. 33.2

максимально возможный коэффициент полезного действия теплового двигателя зависит только от температуры нагревателя  $T_1$  и температуры охладителя  $T_2$  и выражается формулой

$$\eta_{\text{max}} = \frac{T_1 - T_2}{T_1} \cdot 100 \%$$

<sup>1)</sup> Напомним, что циклом называют последовательность газовых процессов, в результате которых газ возвращается в начальное состояние.

Обратите внимание: приведённое выражение для КПД является лишь *максимальным теоретически возможным*. К сожалению, тепловой двигатель, работающий по циклу Карно, работал бы с максимально возможным КПД, но *бесконечно медленно*, потому что теплообмен рабочего тела с нагревателем и охладителем происходил бы при бесконечно малой разности температур. Поэтому цикл Карно невозможно осуществить на практике, и, следовательно, приведённой формулой для максимально возможного КПД теплового двигателя нельзя пользоваться при решении задач, в которых требуется найти значение КПД *реального* теплового двигателя! Приведём пример.

° 3. Чему равен максимально возможный КПД теплового двигателя, у которого температура нагревателя  $1000\text{ }^\circ\text{C}$ , а температура охладителя  $20\text{ }^\circ\text{C}$ ? Сравните полученный ответ с КПД реальных тепловых двигателей. Например, КПД двигателей внутреннего сгорания составляет  $30\text{--}40\%$ .

Как увеличить КПД теплового двигателя? Увеличить КПД можно, повышая температуру  $T_1$  нагревателя и/или понижая температуру  $T_2$  охладителя. Однако температура охладителя  $T_2$  не может быть ниже температуры окружающего воздуха. Следовательно, в действительности можно только повышать температуру  $T_1$  нагревателя. Однако и тут есть ограничение: например, она не может достигать температуры плавления материалов, из которых изготовлен двигатель.

### \*3. Пример расчёта КПД цикла

4. На рисунке 33.3 изображён график состоящего из четырёх этапов цикла для одноатомного идеального газа.

- Назовите четыре этапа цикла.
- На каком этапе газ совершает положительную работу? Выразите её через  $p_0$  и  $V_0$ .
- Чему равно количество теплоты  $Q_1$ , полученное газом от нагревателя за один цикл?
- Чему равна *полезная* работа газа?
- Чему равен КПД данного цикла?

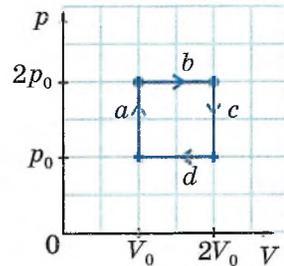


Рис. 33.3

### Похожая задача

5. На рисунке 33.4 изображён график циклического процесса, происходящего с некоторой массой одноатомного газа. Чему равен КПД цикла?

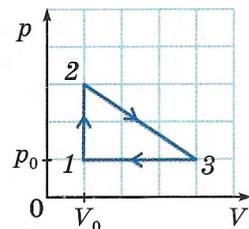


Рис. 33.4

## 4. Второй закон термодинамики

Общая закономерность природных процессов состоит в том, что *более упорядоченное состояние вещества со временем переходит в менее упорядоченное*<sup>1)</sup>.

Например, вследствие трения кинетическая энергия тела, движущегося как *единое целое*, превращается в кинетическую энергию хаотического движения молекул.

Если температуры двух тел выравниваются вследствие теплообмена, упорядоченность также уменьшается. Действительно, в начальном состоянии, когда температуры тел были различны, молекулы этих тел были «рассортированы» по энергиям (средняя кинетическая энергия молекул одного тела была больше средней кинетической энергии молекул другого тела), а в конечном состоянии, когда температуры тел стали равными, средние кинетические энергии молекул обоих тел тоже стали одинаковыми.

### Необратимость тепловых процессов

Тепловые процессы, в которых имеет место теплопередача, являются *необратимыми*: в процессе теплопередачи количество теплоты может переходить только от более нагретого тела к менее нагретому.

Необратимость тепловых процессов обусловлена *вторым законом термодинамики*, который был сформулирован в 19-м веке. Есть несколько равноценных с физической точки зрения формулировок этого закона. Приведём наглядную формулировку, предложенную немецким учёным Р. Клаузиусом:

невозможен процесс, *единственным* результатом которого была бы передача некоторого количества теплоты от холодного тела к горячему.

## 5. Энергетический и экологический кризисы

Современная цивилизация очень широко использует тепловые двигатели: например, они установлены на всех тепловых электростанциях и в автомобилях.

Однако «результаты работы» этого огромного числа тепловых двигателей уже начали оказывать воздействие на климат Земли и состав атмосферы.

При сгорании огромного количества топлива в атмосферу ежегодно выбрасываются миллионы тонн продуктов сгорания и к тому же неуклонно повышается концентрация углекислого газа в атмосфере. А углекислый газ не пропускает в космическое пространство

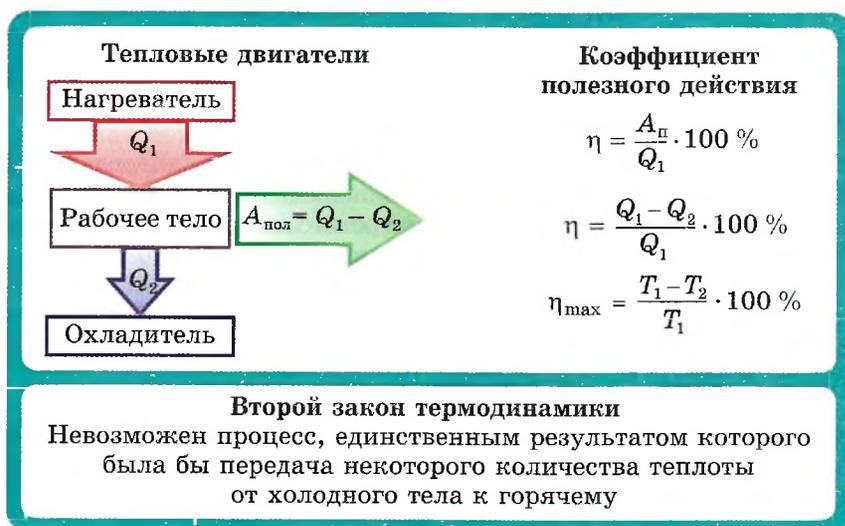
1) Неизбежность такого перехода следует из теории вероятностей.

тепловое излучение нагретой Солнцем Земли. В результате возникает так называемый *парниковый эффект*, что приводит к постепенному повышению средней температуры поверхности Земли — это явление называют иногда *глобальным потеплением*. По мнению некоторых учёных, глобальное потепление может привести к таянию ледников и подъёму уровня Мирового океана.

Чтобы уменьшить негативные последствия работы тепловых двигателей, учёные и инженеры непрерывно ищут возможности повысить их КПД и уменьшить выбросы вредных веществ.



## ЧТО МЫ УЗНАЛИ



## ? ДОПОЛНИТЕЛЬНЫЕ ВОПРОСЫ И ЗАДАНИЯ

### Базовый уровень

6. Во сколько раз количество теплоты, полученное тепловым двигателем от нагревателя, больше совершённой двигателем работы, если КПД теплового двигателя равен 30 %?
7. Чему равны полезная работа, совершённая двигателем за один цикл, и КПД теплового двигателя, если нагреватель передал рабочему телу теплового двигателя количество теплоты, равное 1 кДж, а рабочее тело отдало охладителю количество теплоты, равное 650 Дж?

8. Чему равен максимально возможный КПД теплового двигателя, если температура нагревателя теплового двигателя равна  $500 \text{ K}$ , а температура охладителя равна  $77 \text{ }^\circ\text{C}$ ?
9. Чему равна абсолютная температура охладителя, если максимально возможный КПД теплового двигателя равен  $25 \%$ , а температура нагревателя  $127 \text{ }^\circ\text{C}$ ?
10. Чему равна абсолютная температура нагревателя, если максимально возможный КПД теплового двигателя равен  $30 \%$ , а температура охладителя  $27 \text{ }^\circ\text{C}$ ?

### Повышенный уровень

11. Температура нагревателя теплового двигателя равна  $1200 \text{ }^\circ\text{C}$ , а температура охладителя составляет  $20 \text{ }^\circ\text{C}$ . Во сколько раз КПД теплового двигателя меньше максимально возможного, если нагреватель передал рабочему телу теплового двигателя количество теплоты  $5 \text{ кДж}$ , а рабочее тело отдало охладителю  $4 \text{ кДж}$ ?
12. Абсолютная температура нагревателя теплового двигателя в  $1,3$  раза больше абсолютной температуры охладителя. Чему равен максимально возможный КПД этого двигателя?
13. Количество теплоты, которое рабочее тело теплового двигателя отдаёт охладителю, увеличили на  $10 \%$ , а количество теплоты, которое он получает от нагревателя, увеличили на  $15 \%$ . Как изменился КПД двигателя — увеличился или уменьшился? Каким он стал, если первоначально он был равен  $35 \%$ ?
14. Сколько керосина потребуется для одного часа полёта самолёта со скоростью  $2000 \text{ км/ч}$ , если сила тяги двигателя равна  $90 \text{ кН}$ , а его КПД равен  $45 \%$ ? Удельная теплота сгорания керосина  $45 \text{ МДж/кг}$ .

### Высокий уровень

15. По графику зависимости давления данной массы одноатомного газа от объёма (рис. 33.5) определите:
  - а) работу газа за один цикл;
  - б) количество теплоты, которое получил газ за один цикл;
  - в) КПД цикла.
16. С данной массой одноатомного газа осуществляют циклический процесс. Сначала при изохорном нагревании давление газа увеличивают в  $3$  раза, затем при изобарном нагревании объём газа увеличивают на  $50 \%$ . Потом газ изохорно охлаждают, и, наконец, возвращают в начальное состояние с помощью изобарного охлаждения. Изобразите график цикла в наиболее удобных координатах и найдите его КПД.

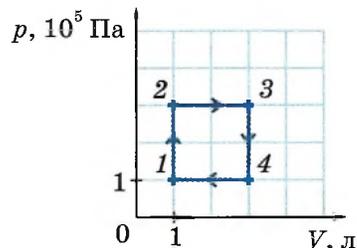


Рис. 33.5

17. Чему равен КПД циклического процесса, происходящего с некоторой массой одноатомного газа (рис. 33.6)?
18. Чему равен КПД циклического процесса, происходящего с некоторой массой одноатомного газа (рис. 33.7)?

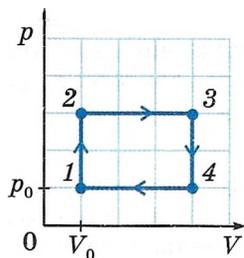


Рис. 33.6

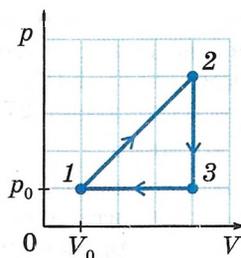


Рис. 33.7

19. Циклический процесс, который осуществляется с пятью молями одноатомного газа, состоит из изотермического расширения, изохорного охлаждения и адиабатического сжатия. Чему равен КПД цикла, если в изохорном процессе температура газа уменьшается на  $300\text{ К}$ , а работа, совершённая газом в изотермическом процессе, равна  $25\text{ кДж}$ ?
20. На рисунке 33.8 изображён график циклического процесса, происходящего с некоторой массой одноатомного газа. Какое количество теплоты газ отдаёт за цикл охладителю, если при переходе из состояния 1 в состояние 2 газ совершает работу, равную  $8\text{ кДж}$ ?

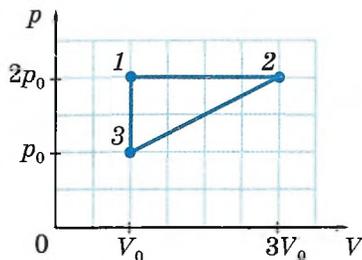


Рис. 33.8

## \*§ 34. Фазовые переходы

### 1. Плавление и кристаллизация

Напомним, что агрегатными состояниями называют газообразное, жидкое и твёрдое состояния вещества. Переходы вещества из одного агрегатного состояния в другое являются примерами *фазовых переходов*.

Начнём с рассмотрения перехода вещества из твёрдого (а точнее — кристаллического) состояния в жидкое. Такой переход называют *плавлением*.

Обратный процесс, при котором вещество переходит из жидкого состояния в кристаллическое, называют *кристаллизацией* или *отвердеванием*.

### Температура плавления

Опыт показывает, что процесс плавления происходит при *постоянной* температуре, которая различна для различных веществ. Эту температуру называют *температурой плавления* данного вещества.

Температуры плавления для различных веществ могут отличаться на тысячи градусов.

° 1. Какова температура плавления льда?

Очень низкие температуры плавления характерны для веществ, которые мы привыкли считать газами: например, водород плавится при  $-259\text{ }^{\circ}\text{C}$ , а кислород — при  $-218\text{ }^{\circ}\text{C}$ .

Железо плавится при  $1539\text{ }^{\circ}\text{C}$ , а наиболее тугоплавкий металл — вольфрам — имеет температуру плавления  $3387\text{ }^{\circ}\text{C}$ .

° 2. Известен ли вам металл, температура плавления которого ниже температуры плавления льда?

### Удельная теплота плавления

Чтобы полностью расплавить кристаллическое тело, мало нагреть его до температуры плавления — надо *продолжать* подводить к нему тепло до *полного* превращения в жидкость.

Какое же превращение энергии при этом происходит, если температура тела остаётся *постоянной*?

Напомним, что температура является мерой средней *кинетической* энергии хаотического движения молекул, — следовательно, если температура тела остаётся постоянной, средняя кинетическая энергия молекул в процессе плавления *не изменяется*.

А поскольку внутренняя энергия тела — это сумма кинетической энергии хаотического движения молекул и потенциальной энергии их взаимодействия, мы приходим к выводу, что в процессе плавления *всё подводимое к телу количество теплоты  $Q$  идёт на увеличение потенциальной энергии молекул*.

Количество теплоты  $Q$ , необходимое для того, чтобы полностью расплавить тело, взятое при температуре плавления, пропорционально массе  $m$  этого тела:

$$Q = \lambda m.$$

Величину  $\lambda$  называют *удельной теплотой плавления*. Она численно равна количеству теплоты, необходимому для того, чтобы расплавить 1 кг кристаллического вещества, взятого при температуре плавления.



° 3. Докажите, что *единицей удельной теплоты плавления* является

$$\frac{\text{Дж}}{\text{кг}}.$$

° 4. Кусок льда, взятый при температуре  $0^\circ\text{C}$ , полностью превратили в воду при той же температуре, сообщив ему некоторое количество теплоты. До какой температуры нагреется образовавшаяся вода, если сообщить ей такое же количество теплоты? Удельная теплота плавления льда равна  $330 \text{ кДж/кг}$ , а удельная теплоёмкость воды равна  $4,2 \frac{\text{кДж}}{\text{кг} \cdot ^\circ\text{C}}$ .

Сравнительно большое значение удельной теплоты плавления льда спасает нас весной от слишком бурного таяния льда и снега.



° 5. На рисунке 34.1 приведён график зависимости температуры образца вещества массой 1 кг в процессе плавления от переданного ему количества теплоты.

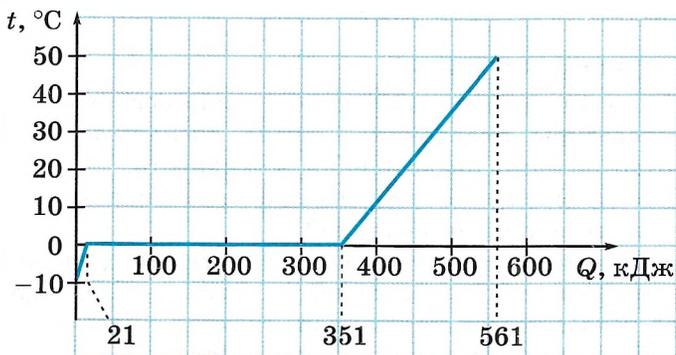


Рис. 34.1

- Какова удельная теплоёмкость вещества в твёрдом состоянии?
- Чему равна температура плавления вещества?
- Чему равна удельная теплота плавления вещества?
- Какова удельная теплоёмкость вещества в жидком состоянии?
- Какое это вещество?

### Кристаллизация

Кристаллизация также происходит при *постоянной* температуре, которая равна температуре плавления. В процессе кристаллизации

тело *отдаёт* такое же количество теплоты, которое надо сообщить ему для плавления.

На первый взгляд это может показаться странным: как может, например, вода при *замерзании* отдавать некоторое количество теплоты? И тем не менее, это действительно так: когда вода превращается в лёд, она отдаёт довольно большое количество теплоты окружающему *холодному* воздуху, температура которого *ниже*  $0^\circ\text{C}$ . Это явление смягчает заморозки при наступлении холодного времени года.

## 2. Парообразование и конденсация

### Парообразование

Процесс превращения жидкости в пар называют *парообразованием*. Парообразование, происходящее со свободной поверхности жидкости, называют *испарением*.

Испарение происходит при *любой* температуре: например, вода постепенно «улетучивается» из открытого стакана, а лужи после дождя высыхают.

Скорость испарения жидкости зависит от вида вещества, от площади свободной поверхности жидкости, от температуры, а также от движения воздуха над поверхностью жидкости.

° 6. Объясните, почему скорость испарения жидкости увеличивается при увеличении площади свободной поверхности жидкости и при повышении температуры.

Испаряться могут не только жидкости, но и твёрдые тела: это явление называют *возгонкой* или *сублимацией*. Например, хорошо известно, что замёрзшее на морозе бельё высыхает: это означает, что лёд испаряется, непосредственно превращаясь в водяной пар, минуя жидкое состояние (воду).

7. Если капнуть йодом на лист бумаги, образовавшееся пятно со временем будет светлеть и через некоторое время совсем исчезнет. Как это объяснить? Попробуйте поставить сами такой опыт.

При испарении жидкость *охлаждается*: поэтому человек ощущает прохладу, выходя из воды после купания в море или в реке.

° 8. Почему при испарении жидкость охлаждается?

### Удельная теплота парообразования

Чтобы температура жидкости при парообразовании не уменьшалась, к жидкости надо постоянно подводить тепло. Так как температура жидкости при этом не изменяется, всё сообщаемое жидкости количество теплоты «идёт» на разрыв связей между молекулами. При этом потенциальная энергия молекул увеличивается.

Количество теплоты  $Q$ , необходимое для того, чтобы превратить жидкость в пар при постоянной температуре, пропорционально массе  $m$  жидкости:

$$Q = Lm.$$

Величину  $L$  называют *удельной теплотой парообразования*. Она численно равна количеству теплоты, необходимому для того, чтобы превратить в пар 1 кг жидкости при постоянной температуре.

- °9. Докажите, что *единицей удельной теплоты парообразования* является  $\frac{\text{Дж}}{\text{кг}}$ .
- °10. На какой этаж можно было бы поднять слона массой 4 т, совершив работу, численно равную количеству теплоты, необходимому для превращения 2 л воды в пар при постоянной температуре? Удельная теплота парообразования воды равна 2,3 МДж/кг. Высоту одного этажа примите равной 3 м.

### Конденсация

Процесс, обратный парообразованию, то есть превращение пара в жидкость, называют *конденсацией*.

При конденсации пара теплота *выделяется*: при конденсации 1 кг пара выделяется количество теплоты, численно равное удельной теплоте парообразования.

- °11. Почему обжечься паром опаснее, чем кипятком?

### 3. Уравнение теплового баланса при наличии фазовых переходов

При решении задач, в которых идёт речь о плавлении кристаллического тела, надо помнить, что если начальная температура тела не равна температуре плавления, то ему надо сообщить некоторое количество теплоты для того, чтобы нагреть его до этой температуры.

12. В атмосферу Земли влетает железный метеорит, имеющий температуру, равную  $-260^\circ\text{C}$ . Вследствие сопротивления воздуха при движении сквозь атмосферу 80 % кинетической энергии метеорита переходит в его внутреннюю энергию. Удельная теплоёмкость железа равна  $460 \frac{\text{Дж}}{\text{кг} \cdot ^\circ\text{C}}$ , температура плавления  $1540^\circ\text{C}$ , удельная теплота плавления  $270 \text{ кДж/кг}$ .

- а) При какой минимальной скорости входа в атмосферу метеорит нагреется до температуры плавления?
- б) Какая часть массы метеорита расплавится, если при входе в атмосферу его скорость равна  $1,6 \text{ км/с}$ ?

13. В калориметр, содержащий некоторую массу воды  $m_{\text{в}}$ , помещают кусок льда массой  $m_{\text{л}}$ . Каким может быть состояние вещества, когда в калориметре будет тепловое равновесие? Какой может быть конечная температура содержимого калориметра в каждом случае?
14. В калориметр, содержащий 1,5 л воды при температуре  $20\text{ }^{\circ}\text{C}$ , кладут кусок льда при температуре  $-10\text{ }^{\circ}\text{C}$ . Чему равна масса льда, если после установления теплового равновесия в калориметре находится:
- только лёд;
  - только вода;
  - лёд и вода в тепловом равновесии?
15. В калориметр, в котором находится 1 л воды при температуре  $20\text{ }^{\circ}\text{C}$ , выпускают 100 г водяного пара при температуре  $100\text{ }^{\circ}\text{C}$ . Чему будет равна температура в калориметре после установления теплового равновесия? Необходимые вам данные найдите в тексте параграфа.

## ЧТО МЫ УЗНАЛИ

**Фазовые переходы** — переходы вещества из одного агрегатного состояния в другое.

**Агрегатные состояния:**

газообразное, жидкое и твёрдое состояния вещества

Количество теплоты  $Q$ , необходимое для того, чтобы полностью расплавить тело, взятое при температуре плавления, пропорционально массе  $m$  этого тела:

$$Q = \lambda m,$$

$\lambda$  — удельная теплота плавления вещества

Количество теплоты  $Q$ , необходимое для того, чтобы превратить жидкость в пар при постоянной температуре, пропорционально массе  $m$  жидкости:

$$Q = Lm,$$

$L$  — удельная теплота парообразования

## ? ДОПОЛНИТЕЛЬНЫЕ ВОПРОСЫ И ЗАДАНИЯ

### Повышенный уровень

16. До какой наименьшей температуры надо нагреть алюминиевый куб, чтобы после того, как его положат на плоскую льдину при температуре  $0\text{ }^{\circ}\text{C}$ , он полностью погрузился в лёд? Примите, что количество теплоты, выделившееся при остывании алюминиевого куба, равно количеству теплоты, поглощённому льдом при таянии.
17. В калориметр поместили  $100\text{ г}$  льда при температуре  $0\text{ }^{\circ}\text{C}$ , а затем впустили пар при температуре  $100\text{ }^{\circ}\text{C}$ . Чему будет равна масса воды в калориметре, когда весь лёд растает, а температура воды будет равна  $0\text{ }^{\circ}\text{C}$ ?
18. В калориметр, содержащий  $1\text{ кг}$  льда, добавили  $4\text{ кг}$  воды при температуре  $20\text{ }^{\circ}\text{C}$ . Какой была начальная температура льда в калориметре, если после установления теплового равновесия в калориметре оказалась только вода при температуре  $0\text{ }^{\circ}\text{C}$ ?
19. Для нагревания на плите некоторой массы воды от  $20\text{ }^{\circ}\text{C}$  до температуры кипения потребовалось  $6\text{ мин}$ . Сколько потребуется времени, чтобы эта вода выкипела, если потерями тепла можно пренебречь?
20. До какой температуры была нагрета вода, полученная из  $100\text{ кг}$  снега, взятого при температуре  $-10\text{ }^{\circ}\text{C}$ , если для этого в печи с КПД  $20\text{ \%}$  сожгли  $22\text{ кг}$  дров? Удельная теплота сгорания дров равна  $10\text{ МДж/кг}$ .

### Высокий уровень

21. В  $1,5\text{ л}$  воды, содержащейся в калориметре при температуре  $20\text{ }^{\circ}\text{C}$ , кладут лёд, температура которого равна  $-10\text{ }^{\circ}\text{C}$ . Теплообменом с окружающей средой и теплоёмкостью калориметра можно пренебречь. Какая температура установится в калориметре, если масса льда равна:
  - а)  $40\text{ кг}$ ;
  - б)  $200\text{ г}$ ?
22. В калориметре начали нагревать некоторую массу вещества в кристаллическом состоянии. На рисунке 34.2 изображён график зависимости температуры содержимого калориметра от времени. Чему равна удельная теплота

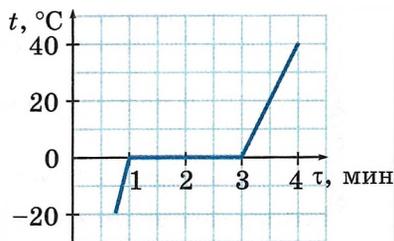


Рис. 34.2

плавления данного вещества, если его удельная теплоёмкость в жидком состоянии равна  $4200 \frac{\text{Дж}}{\text{кг} \cdot ^\circ\text{C}}$ ? Теплоёмкостью калориметра и тепловыми потерями можно пренебречь, мощность нагревателя считайте постоянной.

23. В калориметр налили 1 л воды при температуре  $20^\circ\text{C}$ . Чему станет равна температура содержимого калориметра после того, как в воду опустят 100 г мокрого снега, содержание воды в котором (по массе) равно 60 %, и в калориметре установится тепловое равновесие? Потерями тепла можно пренебречь.
24. Свинцовая пуля массой 10 г, летящая со скоростью 400 м/с, ударяется о стальную плиту и отскакивает от неё со скоростью 100 м/с. Примите, что изменение внутренней энергии пули составляет 0,6 от модуля изменения её механической энергии. Чему равна масса расплавленного свинца? Температуру пули до удара о плиту примите равной  $50^\circ\text{C}$ . Удельная теплота плавления свинца равна 25 кДж/кг.
25. В калориметре смешали 40 мл воды при  $5^\circ\text{C}$  и 20 мл воды при  $10^\circ\text{C}$ . В образовавшуюся смесь поместили 0,4 кг льда при температуре  $-6^\circ\text{C}$ . Весь ли лёд растает? Если нет, то чему будет равна масса льда после установления теплового равновесия?

## ГЛАВНОЕ В ГЛАВЕ VI

Два способа  
изменения  
внутренней энергии



**Первый закон  
термодинамики**

$$\Delta U = Q + A$$

$$Q = \Delta U + A_r$$

Внутренняя энергия  
одноатомного  
идеального газа

$$U = \frac{3}{2} \nu RT$$

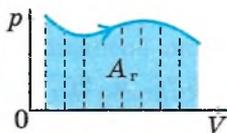
$$U = \frac{3}{2} pV$$

Изменение внутренней энергии  
одноатомного  
идеального газа

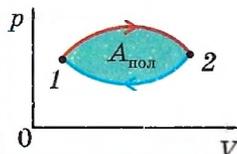
$$\Delta U = \frac{3}{2} \nu R \Delta T$$

$$\Delta U = \frac{3}{2} \Delta(pV)$$

Работа газа



Полезная работа газа

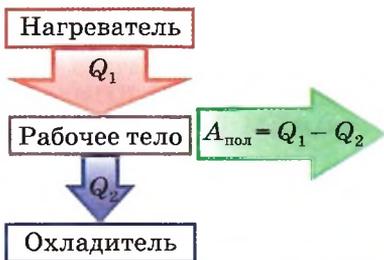


Адиабатный  
процесс

$$Q = 0$$

$$\Delta U = -A_r$$

**Тепловые двигатели**



**Коэффициент  
полезного действия**

$$\eta = \frac{A_{\text{п}}}{Q_1} \cdot 100 \%$$

$$\eta = \frac{Q_1 - Q_2}{Q_1} \cdot 100 \%$$

$$\eta_{\text{max}} = \frac{T_1 - T_2}{T_1} \cdot 100 \%$$

**Количество теплоты**

$$Q = cm(t_k - t_n)$$

$$Q = \lambda m$$

$$Q = Lm$$

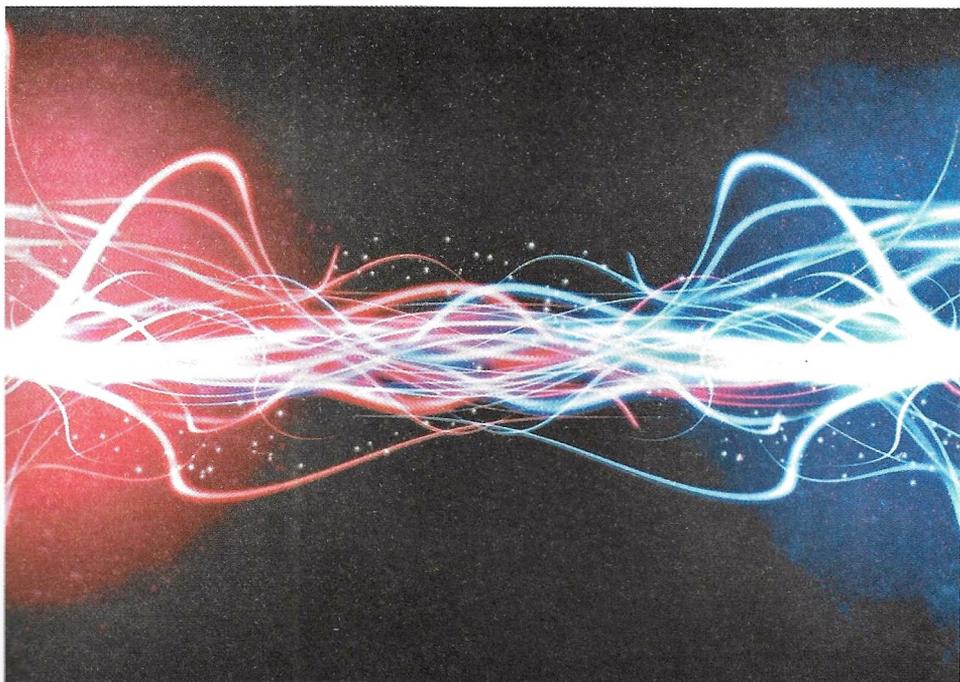
# ЭЛЕКТРОСТАТИКА И ПОСТОЯННЫЙ ЭЛЕКТРИЧЕСКИЙ ТОК

**Предмет и задачи электростатики.**

**Значение законов постоянного электрического тока**

Электростатика — раздел физики, в котором изучают взаимодействие покоящихся заряженных тел и свойства электрического поля.

Широкое применение электричества стало возможным благодаря открытию законов электрического тока: с его помощью освещают улицы и квартиры, обогревают помещения, он приводит в движение поезда электричек и метро, миллионы станков.



# Глава VII. ЭЛЕКТРОСТАТИКА

## § 35. Электрические взаимодействия

### 1. Два знака электрических зарядов

С основными свойствами электрических взаимодействий вы уже познакомились в курсе физики основной школы. Напомним, что электрические взаимодействия тел обусловлены наличием у них *электрических зарядов*.

Сообщение телам электрических зарядов называют *электризацией*. В школьных опытах по электричеству обычно электризуют эбонитовую<sup>1)</sup> или стеклянную палочку: эбонитовую палочку натирают шерстью, а стеклянную — шёлком.



#### Поставим опыт

Подвесим на нитях две лёгкие металлические гильзы и коснёмся обеих гильз *одной и той же* наэлектризованной палочкой (не имеет значения какой). Гильзы начнут *отталкиваться*.

А если наэлектризовать одну гильзу, коснувшись её наэлектризованной эбонитовой палочкой, а другую — коснувшись наэлектризованной стеклянной палочкой, то гильзы будут *притягиваться*. Это означает, что

существуют электрические заряды двух знаков — *положительные* и *отрицательные*. Тела, имеющие заряд *одного* знака (одноимённо заряженные), *отталкиваются*, а тела, имеющие заряды *разных* знаков (разноимённо заряженные), — *притягиваются* (рис. 35.1).

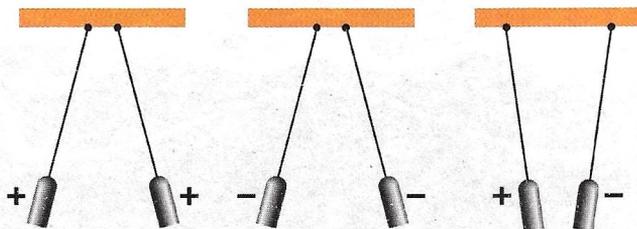


Рис. 35.1

<sup>1)</sup> Эбонит — твёрдое вещество чёрного цвета, состоящее из серы и каучука.

Заряд натёртой шёлком стеклянной палочки договорились считать *положительным*, а заряд натёртой шерстью эбонитовой палочки — *отрицательным*.

° 1. Имеются три заряженных шарика.

- Могут ли *любые* два шарика из этих трёх отталкиваться друг от друга? Обоснуйте свой ответ.
- Могут ли *любые* два шарика из этих трёх притягиваться друг к другу?

## 2. Носители электрического заряда.

### Закон сохранения электрического заряда

*Носителями электрического заряда* являются заряженные частицы.

Это означает, что *электрического заряда без частиц не существует*.

Чаще всего мы будем встречаться со случаями, когда носителями заряда являются *электроны* — очень лёгкие отрицательно заряженные частицы, движущиеся вокруг положительно заряженных атомных ядер.

Например, *электризация трением* обусловлена тем, что при тесном контакте двух тел очень небольшая часть электронов переходит с одного тела на другое (рис. 35.2).

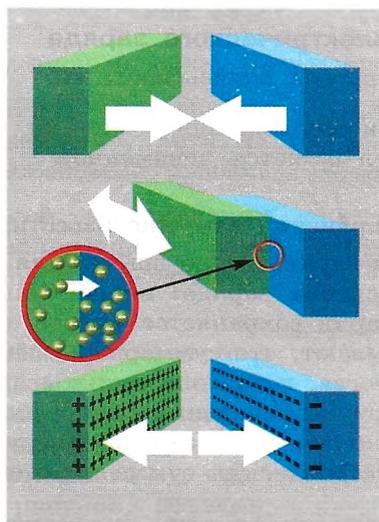


Рис. 35.2



- ° 2. При трении некоторая часть электронов перешла с тела 1 на тело 2. Какое из этих тел оказалось заряженным *отрицательно*?

Носителями электрического заряда могут быть также *ионы*. Напомним, что так называют атомы, которые потеряли или приобрели один или несколько электронов.



- ° 3. Каков знак заряда иона, образовавшегося в результате потери атомом электрона?

Вещества, в которых носители заряда могут перемещаться по всему образцу вещества, называют *проводниками*. Движущиеся в проводниках заряженные частицы называют *свободными зарядами*.

Лучшие проводники — *металлы*. Свободными зарядами в них являются *электроны*.

Проводниками являются также растворы солей, щелочей и кислот. Такие жидкости называют *электролитами*<sup>1)</sup>. Например, электролитом является морская вода благодаря растворённым в ней солям. Свободными зарядами в электролитах являются положительные и отрицательные *ионы*.

Вещества, в которых нет свободных носителей электрического заряда, называют *диэлектриками*.

Примерами диэлектриков являются пластмассы, ткани, резина, стекло, дистиллированная вода. Диэлектриками являются газы, в том числе воздух.

### Закон сохранения электрического заряда

Многочисленные опыты показывают, что

в электрически изолированной<sup>2)</sup> системе тел алгебраическая сумма зарядов тел остаётся неизменной.



- ° 4. Какие законы сохранения вам уже известны?

Закон сохранения заряда легко понять для случаев, когда заряженные частицы (носители заряда) не появляются и не исчезают: в таком случае их заряд сохраняется вместе с носителями заряда. Однако опыты показывают, что суммарный электрический заряд частиц сохраняется и тогда, когда они испытывают взаимные превращения. Например, при столкновении двух *нейтральных* частиц (то есть не имеющих электрического заряда) могут рождаться *заряженные* частицы, но *алгебраическая* сумма зарядов рождённых частиц

1) От греческого «литос» — разложимый, растворимый.

2) Электрически изолированной называют систему, в которую не входят и из которой не выходят заряженные частицы.

при этом равна нулю: суммарный заряд положительно заряженных частиц равен по модулю суммарному заряду отрицательно заряженных частиц.

### 3. Электризация через влияние. Перераспределение зарядов

#### Поставим опыт

Поставим на пластмассовый или деревянный стол две незаряженные металлические гильзы 1 и 2, соединим их проводником на изолированной ручке и поднесём к гильзе 1 положительно заряженную палочку, *не касаясь* ею гильзы (рис. 35.3, а).

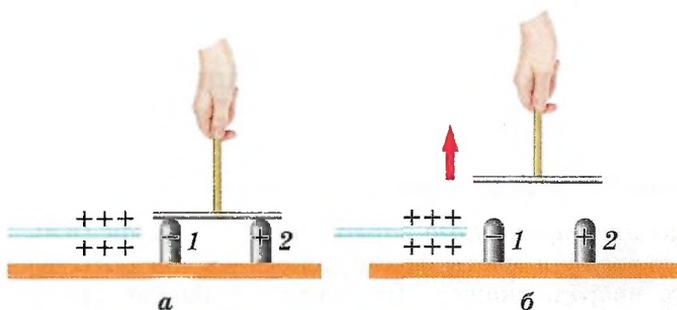


Рис. 35.3

Не убирая заряженной палочки, уберём проводник (рис. 35.3, б).

- ° 5. Объясните, почему обе гильзы оказались заряженными, хотя их не касались заряженными телами.

Описанный способ электризации тел называют *электризацией через влияние*. Она обусловлена *перераспределением* зарядов.

- ° 6. На рисунке 35.4 схематически изображён опыт, в котором к *незаряженной* металлической гильзе подносят положительно заряженную палочку, *не касаясь* ею гильзы. Используя рисунок, объясните, почему *незаряженная* гильза притягивается к палочке.

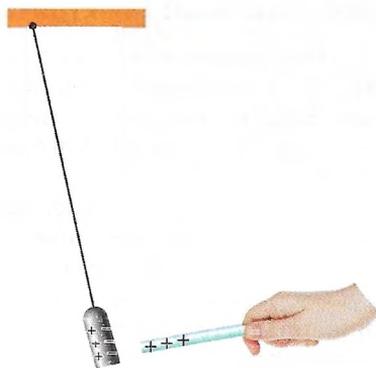


Рис. 35.4

- °7. На рисунке 35.5 изображено, как взаимодействует гильза  $B$  с положительно заряженной гильзой  $A$ . Что можно сказать о заряде гильзы  $B$ ?

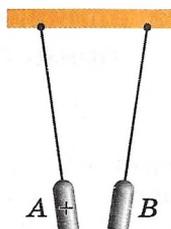


Рис. 35.5

#### 4. Единица электрического заряда. Элементарный электрический заряд

##### Единица электрического заряда

*Единица электрического заряда* в СИ — **кулон** (Кл). Эта единица заряда названа в честь французского учёного Ш. Кулона. Забегая немного вперёд, скажем, что единицу заряда определяют через единицу силы тока в СИ — **ампер** (А). Один кулон равен заряду, проходящему через поперечное сечение проводника за одну секунду при силе тока в проводнике, равной одному амперу. Таким образом,  $1 \text{ Кл} = 1 \text{ А} \cdot 1 \text{ с}$ . Определение единицы силы тока мы дадим при рассмотрении магнитных взаимодействий в курсе физики 11-го класса.

##### Элементарный электрический заряд

Все заряженные частицы имеют заряд, кратный заряду электрона, то есть равный заряду электрона, умноженному на целое число (положительное или отрицательное). Поэтому *модуль* заряда электрона назвали **элементарным электрическим зарядом**. Его обозначают  $e$ .

Заряд электрона впервые измерил американский физик Р. Милликен. Результаты его опыта подтвердил русский физик А. Ф. Иоффе.

В опытах Милликена и Иоффе сила, действующая на заряженную капельку масла или металлическую пылинку со стороны заряженных тел, уравнивалась другими силами, которые можно было измерить (в опыте Иоффе она уравнивалась силой тяжести). Из результатов опытов следовало, что заряд капельки или

пылинки кратен одному и тому же заряду. Это и был модуль заряда электрона, то есть элементарный электрический заряд.

Измерения показали, что элементарный электрический заряд

$$e = 1,6 \cdot 10^{-19} \text{ Кл.}$$

8. В столовую ложку налили 18 г воды.

- Сколько молекул воды содержится в ложке?
- Сколько электронов в одной молекуле воды?
- Сколько электронов в воде, находящейся в столовой ложке?
- Чему равен суммарный заряд всех электронов в воде, находящейся в столовой ложке?
- Чему равен суммарный заряд всех положительно заряженных частиц в воде, находящейся в столовой ложке?

## 5. Закон Кулона

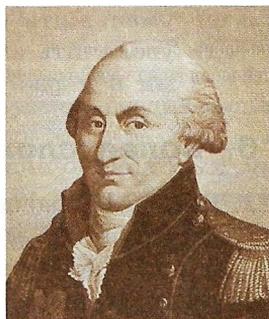
Французский физик Ш. Кулон первым измерил на опыте силу взаимодействия небольших заряженных тел. Модель заряженного тела, размерами которого в данной задаче можно пренебречь, называют *точечным зарядом*.

Модель опытной установки Кулона показана на рисунке 35.6. Заряженный шарик и бумажный кружок уравновешены на стержне, подвешенном к тонкой упругой нити. Другой шарик, заряженный зарядом того же знака, укреплен на вертикальном стержне. Электрическое отталкивание шариков приводит к тому, что нить закручивается на некоторый угол. По величине этого угла Кулон смог определить силу взаимодействия шариков.

Опыт показал, что

неподвижные точечные заряды  $q_1$  и  $q_2$  взаимодействуют в вакууме с силами, прямо пропорциональными модулям зарядов и обратно пропорциональными квадрату расстояния  $r$  между ними. Модуль каждой силы

$$F = k \frac{|q_1| \cdot |q_2|}{r^2}.$$



Ш. Кулон  
(1736–1806)

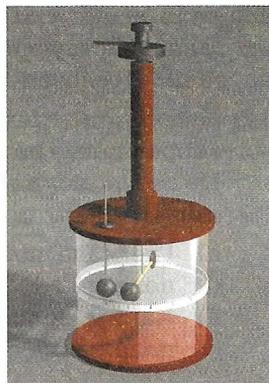


Рис. 35.6

Измерения показали, что  $k = 9 \cdot 10^9 \text{ Н} \cdot \text{м}^2 / \text{Кл}^2$ .



Сравним электрические взаимодействия с гравитационными.

9. Сравните силы электрического отталкивания двух электронов с силами их гравитационного притяжения: какие из них больше и во сколько раз? Имеет ли значение для нахождения ответа на этот вопрос расстояние между электронами? Масса электрона  $9,1 \cdot 10^{-31}$  кг.
10. Два небольших заряженных шарика поместили на некотором расстоянии друг от друга. Изменятся ли, и если да, то как, силы взаимодействия шариков, если:
- а) знак заряда каждого шарика изменить на противоположный, сохранив модули зарядов;
  - б) изменить знак заряда только одного из шариков, сохранив модули зарядов;
  - в) увеличить модуль заряда каждого шарика в  $n$  раз;
  - г) уменьшить расстояние между шариками в  $n$  раз;
  - д) увеличить заряд одного шарика и расстояние между шариками в  $n$  раз?

### \*6. Более сложные задачи

11. Два незаряженных шара массой 1 кг каждый находятся на расстоянии 5 м друг от друга. Сколько электронов надо перенести с одного шара на другой, чтобы силы электрического притяжения шаров сравнялись по модулю с силами их гравитационного притяжения? Есть ли в условии лишние данные?

Опыт показывает, что заряженные тела действуют друг на друга независимо от остальных заряженных тел. Поэтому если на заряженное тело действуют силы со стороны нескольких заряженных тел, то их равнодействующая является векторной суммой сил, действующих на данное тело со стороны этих тел.

12. Небольшие шарики с положительными зарядами  $q$  и  $4q$  закреплены на концах пластмассового стержня длиной 15 см. По стержню может скользить третий заряженный шарик. Трением можно пренебречь.
- а) Где надо поместить третий шарик, чтобы он находился в равновесии?
  - б) Каким должен быть знак заряда третьего шарика, чтобы его положение равновесия было устойчивым?

### Похожие задачи

13. Небольшие шарики с зарядами  $q$  и  $-4q$  закреплены на расстоянии 20 см друг от друга на длинном пластмассовом стержне.

Где на этом стержне надо поместить третий заряженный шарик, который может скользить по стержню, чтобы шарик находился в равновесии?

14. На рисунке 35.7 показаны два закреплённых одинаковых положительных точечных заряда. Перенесите рисунок в тетрадь.

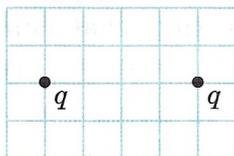


Рис. 35.7

- а) Обозначьте на рисунке в тетради точку, в которую надо поместить третий заряд, чтобы он находился в равновесии.  
б) Обозначьте на рисунке в тетради все точки, в которые можно поместить третий заряд, чтобы равнодействующая приложенных к нему сил была перпендикулярна отрезку, соединяющему данные заряды.

В задачах иногда рассматривают взаимодействие *одинаковых металлических шариков*. При решении таких задач надо учитывать, что, когда такие шарики приводят в соприкосновение, их заряды становятся *равными*.

15. На некотором расстоянии друг от друга поместили два одинаковых разноимённо заряженных металлических шарика с зарядами  $q$  и  $-5q$ .
- а) Как изменятся направления действующих на шарики сил, если привести их в соприкосновение и раздвинуть на прежнее расстояние?  
б) Как изменится модуль сил взаимодействия шариков?
16. У вас есть один заряженный металлический шарик с зарядом 8 нКл и большое количество таких же незаряженных металлических шариков. Запишите последовательность действий, с помощью которых можно получить шарик с зарядом 4 нКл; 2 нКл; 1 нКл; 3 нКл.





## ЧТО МЫ УЗНАЛИ

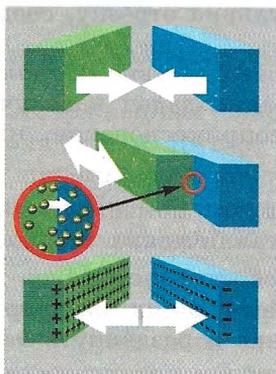
Электрические заряды бывают двух знаков — положительные и отрицательные.

Одноимённо заряженные тела отталкиваются, а разноимённо заряженные притягиваются.

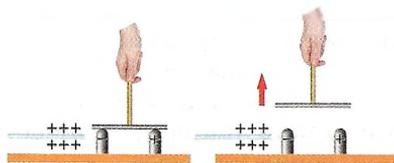


Свободные носители электрического заряда — электроны и ионы

Электризация трением



Электризация через влияние



Закон Кулона

$$F = k \frac{|q_1| |q_2|}{r^2}$$

## ? ДОПОЛНИТЕЛЬНЫЕ ВОПРОСЫ И ЗАДАНИЯ

**Базовый уровень**

- На нитях одинаковой длины висят рядом две одинаковые гильзы: левая гильза заряжена, а правая — не заряжена. Какая нить сильнее отклонена от вертикали?
- Объясните, почему при электризации трением оба тела приобретают электрический заряд.

19. Почему незаряженная лёгкая металлическая гильза притягивается как к эбонитовой палочке, потёртой о шерсть, так и к стеклянной палочке, потёртой о шёлк? Сделайте схематические рисунки, на которых изображено перераспределение зарядов в гильзе.
20. Когда к сфере незаряженного электрометра поднесли отрицательно заряженную палочку, стрелка электрометра отклонилась.
- Приобрёл ли электрометр электрический заряд?
  - Какой знак заряда образуется на сфере, стержне и стрелке электрометра?
  - Что произойдёт, когда палочку удалят от электрометра?
21. Когда по сфере незаряженного электрометра провели отрицательно заряженной палочкой, стрелка электрометра отклонилась.
- Приобрёл ли электрометр электрический заряд?
  - Какой знак заряда образуется на сфере, стержне и стрелке электрометра?
  - Что произойдёт, когда палочку удалят от электрометра?
22. Когда к заряженному электрометру поднесли заряженную палочку, отклонение стрелки электрометра *уменьшилось*.
- Что можно сказать о знаке зарядов палочки и электрометра: одинаковы они или противоположны? Поясните свой ответ.
  - Увеличился или уменьшился по модулю заряд сферы электрометра при поднесении палочки? Поясните свой ответ.
23. Каплю, имеющую заряд  $-8e$ , освещают ультрафиолетовыми лучами. Каким стал заряд капли, когда она потеряла:
- три электрона;
  - восемь электронов;
  - одиннадцать электронов?
24. Одинаковые металлические гильзы с зарядами  $5 \text{ нКл}$  и  $-7 \text{ нКл}$  привели в соприкосновение и развели в стороны. Какими стали заряды гильз?
25. С какими силами взаимодействуют два одинаковых точечных заряда по  $4 \text{ нКл}$  каждый, находящиеся в вакууме на расстоянии  $20 \text{ см}$  друг от друга?
26. Чему равен модуль каждого из двух одинаковых точечных зарядов, взаимодействующих в вакууме с силами  $6 \text{ мН}$ , если расстояние между ними  $0,5 \text{ м}$ ?
27. Два точечных заряда  $2 \text{ нКл}$  и  $5 \text{ мкКл}$  отталкиваются с силами, равными по модулю  $3 \text{ мН}$ . На каком расстоянии друг от друга находятся эти заряды?

## Повышенный уровень

28. Можно ли утверждать, что если лёгкий шарик, подвешенный на нити, притягивается к положительно заряженной палочке, то шарик обязательно заряжен отрицательно?
29. Когда к подвешенной на лёгкой нити незаряженной алюминиевой гильзе поднесли стеклянную палочку, потёртую о шёлк, гильза сначала притянулась к палочке, а коснувшись её, оттолкнулась от палочки. Объясните наблюдаемые явления.
30. Между двумя металлическими пластинами подвешен шарик из фольги (рис. 35.8). Что будет происходить, если сообщить пластинам разноимённые заряды и затем коснуться шариком одной из них?

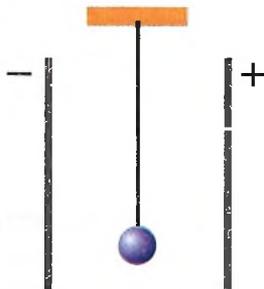


Рис. 35.8

31. Если расстояние между двумя точечными зарядами уменьшить на 0,5 м, то силы взаимодействия между ними увеличатся в 2 раза. На каком расстоянии друг от друга находятся точечные заряды первоначально?
32. Перенесите рисунок 35.9 в тетрадь и укажите на рисунке в тетради направление силы, действующей на заряд, помещённый в центр квадрата.
33. Точечный заряд  $-8$  нКл помещают в точку  $A$ , а точечный заряд  $4$  нКл — в точку  $B$  (рис. 35.10). В точку  $C$  помещают третий точечный заряд, равный  $5$  нКл. Определите модуль и направление силы, действующей на заряд, помещённый в точку  $A$ , со стороны других зарядов, если  $AB = 0,4$  м,  $AC = 1$  м.

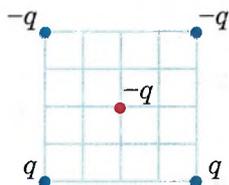


Рис. 35.9



Рис. 35.10

34. Снизу к подвешенному на нити маленькому шарiku массой 2 г с зарядом 30 нКл подносят на изолированной ручке другой шарик с зарядом 0,2 мкКл, причём расстояние между шариками составляет 6 см (рис. 35.11). Найдите силу натяжения нити, если шарики заряжены: а) одноимённо; б) разноимённо.



Рис. 35.11

**Высокий уровень**

35. Расскажите и поясните свой ответ рисунками: как можно зарядить положительным зарядом металлический кубик, лежащий на деревянном столе, если в вашем распоряжении имеется отрицательно заряженная палочка, заряд которой изменять нельзя.
36. Два металлических шара *A* и *B*, закреплённых на изолирующих подставках, привели в соприкосновение и сообщили им положительный заряд. Какими станут заряды этих шаров после того, как к ним поднесут положительно заряженную палочку, как показано на рисунке 35.12, шар *A* отодвинут от шара *B* и уберут палочку?



Рис. 35.12

37. Суммарный заряд двух маленьких металлических шариков равен 6 мкКл. Во сколько раз заряд одного шарика больше заряда другого, если они отталкиваются с силами, равными 72 мН, когда находятся на расстоянии 1 м друг от друга?
38. Когда расстояние между одинаковыми металлическими заряженными шариками равно 0,8 м, они притягиваются с силами, равными 211 мН. Шарики касаются друг друга, и их удаляют на прежнее расстояние один от другого, после чего они отталкиваются с силами, равными 14,1 мН. Определите начальные заряды шариков.
39. Заряженные равными зарядами шарики подвешены на нитях (рис. 35.13), причём силы натяжения нитей равны. Масса каждого шарика 8,1 г, длина каждой нити 0,2 м. Чему равен заряд каждого шарика? Чему равна сила натяжения каждой нити?



Рис. 35.13

## § 36. Напряжённость электрического поля. Линии напряжённости

### 1. Напряжённость электрического поля

Английский учёный М. Фарадей первым высказал предположение, что

электрическое взаимодействие заряженных тел осуществляется посредством *электрического поля*: каждое заряженное тело создаёт вокруг себя электрическое поле, которое действует на другие заряженные тела.

Это предположение в дальнейшем подтвердилось на опытах.

Электрическое поле в данной точке пространства характеризуется силой, которая действует со стороны поля на заряд<sup>1)</sup>, помещённый в данную точку. Поскольку эта сила пропорциональна заряду, *отношение* силы к заряду не зависит от величины заряда и характеризует само электрическое поле.

*Напряжённостью*  $\vec{E}$  электрического поля в данной точке называют физическую величину, равную отношению силы  $\vec{F}$ , действующей со стороны поля на заряд  $q$ , помещённый в данную точку поля, к величине этого заряда:

$$\vec{E} = \frac{\vec{F}}{q}.$$

Как следует из определения, напряжённость поля — *векторная* величина: её направление в данной точке пространства совпадает с направлением силы, действующей на *положительный* заряд ( $q > 0$ ), помещённый в эту точку. На *отрицательный* заряд ( $q < 0$ ) действует сила, направление которой *противоположно* направлению напряжённости поля.

*Единицей напряжённости поля* в СИ является Н/Кл.

- ° 1. Чему равна сила, действующая на отрицательный заряд, равный  $-20$  нКл, в точке пространства, в которой напряжённость

<sup>1)</sup> Этот заряд (его называют *пробным* зарядом) должен быть достаточно мал, чтобы создаваемое им поле не изменяло распределения зарядов, которые создают поле, исследуемое с помощью пробного заряда.



электрического поля составляет  $100 \text{ Н/Кл}$ ? Как направлена эта сила, если напряжённость поля  $\vec{E}$  направлена вверх?

- ° 2. На рисунке 36.1 изображены векторы напряжённости электрического поля, созданного *положительным* точечным зарядом в некоторых точках пространства, находящихся на одинаковых расстояниях от данного заряда. Почему напряжённость поля во всех точках направлена *от положительного заряда*?

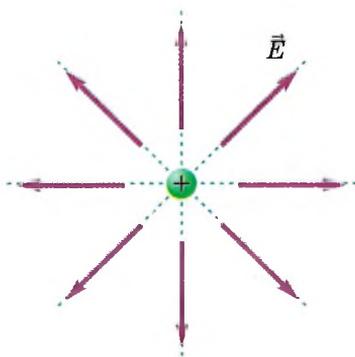


Рис. 36.1

- ° 3. Изобразите в тетради векторы напряжённости электрического поля, созданного *отрицательным* точечным зарядом в некоторых точках пространства, находящихся на одинаковых расстояниях от данного заряда.
- ° 4. Запишите выражение для модуля напряжённости поля точечного заряда  $Q$  в точке пространства, находящейся на расстоянии  $r$  от этого заряда.
- ° 5. Чему равен модуль напряжённости поля точечного заряда, равного по модулю  $10 \text{ нКл}$ , на расстоянии  $3 \text{ м}$  от заряда?
- ° 6. Модуль напряжённости поля, создаваемого точечным зарядом на расстоянии  $10 \text{ см}$  от заряда, равен  $3,6 \text{ кН/Кл}$ .
- Чему может быть равен данный заряд?
  - Чему равен модуль напряжённости поля на расстоянии  $20 \text{ см}$  от данного заряда?  $30 \text{ см}$  от данного заряда?  $1 \text{ м}$  от данного заряда?

### Принцип суперпозиции полей

Если заряд находится в поле, созданном *несколькими* зарядами, то равнодействующая сил, действующих на данный заряд, равна

*векторной сумме* сил, действующих на него со стороны каждого из зарядов. Поэтому справедлив *принцип суперпозиции полей*:

в каждой точке пространства напряжённость поля, созданного несколькими зарядами, равна векторной сумме напряжённостей полей, созданных каждым из зарядов в той же точке:

$$\vec{E} = \vec{E}_1 + \vec{E}_2 + \dots$$

7. Два положительных точечных заряда 1 и 2 по 1 нКл каждый расположены на расстоянии 6 см друг от друга.
- Изобразите в тетради положение этих зарядов в масштабе 1 : 1 и отметьте на рисунке точку А, находящуюся точно посередине между ними.
  - Изобразите векторы напряжённости полей  $\vec{E}_1$  и  $\vec{E}_2$ , созданных каждым из зарядов в точке А. Выберите масштаб, при котором 1 см соответствует  $10^4$  Н/Кл.
  - Чему равен модуль напряжённости поля, созданного *обоими* зарядами в точке А?

### Похожая задача

8. Два точечных заряда 1 и 2, равные соответственно 1 нКл и -1 нКл, расположены на расстоянии 60 см друг от друга.
- Чему равен модуль напряжённости поля, созданного каждым зарядом в точке А, находящейся точно посередине между ними?
  - Чему равен модуль напряжённости поля, созданного *обоими* зарядами в точке А?

### \*Более сложные задачи о нахождении напряжённости поля

9. На рисунке 36.2 изображены положительные точечные заряды и точка А, которая находится на серединном перпендикуляре к отрезку, соединяющему заряды.

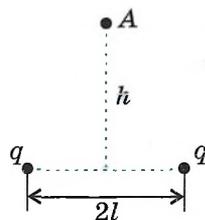


Рис. 36.2

- Перенесите чертёж в тетрадь и изобразите на нём направление напряжённости поля в точке А.
- Выразите модуль напряжённости поля, создаваемого *одним* из зарядов  $q$  в точке А, через  $q$ ,  $l$  и  $h$ .
- Выразите модуль напряжённости поля, создаваемого *обоими* зарядами в точке А, через  $q$ ,  $l$  и  $h$ .

**Похожая задача**

10. Два разноимённых точечных заряда  $q$  и  $-q$  находятся на расстоянии  $2l$  друг от друга. Точка  $A$  находится на серединном перпендикуляре к отрезку, соединяющему заряды, на расстоянии  $h$  от этого отрезка.

- а) Перенесите чертёж в тетрадь и изобразите на нём направление напряжённости поля в точке  $A$ .
- б) Выразите модуль напряжённости поля в точке  $A$  через  $q$ ,  $l$  и  $h$ .

**2. Линии напряжённости**

На примере поля точечного заряда (см. рис. 36.1) мы видим, что векторы напряжённости электрического поля выстраиваются *вдоль некоторых линий* (для поля, созданного точечным зарядом, это лучи, проведённые из точки, в которой находится точечный заряд).

Линии, касательные к которым в каждой точке совпадают с направлением напряжённости электрического поля, называют *линиями напряжённости* электрического поля.

Линии напряжённости обладают следующими важными свойствами:

- они *начинаются на положительных зарядах и заканчиваются на отрицательных*;
- *густота линий напряжённости пропорциональна модулю напряжённости*.

**Поле одного и двух точечных зарядов**

11. Объясните, почему линии напряжённости электрического поля точечных зарядов имеют вид, изображённый на рисунках 36.3, а и б. Считайте, что каждый заряд удалён от других зарядов.

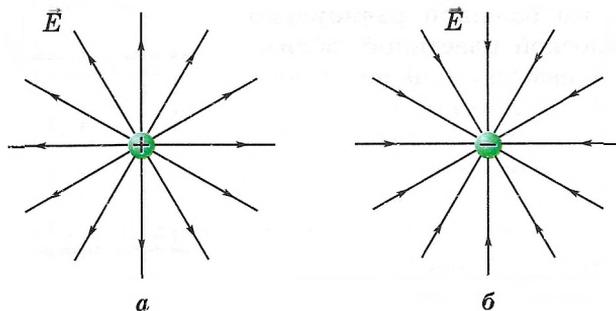


Рис. 36.3

Если поле создано *несколькими* зарядами, то линии напряжённости электрического поля будут *кривыми*. Например, на рисунке 36.4 изображены линии напряжённости поля, созданного двумя равными по модулю точечными зарядами (разноимёнными и одноимёнными). В некоторых точках для наглядности изображены векторы напряжённости поля.

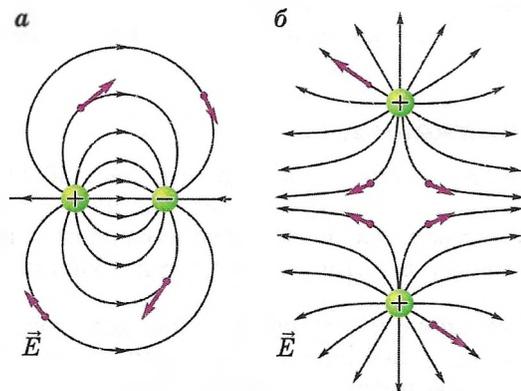


Рис. 36.4

12. Изобразите в тетради линии напряжённости электрического поля, созданного двумя равными по модулю *отрицательными* точечными зарядами.
13. Могут ли линии напряжённости электрического поля пересекаться? Обоснуйте ваш ответ.

### Поле равномерно заряженной плоскости

На рисунке 36.5 изображены линии напряжённости электрического поля, созданного большой равномерно заряженной плоской пластиной, вблизи пластины. Его называют полем *равномерно заряженной плоскости*.

Мы видим, что напряжённость поля равномерно заряженной плоскости *одинакова* (по модулю и по направлению) во всех точках пространства по любую сторону от плоскости. Такое электрическое поле называют *однородным*.

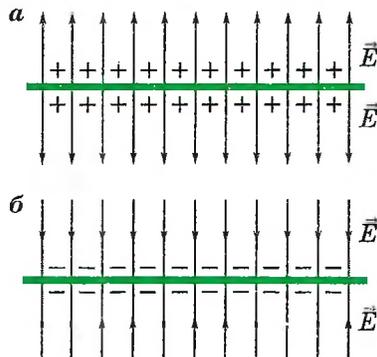


Рис. 36.5

Линии напряжённости однородного электрического поля — параллельные прямые, расположенные на равных расстояниях друг от друга.

- °14. Чем отличается напряжённость поля, созданного равномерно заряженной плоскостью с *положительным* зарядом (рис. 36.5, а), от поля, созданного равномерно заряженной плоскостью с *отрицательным* зарядом (рис. 36.5, б)?
- °15. Чем отличается напряжённость поля, созданного равномерно заряженной плоскостью, по разные стороны от плоскости?
16. В однородном электрическом поле напряжённостью  $1 \text{ кН/Кл}$  находится точечный заряд, равный по модулю  $0,1 \text{ нКл}$ .
- Изобразите в тетради линии напряжённости однородного электрического поля и поместите точечный заряд на одной из изображённых линий напряжённости.
  - На каком расстоянии от точечного заряда напряжённость созданного им поля равна по модулю напряжённости однородного поля?
  - Укажите на своём чертеже точку, в которой *резльтирующая* напряжённость поля равна нулю.

### Поле двух разноимённо заряженных плоских пластин

На рисунке 36.6 изображены линии напряжённости электрического поля в пространстве между двумя одинаковыми равномерно заряженными параллельными пластинами с равными по модулю, но противоположными по знаку зарядами.

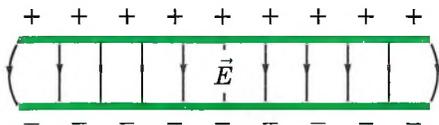


Рис. 36.6

17. Используя рисунок 36.6 и принцип суперпозиции, объясните, почему в пространстве *между пластинами* напряжённость поля в 2 раза больше, чем напряжённость поля, создаваемого каждой из пластин, а вне пластин практически равна нулю.

### Можно ли увидеть линии напряжённости?

#### Поставим опыт

Насыпем на стекло, помещённое над заряженными телами, мелкие тела продолговатой формы — например, мелко настрижен-

ную щетину от малярной кисти. Такие частицы выстраиваются в электрическом поле вдоль линий напряжённости, благодаря чему можно увидеть форму этих линий (рис. 36.7).

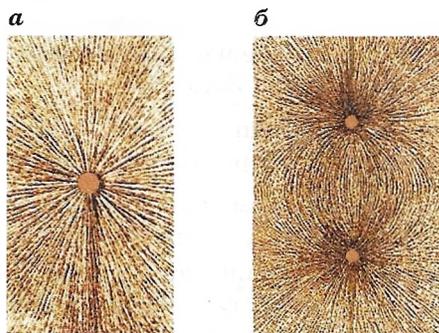


Рис. 36.7



°18. Сравните «картины» электрических полей, изображённые на рисунке 36.7, с рисунками 36.3 и 36.4. Какие выводы можно сделать?

### \*3. Поле равномерно заряженной сферы

На рисунке 36.8 изображены линии напряжённости электрического поля равномерно заряженной металлической сферы.

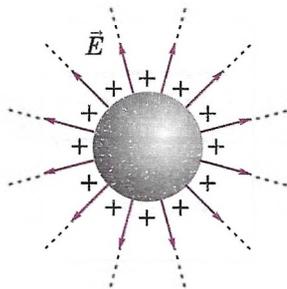


Рис. 36.8

Вне сферы это поле совпадает с полем точечного заряда, равно суммарному заряду сферы и расположенного в центре сферы, а внутри сферы напряжённость поля равна нулю<sup>1)</sup>.

1) Доказательство этих фактов выходит за рамки нашего курса.

19. Электрический заряд 6 нКл равномерно распределён по поверхности металлической сферы радиусом 5 см. Чему равна по модулю напряжённость созданного этим зарядом поля:

- а) на расстоянии 3 см от центра сферы;
- б) на расстоянии 6 см от центра сферы?

Если поместить в центре металлической равномерно заряженной сферы точечный заряд, то, согласно принципу суперпозиции, внутри сферы результирующее поле будет создаваться только этим точечным зарядом, а вне сферы вектор напряжённости поля в любой точке будет равен векторной сумме напряжённости поля, созданного точечным зарядом, и напряжённости поля, созданного равномерно заряженной сферой.

20. В центре металлической равномерно заряженной сферы радиусом 10 см с отрицательным зарядом, равным  $-9$  нКл, помещён точечный положительный заряд 6 нКл. Чему равна по модулю напряжённость результирующего поля:

- а) на расстоянии 6 см от центра сферы;
- б) на расстоянии 12 см от центра сферы?

**ЧТО МЫ УЗНАЛИ**

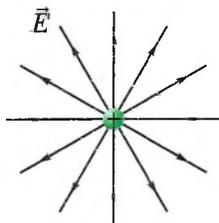
**Напряжённость поля**

$$\vec{E} = \frac{\vec{F}}{q}$$

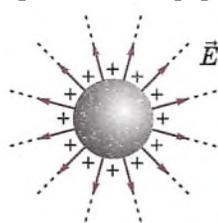
**Принцип суперпозиции полей**

$$\vec{E} = \vec{E}_1 + \vec{E}_2 + \dots$$

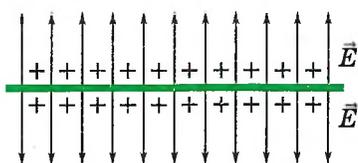
Поле точечного заряда



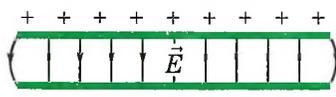
Поле равномерно заряженной сферы



Поле равномерно заряженной плоскости



Поле двух разноимённо заряженных плоскостей



## ? ДОПОЛНИТЕЛЬНЫЕ ВОПРОСЫ И ЗАДАНИЯ

### Базовый уровень

21. Чему равен модуль напряжённости электрического поля, действующего на отрицательный точечный заряд  $-20$  нКл, с силой  $0,2$  мН? Как направлен вектор напряжённости электрического поля, если под действием этой силы первоначально покоившийся заряд начал двигаться вниз?
22. Чему равен модуль напряжённости поля, создаваемого точечным зарядом  $2$  мкКл, на расстоянии  $1$  м от этого заряда? С какой по модулю силой это поле будет действовать на заряд  $5$  нКл, если заряды находятся на указанном расстоянии друг от друга?
23. Как направлен вектор напряжённости  $\vec{E}$  электрического поля, созданного двумя равными по модулю зарядами в точке  $O$ , равноудалённой от зарядов (рис. 36.9,  $a-z$ )?

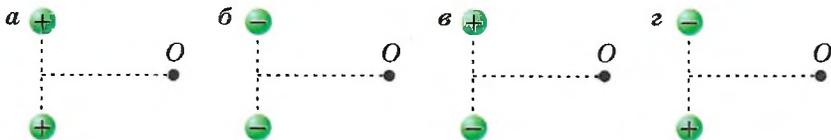


Рис. 36.9

24. Каждый из четырёх одинаковых по величине и знаку зарядов, расположенных в вершинах квадрата, создаёт в точке  $A$  электрическое поле, модуль напряжённости которого равен  $E$  (рис. 36.10,  $a, б$ ). Чему равен в каждом случае модуль напряжённости поля в точке  $A$ ?

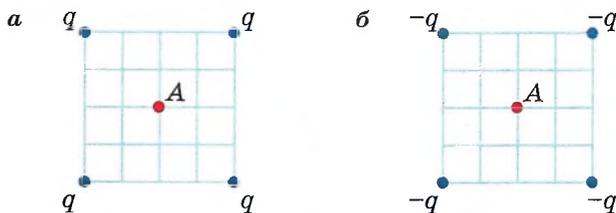


Рис. 36.10

25. Какое ускорение сообщает электрону электрическое поле, напряжённость которого равна  $2,7$  кН/Кл?

### Повышенный уровень

26. Чему равна напряжённость электрического поля равномерно заряженной сферы радиусом  $0,1$  м, несущей заряд  $8$  нКл:
- в центре сферы;
  - на расстоянии  $7$  см от центра сферы;
  - на расстоянии  $15$  см от центра сферы;
  - на расстоянии  $8$  см от ближайшей точки поверхности сферы?

27. В однородном электрическом поле, модуль напряжённости которого равен  $E$ , заряженная пылинка массой  $m$  движется с ускорением, равным по модулю  $a$ . С каким по модулю ускорением будет двигаться пылинка массой  $2m$  в поле напряжённостью  $E/3$ , если заряды обеих пылинок одинаковы?
28. Перенесите рисунок 36.11 в тетрадь и изобразите на нём векторы напряжённости полей, создаваемых зарядами  $-q$  и  $2q$  в точке  $A$ , расположенной посередине отрезка, соединяющего эти заряды. Как направлена напряжённость результирующего электрического поля? Как изменится модуль напряжённости поля в точке  $A$ , если убрать заряд  $2q$ ?



Рис. 36.11

29. Неподвижные точечные заряды  $-q$  и  $-3q$  расположены в точках  $A$  и  $C$ , причём  $AB = BC$  (рис. 36.12). Каким зарядом надо заменить заряд  $-q$ , чтобы:
- напряжённость поля в точке  $B$  стала равной нулю;
  - модуль напряжённости поля в точке  $B$  стал в 2 раза больше по сравнению с начальным;
  - модуль напряжённости поля в точке  $B$  стал в 2 раза меньше по сравнению с начальным?

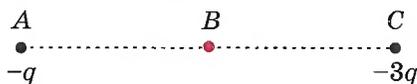


Рис. 36.12

30. Маленький заряженный шарик массой  $0,2$  г подвешен на нити в однородном электрическом поле, напряжённость которого направлена горизонтально. Чему равен заряд шарика, если угол отклонения нити от вертикали равен  $30^\circ$ , а модуль напряжённости поля равен  $50$  кН/Кл?
31. Капелька воды радиусом  $0,01$  мм, потеряв тысячу электронов, находится в равновесии в однородном электрическом поле. Чему равен модуль напряжённости этого электрического поля и как направлен вектор напряжённости?
32. Большая однородно заряженная пластина создаёт электрическое поле напряжённостью  $500$  Н/Кл. Точечный заряд, равный по модулю  $2$  нКл, находится на расстоянии  $0,2$  м от этой пластины. На каком расстоянии от пластины напряжённость результирующего электрического поля равна нулю, если:
- точечный заряд и пластина одноимённо заряжены;
  - точечный заряд и пластина разноимённо заряжены?

## Высокий уровень

33. Точечные заряды  $10 \text{ нКл}$  и  $-10 \text{ нКл}$  расположены в двух вершинах равностороннего треугольника со стороной  $1 \text{ м}$ . Чему равен модуль напряжённости электрического поля в третьей вершине треугольника?
34. Два одинаковых заряда по  $100 \text{ нКл}$  каждый расположены на концах гипотенузы прямоугольного треугольника с катетами длиной  $30 \text{ см}$  и  $40 \text{ см}$ . Чему равен модуль напряжённости электрического поля в вершине прямого угла?
35. Точечные заряды  $q_A$  и  $q_B$  создают в точке  $C$  электрическое поле, вектор напряжённости которого изображён на рисунке 36.13. Каков знак каждого заряда? Модуль какого заряда больше и во сколько раз?
36. На двух нитях равной длины, верхние концы которых закреплены в одной точке, подвешены два положительно заряженных шарика массой  $m$  каждый. Заряды шариков равны  $q_1$  и  $q_2$ . Шарик находится в равновесии, когда одна из нитей отклонена от вертикали на угол  $\alpha$ .
- На одинаковые ли углы отклонены нити от вертикали?
  - Чему равен модуль напряжённости электрического поля в точке, находящейся в середине отрезка, соединяющего шарики?
37. Шарик массой  $m$ , имеющий положительный заряд  $q$ , падает с высоты  $h$  на горизонтально закреплённую отрицательно заряженную пластину, создающую электрическое поле с модулем напряжённости  $E$ . Чему равен модуль импульса, который шарик передаст пластине в результате абсолютно упругого удара?

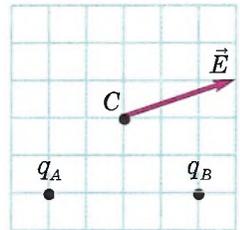


Рис. 36.13

## § 37. Проводники и диэлектрики в электрическом поле

### 1. Проводники в электрическом поле

Лучшие проводники — металлы. Носителями заряда в них являются *свободные электроны*. Ими являются внешние электроны атомов, которые настолько слабо связаны с ядрами атомов, что могут свободно перемещаться в пределах всего металлического образца.

Поэтому, если металлический предмет внести в электрическое поле, в нём сразу же начнётся перераспределение зарядов.

На рисунке 37.1 схематически показано, что металлический шар вносят в однородное электрическое поле.

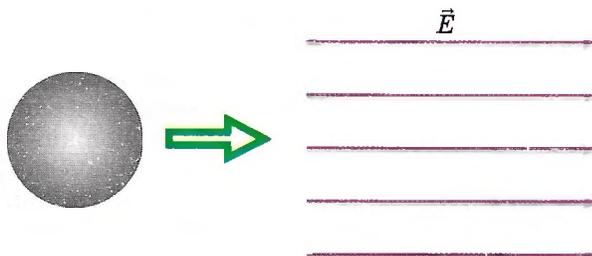


Рис. 37.1

1. В каком направлении начнут двигаться свободные электроны в шаре — влево или вправо?

Вследствие движения свободных электронов в шаре начнётся перераспределение заряда (рис. 37.2): на одной его стороне возникнет *избыток электронов* (там появится *отрицательный заряд*), а на другой стороне — *недостаток электронов* (там появится *положительный заряд*).

Перераспределение заряда будет происходить до тех пор, пока на свободные электроны в шаре будет действовать сила со стороны электрического поля, то есть до тех пор, пока напряжённость *результатирующего* поля (суперпозиции внешнего поля и поля, созданного зарядами, возникшими на поверхности шара) не станет равной нулю. Это перераспределение заряда происходит практически мгновенно. Следовательно,

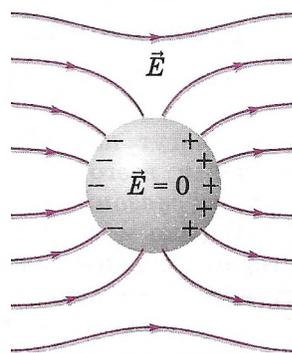


Рис. 37.2

при равновесии зарядов напряжённость электрического поля внутри проводника равна нулю:

$$\vec{E} = 0.$$

Перераспределение зарядов в проводнике, вследствие которого напряжённость электрического поля в проводнике становится равной нулю, называют *электростатической индукцией*.

Заряды, возникшие в проводнике при перераспределении заряда, изменяют напряжённость поля не только внутри проводника, но и вне его (см. рис. 37.2). При этом линии напряжённости результирующего поля вблизи поверхности проводника станут *перпендикулярными* этой поверхности.

## Электростатическая защита

Можно доказать<sup>1)</sup>, что в результате перераспределения зарядов возникают заряды только *на поверхности* проводника. Поэтому напряжённость результирующего электрического поля равна нулю при равновесии зарядов не только в сплошном проводнике, но и внутри полого проводника — например, внутри металлической *сферы*.

Более того, стенки проводника даже не должны быть сплошными: они могут быть изготовлены из металлической сетки. Это используют для *электростатической защиты*. Например, в металлическую сетку заключают чувствительные к электрическому полю приборы.

## 2. Диэлектрики в электрическом поле

Электроны в атомах диэлектриков достаточно сильно связаны со своими атомными ядрами и не могут поэтому свободно перемещаться в пределах всего образца. Такие электроны называют *связанными*.

Однако молекулы диэлектриков также «чувствуют» внешнее электрическое поле: под действием этого поля они могут *поворачиваться*, а также *изменять свою форму*.

**Полярные диэлектрики.** Так называют диэлектрики, в молекулах которых центры положительных и отрицательных зарядов не совпадают (рис. 37.3, а). Примером полярного диэлектрика является *вода*.

На рисунке 37.3, б схематически изображено действие электрического поля на молекулу полярного диэлектрика: молекула поворачивается и ориентируется вдоль линий напряжённости (рис. 37.3, в).

**Неполярные диэлектрики.** Так называют диэлектрики, в которых центры распределения положительных и отрицательных зарядов совпадают (рис. 37.4, а). Неполярными диэлектриками являются, например, многие газы.

Когда молекула неполярного диэлектрика оказывается в электрическом поле, центры распределения положительных и отрицательных зарядов смещаются под действием поля

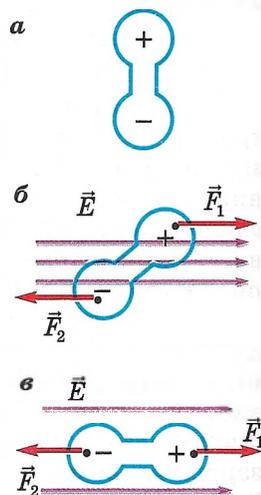


Рис. 37.3

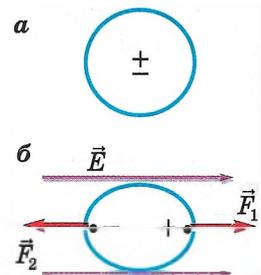


Рис. 37.4

<sup>1)</sup> Доказательство этого факта выходит за пределы нашего курса.

в *противоположные* стороны (рис. 37.4, б). В результате молекула неполярного диэлектрика становится подобной молекуле полярного диэлектрика: она ориентируется вдоль линий напряжённости внешнего поля.

### Поляризация диэлектрика

Ориентацию молекул диэлектрика вдоль линий напряжённости внешнего электрического поля называют *поляризацией диэлектрика*.

При этом внутри диэлектрика положительный и отрицательный заряды ориентированных по внешнему полю молекул компенсируют друга, а на поверхности диэлектрика появляются *поверхностные заряды* (рис. 37.5). Эти заряды обусловлены смещением заряда внутри молекул или поворотом молекул, поэтому их называют *связанными*.

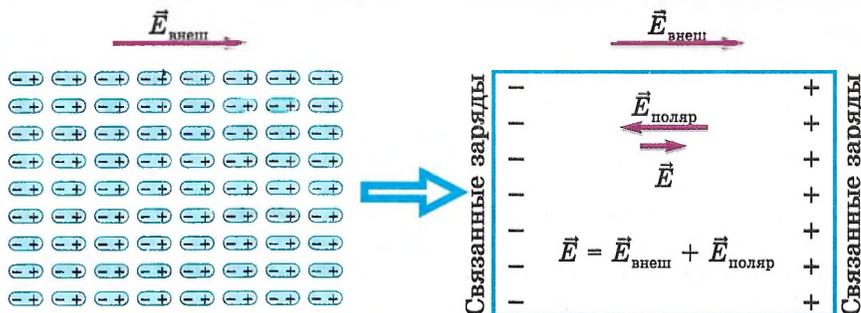


Рис. 37.5

Заряды, возникшие на поверхности диэлектрика, создают поле  $\vec{E}_{\text{поляр}}$ , напряжённость которого направлена *противоположно* напряжённости внешнего поля  $\vec{E}_{\text{внеш}}$  (см. рис. 37.5). Поэтому модуль напряжённости результирующего поля внутри диэлектрика  $\vec{E} = \vec{E}_{\text{внеш}} + \vec{E}_{\text{поляр}}$  будет *меньше*, чем модуль напряжённости внешнего поля  $\vec{E}_{\text{внеш}}$ . Таким образом,

вследствие поляризации диэлектрика напряжённость электрического поля внутри диэлектрика *уменьшается*. Величину, которая показывает, во сколько раз уменьшается напряжённость внешнего электрического поля внутри однородного диэлектрика, называют его *диэлектрической проницаемостью* и обозначают  $\epsilon$ .

Диэлектрическая проницаемость некоторых твёрдых тел и жидкостей приведена в справочных данных на форзаце учебника. Обра-

тите внимание на большое значение диэлектрической проницаемости воды. Диэлектрическая проницаемость воздуха и других газов очень близка к 1, поэтому при решении задач её принимают обычно равной 1.



2. Почему диэлектрическая проницаемость газов намного меньше, чем диэлектрическая проницаемость жидкостей и твёрдых тел?
3. Маленький шарик с зарядом 20 нКл помещают в большой аквариум с дистиллированной водой. Чему будет равна напряжённость поля на расстоянии 25 см от центра шарика?

Уменьшение напряжённости электрического поля в диэлектрике в  $\varepsilon$  раз приводит к тому, что во столько же раз уменьшается сила взаимодействия заряженных тел, погружённых в диэлектрик, поскольку взаимодействие заряженных тел осуществляется посредством электрического поля.



4. Запишите выражение для модуля силы взаимодействия двух точечных зарядов  $q_1$  и  $q_2$ , находящихся на расстоянии  $r$  друг от друга и погружённых в диэлектрик с диэлектрической проницаемостью  $\varepsilon$ .
5. Небольшие шарики с зарядом 30 нКл каждый погружены в некоторую жидкость и находятся на расстоянии 20 см друг от друга. Какая это может быть жидкость, если шарики отталкиваются с силами, равными 7,8 мкН?

### \*3. Равновесие подвешенных на нитях заряженных шариков в воздухе и в жидком диэлектрике



6. На нитях одинаковой длины  $l$  подвешены в воздухе два шарика массой  $m$  каждый. Положительные заряды шариков равны  $q_1$  и  $q_2$  (рис. 37.6). Шарик находится в равновесии.

- Почему нити отклонились от вертикали?
- Одинаково ли отклоняются обе нити от вертикали?
- Сделайте чертёж и изобразите на нём все силы, действующие на каждый шарик.
- Запишите соотношение между действующими на один шарик силой тяжести, силой отталкивания со стороны другого шарика и углом  $\alpha$  между нитью и вертикалью.
- Выразите расстояние  $r$  между шариками через  $l$  и  $\alpha$ .
- Запишите соотношение, которое связывает  $m$ ,  $l$ ,  $\alpha$ ,  $q_1$  и  $q_2$ .
- Какие задачи можно поставить, используя это соотношение?



Рис. 37.6

**Похожая задача**

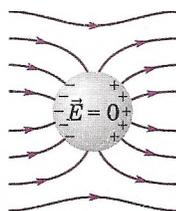
7. Когда шарики (см. предыдущую задачу) погрузили в жидкий диэлектрик плотностью  $\rho_{\text{ж}}$  с диэлектрической проницаемостью  $\epsilon$ , угол между нитями *не изменился*. Плотность вещества, из которого изготовлены шарики, равна  $\rho_{\text{ш}}$ .
- Какие ещё физические явления надо учитывать в этой ситуации по сравнению с прежней ситуацией?
  - Выразите  $\epsilon$  через  $\rho_{\text{ш}}$  и  $\rho_{\text{ж}}$ .

**ЧТО МЫ УЗНАЛИ**

**Проводники в электрическом поле**

При равновесии зарядов электрическое поле внутри проводника равно нулю:

$$\vec{E} = 0$$

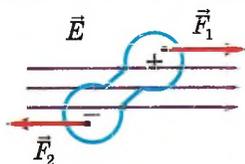


**Закон Кулона**

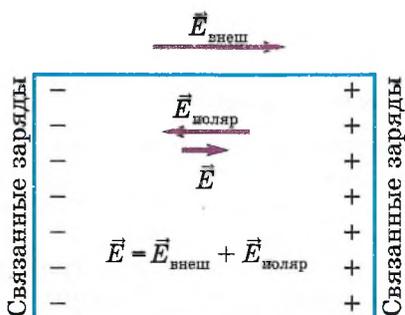
$$F = k \frac{|q_1||q_2|}{\epsilon r^2}$$

**Диэлектрики в электрическом поле**

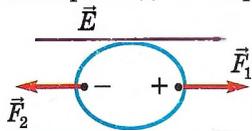
Полярные диэлектрики



Поляризация диэлектриков



Неполярные диэлектрики



## ДОПОЛНИТЕЛЬНЫЕ ВОПРОСЫ И ЗАДАНИЯ

### Базовый уровень

8. К состоящему из двух частей  $A$  и  $B$  незаряженному телу поднесли положительно заряженную палочку, как показано на рисунке 37.7. Части тела развели в стороны и после этого убрали палочку.
- Будут ли заряжены части, и если будут, то как, если тело изготовлено из проводника?
  - Будут ли заряжены части, и если будут, то как, если тело изготовлено из диэлектрика?
  - Как изменятся ответы, если палочка будет заряжена отрицательно?

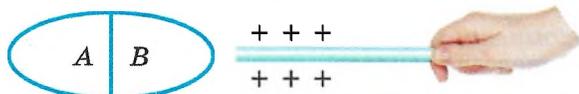


Рис. 37.7

9. К незаряженному шарик, висящему на нити, поднесли такой же, но заряженный шарик на изолирующей подставке. Будет ли незаряженный шарик взаимодействовать с заряженным, и если да, то как: притягиваться или отталкиваться? Зависит ли результат от того, из чего изготовлены шарики: из проводника или из диэлектрика?
10. Как изменятся силы взаимодействия двух точечных зарядов после того, как их из воздуха перенесут в керосин, не изменяя расстояния между зарядами?

### Повышенный уровень

11. Проводящему полому шару с толстыми стенками сообщили положительный заряд. На рисунке 37.8 показано сечение шара. В какой (каких) из областей  $A$ ,  $B$ ,  $C$  напряжённость электрического поля будет равна нулю? Изменится ли ответ, если шару сообщить отрицательный заряд?

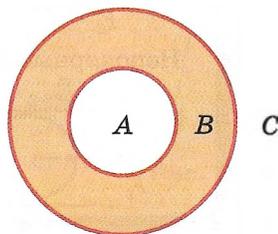


Рис. 37.8

12. Во сколько раз надо изменить расстояние между двумя точечными зарядами после того, как их перенесут из воздуха в дистиллированную воду, чтобы силы их электрического взаимодействия остались прежними?

13. Два одинаковых точечных заряда, находящихся в керосине, взаимодействуют с теми же по модулю силами, что и в случае, когда эти заряды находились в воздухе на расстоянии 20 см друг от друга. Чему равно расстояние между зарядами в керосине?
14. Чему равна диэлектрическая проницаемость жидкого диэлектрика, если заряд 8 нКл, помещённый в него, создаёт электрическое поле, напряжённость которого на расстоянии 5 см от заряда равна 4,8 кН/Кл?
15. Два точечных заряда взаимодействуют друг с другом в воздухе с силами 4 мН. Заряды помещают в парафин, уменьшив при этом расстояние между ними в 3 раза. С какими по модулю силами станут теперь взаимодействовать заряды?
16. В каком диэлектрике два точечных заряда, находящиеся на расстоянии 2 см друг от друга, будут взаимодействовать с силами, в 2,89 раз меньшими, чем силы взаимодействия этих же зарядов в воздухе, когда они находятся на расстоянии 6 см друг от друга?

### Высокий уровень

17. Два одинаковых кусочка ваты лежат на пластинах: первый — на стеклянной, второй — на металлической. Объясните, почему второй кусочек ваты будет притягиваться к поднесённой к нему заряженной палочке сильнее, чем первый.
18. Два одноимённо заряженных шарика соединены горизонтальной пружиной. Когда шарики находятся в воздухе, длина пружины равна 18 см, а когда шарики с пружиной погружены в керосин, длина пружины равна 16 см. Чему будет равна длина пружины, если её отсоединить от шариков?
19. Проводящий шар радиусом 10 см с зарядом 6 нКл окружён сферической диэлектрической оболочкой радиусом 20 см. Чему равна напряжённость поля в точках А и В (рис. 37.9), если диэлектрическая проницаемость вещества оболочки равна 3? Точки А и В находятся внутри диэлектрика вблизи границ соответственно с заряженным шаром и с воздухом.

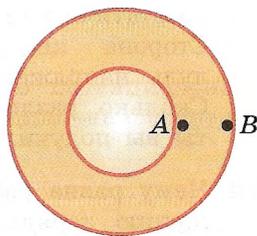


Рис. 37.9

## § 38. Работа электрического поля. Разность потенциалов (напряжение)

### 1. Работа поля при перемещении заряда

Электрическое поле, созданное *покоящимися* электрическими зарядами, называют *электростатическим*<sup>1)</sup>.

Обозначим  $\vec{F}$  силу, действующую со стороны этого поля на электрический заряд  $q$ . При перемещении заряда в однородном поле эта сила совершает работу  $A = Fscos\alpha$ , где  $\alpha$  — угол между направлением силы и направлением перемещения  $\vec{s}$ . Поскольку  $\vec{F} = q\vec{E}$ , получаем:

$$A = Eqscos\alpha.$$

- 1) Положительный заряд движется вдоль линии напряжённости электрического поля, причём направление перемещения заряда совпадает с направлением вектора напряжённости. Каков *знак* работы поля по перемещению заряда? Изменится ли знак работы, если изменить знак заряда?
- 2) Отрицательный заряд перемещают перпендикулярно линиям напряжённости электрического поля. Чему равна работа поля по перемещению заряда?
- 3) Запишите выражения для работы поля по перемещению точечного заряда  $q$  по сторонам и диагоналям квадрата  $ABCD$  в однородном электростатическом поле (рис. 38.1). Сторона квадрата равна  $a$ , модуль напряжённости поля равен  $E$ . Сколько различных значений работы вы получили?
- 4) Чему равна работа поля по перемещению заряда по *замкнутой* траектории, состоящей из четырёх сторон квадрата (см. рис. 38.1)?

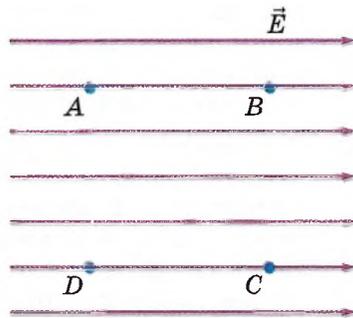


Рис. 38.1

1) В курсе физики 11-го класса мы рассмотрим также вихревое электрическое поле, которое порождается не электрическими зарядами, а изменяющимся магнитным полем. Для вихревого электрического поля нельзя ввести понятие разности потенциалов, которое рассматривается в этом параграфе.

На примере этого задания мы видим, что

работа электростатического поля при перемещении заряда из одной точки в другую зависит только от положения начальной и конечной точек и не зависит от траектории движения заряда. Работа электростатического поля при перемещении заряда по *замкнутому* контуру равна нулю.

Расчёты и опыты показывают, что это справедливо для *любого* электростатического поля.

- ° 5. На рисунке 38.2 изображены линии напряжённости некоторого электростатического поля. Одинаковую ли работу совершает поле при перемещении заряда из точки 1 в точку 2 по траекториям *a* и *б*?

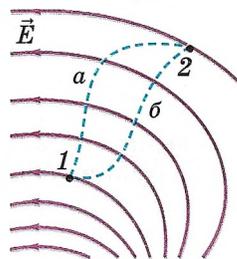


Рис. 38.2

## 2. Разность потенциалов (напряжение)

На примере работы силы тяжести и работы силы упругости мы видели, что, когда работа по перемещению тела зависит только от начального и конечного положения тела, можно ввести понятие *потенциальной энергии*.

Мы видели также, что работа по перемещению заряда в электростатическом поле не зависит от формы траектории, а определяется только начальным и конечным положением заряда. Поэтому для заряда в электростатическом поле можно ввести понятие потенциальной энергии.

Обозначим потенциальную энергию заряда в поле  $W_p$ . Напомним: *изменение* потенциальной энергии равно работе  $A$ , совершаемой телом или системой тел, взятой со знаком минус:

$$\Delta W_p = -A.$$

Если заряд переместился из точки 1, где его потенциальная энергия была равна  $W_{p1}$ , в точку 2, где его потенциальная энергия равна  $W_{p2}$ , то *изменение* потенциальной энергии

$$\Delta W_p = W_{p2} - W_{p1}.$$

Обозначим  $A_{12}$  работу поля по перемещению заряда из точки 1 в точку 2. Тогда

$$W_{p2} - W_{p1} = -A_{12}.$$

Эту формулу можно записать также в виде

$$W_{p1} - W_{p2} = A_{12}.$$

Рассмотрим конкретные примеры.

° 6. Положительный заряд перемещается в направлении линии напряжённости электростатического поля. Какой знак имеет работа поля? Как изменяется потенциальная энергия заряда — увеличивается или уменьшается?

° 7. На рисунке 38.3 показаны линии напряжённости электростатического поля и отмечено несколько точек. В начальный момент положительный заряд находится в точке  $M$ . Перенесите рисунок в тетрадь и обведите красным точки, в которых потенциальная энергия заряда была бы больше, чем в точке  $M$ , синим — точки, в которых потенциальная энергия заряда была бы меньше, чем в точке  $M$ , зелёным — точки, в которых потенциальная энергия заряда была бы равна потенциальной энергии заряда в точке  $M$ .

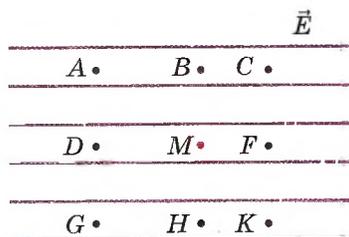


Рис. 38.3

Поскольку сила, действующая на заряд со стороны электрического поля, пропорциональна величине заряда, то и работа поля по перемещению заряда также пропорциональна величине заряда. Значит, пропорциональна величине заряда и потенциальная энергия заряда в поле. Это означает, что *отношение* потенциальной энергии заряда в электростатическом поле к величине заряда не зависит от заряда и поэтому характеризует *само поле*.

Отношение потенциальной энергии заряда в данной точке поля к величине этого заряда называют *потенциалом* электростатического поля  $\varphi$  в этой точке:

$$\varphi = \frac{W_p}{q}.$$

Физический смысл имеет не потенциал поля в данной точке, а *разность потенциалов* между *двумя* точками, поскольку она связана с работой поля по перемещению заряда из одной точки в другую. Используя последние две формулы, находим, что

*разность потенциалов* между точками 1 и 2 равна отношению работы поля  $A_{12}$  по перемещению заряда из точки 1 в точку 2 к величине заряда:

$$\varphi_1 - \varphi_2 = \frac{A_{12}}{q}.$$

Единицей разности потенциалов в СИ является вольт (В). Эта единица названа в честь итальянского учёного А. Вольта.

° 8. Докажите, что  $1 \text{ В} = 1 \text{ Дж} / 1 \text{ Кл}$ .

° 9. При перемещении заряда  $10 \text{ нКл}$  из точки 1 в точку 2 электростатическое поле совершило работу  $10^{-6} \text{ Дж}$ . Чему равна разность потенциалов между этими точками?

° 10. Отрицательный заряд  $q = -50 \text{ нКл}$  перемещают из точки с потенциалом  $300 \text{ В}$  в точку с потенциалом  $100 \text{ В}$ .

а) Каков знак работы поля по перемещению заряда?

б) Чему равна работа поля?

Разность потенциалов мы будем называть<sup>1)</sup> также *напряжением* и обозначать  $U$ . Если известно напряжение  $U$  между точками 1 и 2, то работу поля  $A$  по перемещению заряда  $q$  из точки 1 в точку 2 можно найти по формуле

$$A = qU.$$

### 3. Соотношение между напряжением и напряжённостью для однородного поля

Слова «напряжение» и «напряжённость» очень похожи, что может затруднить понимание различия между этими физическими величинами.

Различие между ними состоит в следующем.

*Напряжённость*  $\vec{E}$  — это *силовая* характеристика электрического поля в *данной точке* пространства, потому что она характеризует *силу*, действующую на заряд  $q$ , помещённый в *эту точку*:  $\vec{E} = \frac{\vec{F}}{q}$ .

*А напряжение*  $U$  — это *энергетическая* характеристика электростатического поля, потому что она связана с *работой*  $A$  по перемещению заряда  $q$  из точки 1 в точку 2:  $U = \frac{A}{q}$ . Таким образом, говорить о напряжении можно только приме-

нительно к *двум точкам* пространства.

Рассмотрим простейший случай, когда положительный заряд  $q$  перемещается в однородном электростатическом поле вдоль линии напряжённости поля из точки 1 в точку 2 на расстояние  $d$  (рис. 38.4).

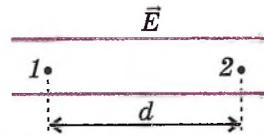


Рис. 38.4

<sup>1)</sup> В школьном курсе физики напряжение и разность потенциалов рассматриваются как разные названия одной физической величины. Рассмотрение различия между этими величинами выходит за рамки нашего курса.

- ? 11. Докажите, что напряжение  $U$  между точками 1 и 2 связано с модулем напряжённости поля  $E$  и расстоянием между этими точками соотношением

$$U = Ed.$$

Соотношение между напряжённостью однородного поля и напряжением можно записать также в виде

$$E = \frac{U}{d}.$$

Из этого соотношения следует, что единицу напряжённости поля можно определить также как *вольт на метр* (В/м).

- ? 12. Докажите, что  $1 \frac{\text{В}}{\text{м}} = 1 \frac{\text{Н}}{\text{Кл}}$ .

13. Земля является огромным заряженным шаром. Напряжённость поля вблизи поверхности Земли направлена вертикально и составляет 130 В/м. Чему равно напряжение между точками, находящимися на одной вертикали на расстоянии 170 см друг от друга? Почему мы не ощущаем этого напряжения?

#### 4. Эквипотенциальные поверхности

- ? 14. На рисунке 38.5 показаны линии напряжённости однородного электростатического поля. Красной пунктирной линией обозначена плоскость, перпендикулярная этим линиям. Чему равна разность потенциалов между любыми двумя точками, находящимися на этой плоскости?

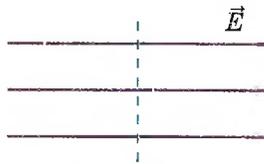


Рис. 38.5

Поверхность, все точки которой имеют равный потенциал, называют *эквипотенциальной*<sup>1)</sup> *поверхностью*.

1) От латинского слова «эквус» — равный.

15. На рисунке 38.6 изображены линии напряжённости поля, созданного небольшим заряженным шариком. Объясните, почему эквипотенциальной поверхностью в этом поле является любая сфера, центр которой совпадает с центром шарика (сечения таких сфер изображены красным пунктиром).

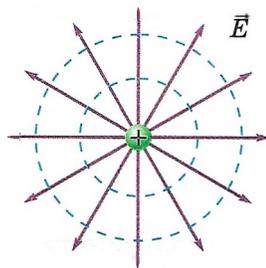


Рис. 38.6

16. Является ли эквипотенциальной поверхность проводника, если заряды на нём находятся в равновесии? Обоснуйте ваш ответ.

### \*5. Движение заряженной частицы в однородном электрическом поле

Из закона сохранения энергии следует, что при движении заряженной частицы в электростатическом поле сумма потенциальной и кинетической энергий частицы остаётся неизменной.

17. Электрон переместился в однородном электростатическом поле со скоростью, направленной *вдоль* линий напряжённости поля, из точки с потенциалом 700 В в точку с потенциалом 200 В.
- Увеличивается или уменьшается скорость электрона?
  - Изменяется ли сумма потенциальной и кинетической энергий электрона?
  - Чему равно изменение потенциальной энергии электрона?
  - Чему равно изменение кинетической энергии электрона?
  - Какова минимальная начальная скорость электрона?
18. Электрон влетает в однородное электростатическое поле со скоростью  $8 \cdot 10^6$  м/с, направление которой совпадает с направлением линий напряжённости поля. Модуль напряжённости поля  $10^4$  В/м.
- Через какой промежуток времени электрон вернётся в начальную точку?
  - Какой путь проделает электрон до возвращения в начальную точку?
  - С какой скоростью электрон вернётся в начальную точку?

19. Заряженная частица с зарядом  $q$  и массой  $m$  влетает в однородное электростатическое поле с начальной скоростью  $v_0$ , направленной перпендикулярно линиям напряжённости поля. Модуль напряжённости равен  $E$ .

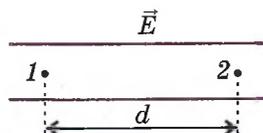
- По какой траектории будет двигаться частица?
- Чему будет равен модуль  $a$  ускорения частицы?
- Чему будет равен модуль скорости частицы  $v$  через промежуток времени  $t$ ?



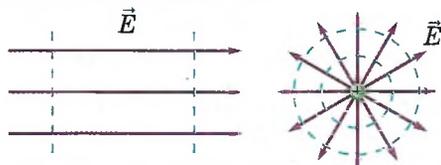
### ЧТО МЫ УЗНАЛИ

Разность потенциалов (напряжение)  $\varphi_1 - \varphi_2 = \frac{A_{12}}{q}$

В однородном поле  $E = \frac{U}{d}$



Эквипотенциальные поверхности

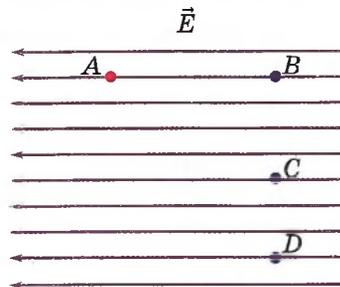


### ? ДОПОЛНИТЕЛЬНЫЕ ВОПРОСЫ И ЗАДАНИЯ

#### Базовый уровень

20. Чему равна работа по перемещению заряда  $10 \text{ мкКл}$  в однородном электростатическом поле напряжённостью  $2 \text{ кВ/м}$  на расстояние  $10 \text{ см}$ , если:

- заряд перемещают вдоль линий напряжённости поля;
- заряд перемещают перпендикулярно линиям напряжённости поля?



21. Сравните значения работы по перемещению протона из точки  $A$  в точки  $B$ ,  $C$ ,  $D$  в электростатическом поле, линии напряжённости которого изображены на рисунке 38.7.

Рис. 38.7

22. Чему равен потенциал электростатического поля в точке, в которой находится точечный заряд  $20 \text{ нКл}$ , если его потенциальная энергия равна  $40 \text{ мкДж}$ ?
23. Разность потенциалов между двумя точками электростатического поля равна  $100 \text{ В}$ . Какую работу надо совершить, чтобы переместить заряд  $40 \text{ мкКл}$  между этими точками?

### Повышенный уровень

24. Точечный заряд  $10 \text{ нКл}$  переместили в однородном электростатическом поле, напряжённость которого  $400 \text{ кВ/м}$ . Учитывая, что вектор перемещения составляет угол  $30^\circ$  с вектором напряжённости, а модуль перемещения равен  $0,2 \text{ м}$ , ответьте на вопросы.
- Чему равна работа поля по перемещению заряда?
  - Как при этом изменилась потенциальная энергия заряда?
  - Потенциал какой точки выше — начальной или конечной? Насколько выше?
25. Точечный заряд  $6 \text{ мкКл}$  перемещают в однородном электростатическом поле напряжённостью  $500 \text{ В/м}$  из точки  $A$  в точку  $B$  (рис. 38.8). Чему равна работа электростатического поля по перемещению этого заряда?

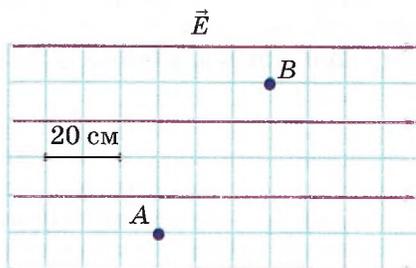


Рис. 38.8

26. Могут ли линии напряжённости электростатического поля иметь вид, показанный на рисунке 38.9? Обоснуйте свой ответ.

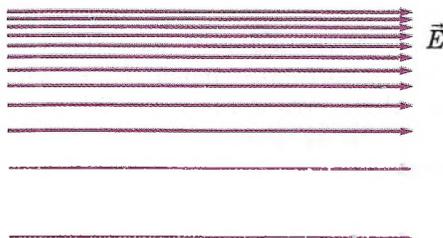


Рис. 38.9

27. Пылинка массой 20 мг находится в равновесии между двумя большими горизонтальными заряженными пластинами, разность потенциалов между которыми равна 50 В. Чему равно расстояние между пластинами, если заряд пылинки равен 1 мкКл?
28. Шарик массой 10 г и зарядом 20 мкКл подвешен на нити между двумя горизонтальными непроводящими заряженными пластинами (рис. 38.10). Чему равна сила натяжения нити, если расстояние между пластинами равно 5 см, а напряжение между ними 80 В?
29. Протон переместился на 20 см в однородном электростатическом поле со скоростью, направленной *вдоль* линий напряжённости поля. При этом его потенциальная энергия *уменьшилась* на  $2 \cdot 10^{-18}$  Дж.
- а) Как при этом изменилась его кинетическая энергия?
  - б) Чему равен модуль напряжённости поля?
  - в) Изменились бы, и если да, то как, кинетическая и потенциальная энергии протона, если бы он двигался в противоположную сторону при прочих равных условиях?

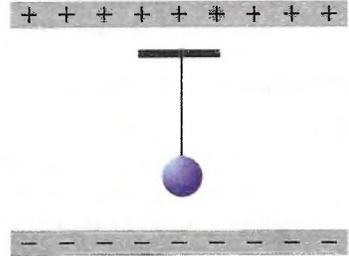


Рис. 38.10

### Высокий уровень

30. Между двумя вертикальными пластинами на пружине жёсткостью 100 Н/м подвешен маленький шарик массой 3 г. Чему равен заряд шарика, если удлинение пружины 0,5 мм, напряжение между пластинами 5 кВ, а расстояние между ними 5 см?
31. Шарик массой 0,3 г с зарядом 6 нКл движется из состояния покоя в однородном горизонтальном электростатическом поле так, что его траектория образует с вертикалью угол  $45^\circ$ . Чему равен модуль напряжённости электростатического поля?
32. Шарик массой  $m$  с зарядом  $+q$ , подвешенный на длинной нити, находится в вертикальном электростатическом поле, модуль напряжённости которого равен  $E$ , а вектор напряжённости направлен вниз. Нить отклоняют на  $90^\circ$  от вертикали и отпускают без толчка. Чему равен модуль силы натяжения нити, когда шарик проходит положение равновесия?

## § 39. Электроёмкость. Энергия электрического поля

### 1. Электроёмкость

Для работы многих приборов необходимы устройства, способные *накапливать электрический заряд*. Такие устройства есть в каждом радиоприёмнике, телевизоре или мобильном телефоне.

Эти устройства называют *конденсаторами*. Простейший плоский конденсатор состоит из двух параллельных металлических пластин, расположенных на небольшом расстоянии друг от друга (рис. 39.1). Их называют *обкладками* конденсатора.

Обкладкам конденсатора сообщают *равные по модулю, но противоположные по знаку* электрические заряды — в таком случае, как мы уже знаем, электрическое поле, созданное зарядами обкладок, сосредоточено в основном между обкладками.

Зарядом конденсатора называют модуль заряда *одной* из его обкладок.

В пространстве между обкладками может быть воздух, но это пространство обычно заполняют твёрдым диэлектриком по двум причинам. Во-первых, такой диэлектрик препятствует контакту между обкладками, при котором произошёл бы разряд конденсатора. Во-вторых, благодаря диэлектрику можно увеличить заряд обкладок при том же напряжении между ними.

Напряжение между обкладками конденсатора прямо пропорционально заряду конденсатора, поэтому *отношение* заряда  $q$  конденсатора к напряжению  $U$  между его обкладками *не зависит ни от заряда, ни от напряжения* и характеризует сам конденсатор.

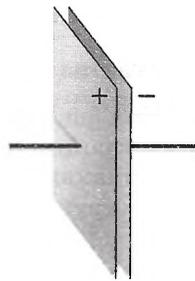


Рис. 39.1

Отношение заряда  $q$  конденсатора к напряжению  $U$  между его обкладками называют *электроёмкостью*:

$$C = \frac{q}{U}.$$

*Единицей электроёмкости является фарад (Ф)*. Эта единица названа в честь английского учёного М. Фарадея.

° 1. Докажите, что

$$1 \text{ Ф} = \frac{1 \text{ Кл}}{1 \text{ В}}.$$



Часто используют такие единицы электроёмкости, как микрофарад ( $1 \text{ мкФ} = 10^{-6} \text{ Ф}$ ) и пикофарад ( $1 \text{ пФ} = 10^{-12} \text{ Ф}$ ).

2. Чему равна электроёмкость конденсатора, если при напряжении между обкладками, равном  $200 \text{ В}$ , заряд конденсатора равен  $1 \text{ мКл}$ ?
3. Изменится ли электроёмкость конденсатора, и если да, то как, если:
- увеличить заряд конденсатора в 3 раза;
  - уменьшить напряжение между обкладками в 10 раз?
- Выясним, от чего зависит электроёмкость конденсатора.

### Поставим опыт

На рисунке 39.2 изображён демонстрационный конденсатор, состоящий из двух металлических дисков на изолирующих подставках. Одна из обкладок соединена с корпусом электрометра, а другая — с его стержнем.

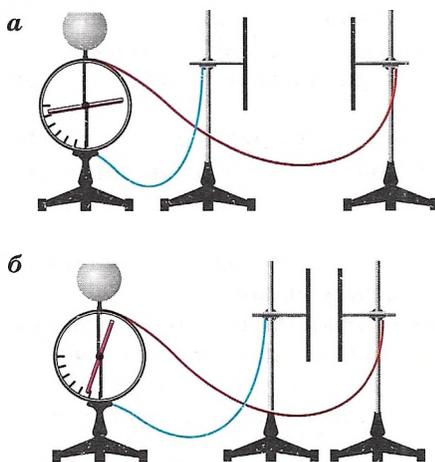


Рис. 39.2

Если зарядить конденсатор и начать затем сближать его обкладки, показания электрометра будут *уменьшаться*: сравните рисунки 39.2, а и б. Следовательно, при *уменьшении* расстояния напряжение  $U$  между обкладками тоже *уменьшается*. Обратите внимание на то, что заряд обкладок  $q$  остаётся при этом практически неизменным<sup>1)</sup>.

1) Небольшим изменением заряда, обусловленным соединением с электрометром, в данном случае можно пренебречь.

4. Докажите, что из этого опыта следует вывод: *при уменьшении расстояния между обкладками ёлектроёмкость конденсатора увеличивается.*

Помещая между обкладками диэлектрик (например, толстый лист органического стекла), мы увидим, что напряжение между обкладками тоже уменьшается. Следовательно, ёлектроёмкость конденсатора *увеличивается.*

Будем теперь одну из обкладок смещать относительно другой в направлении, параллельном обкладкам: при этом площадь их «перекрывтия» будет *уменьшаться.* Мы увидим, что напряжение между обкладками *увеличивается.*

5. Докажите, что из этого опыта следует вывод: *при уменьшении площади обкладок ёлектроёмкость конденсатора уменьшается.*

Опыты и расчёты показывают, что

ёлектроёмкость плоского конденсатора выражается формулой

$$C = \frac{\epsilon \epsilon_0 S}{d},$$

где  $S$  — площадь одной обкладки,  $d$  — расстояние между ними,  $\epsilon$  — диэлектрическая проницаемость диэлектрика, запол-

няющего всё пространство между ними,  $\epsilon_0 = 8,85 \cdot 10^{-12} \frac{\text{Кл}^2}{\text{Н} \cdot \text{м}^2}$

(электрическая постоянная).

6. Найдите, как изменится ёлектроёмкость конденсатора, если:
- площадь каждой обкладки увеличить в 4 раза;
  - расстояние между обкладками увеличить в 2 раза;
  - заполнить всё пространство между обкладками диэлектриком с диэлектрической проницаемостью  $\epsilon = 3$ .
7. Расстояние между обкладками конденсатора равно  $d$ . Докажите, что если напряжение между обкладками равно  $U$ , то напряжённость поля между обкладками конденсатора выражается формулой

$$E = \frac{U}{d}.$$

8. Расстояние между обкладками плоского конденсатора равно 5 мм. Чему равен заряд конденсатора, если его ёлектроёмкость равна 20 пФ, а напряжённость поля между обкладками равна 50 кВ/м?

9. Расстояние между двумя изолированными металлическими пластинами, заряды которых равны по модулю и имеют противоположные знаки, увеличили в 4 раза. Как изменились при этом: а) напряжённость поля между пластинами; б) напряжение между пластинами?

## 2. Энергия электрического поля

### Энергия заряженного конденсатора

#### Поставим опыт

Если замкнуть обкладки заряженного конденсатора через небольшую лампочку, она вспыхнет. Следовательно, *заряженный конденсатор обладает энергией.*

10. Изолированные обкладки заряженного конденсатора удаляют друг от друга. Как при этом изменяется энергия конденсатора — увеличивается или уменьшается?

Расчёт, выходящий за рамки нашего курса, показывает, что

энергия заряженного конденсатора выражается формулой

$$W_p = \frac{qU}{2}.$$

11. Докажите, что энергию заряженного конденсатора можно выразить также формулами:

$$W_p = \frac{q^2}{2C},$$

$$W_p = \frac{CU^2}{2}.$$

Последние две формулы кажутся *противоречащими* друг другу: согласно первой формуле энергия заряженного конденсатора *обратно* пропорциональна его ёмкости, а согласно второй энергия заряженного конденсатора *прямо* пропорциональна его ёмкости.

Чтобы убедиться в том, что противоречия здесь нет, рассмотрим несколько примеров.

12. Обкладки заряженного конденсатора, *отключённого от источника тока*, удаляют друг от друга. Как при этом изменяются:
- заряд конденсатора;
  - ёмкость конденсатора;
  - напряжение между обкладками;
  - энергия конденсатора?

Итак, если электроёмкость конденсатора *уменьшают* при *неизменном заряде* обкладок, энергия конденсатора *увеличивается* за счёт работы внешних сил, совершаемой при удалении друг от друга *притягивающихся* обкладок конденсатора. Это как раз и следует

из формулы  $W_p = \frac{q^2}{2C}$ : при *неизменном заряде* энергия конденсатора *увеличивается* при *уменьшении* его электроёмкости.

**Похожие задачи**

13. Обкладки заряженного конденсатора, отключённого от источника тока, *приближают* друг к другу. Как при этом изменяются:

- а) заряд конденсатора;
- б) электроёмкость конденсатора;
- в) напряжение между обкладками;
- г) энергия конденсатора?

14. Обкладки конденсатора, соединённые с полюсами источника *постоянного напряжения*, *приближают* друг к другу. Как при этом изменяются:

- а) напряжение между обкладками;
- б) электроёмкость конденсатора;
- в) заряд конденсатора;
- г) энергия конденсатора?

Соответствует ли полученный вывод формуле  $W_p = \frac{CU^2}{2}$ ?

15. Обкладки конденсатора, соединённые с полюсами источника *постоянного напряжения*, *удаляют* друг от друга. Как при этом изменяются:

- а) напряжение между обкладками;
- б) электроёмкость конденсатора;
- в) энергия конденсатора?

Соответствует ли полученный вывод формуле  $W_p = \frac{CU^2}{2}$ ?

Сделаем вывод: для определения характера зависимости энергии заряженного конденсатора от его электроёмкости нужно пользоваться

формулой  $W_p = \frac{q^2}{2C}$ , если *заряды обкладок не изменяются* (конденсатор отключён от источника тока), и формулой  $W_p = \frac{CU^2}{2}$ , если

*конденсатор подключён к источнику постоянного напряжения*.



### \*3. Движение заряженной частицы в конденсаторе

Движение заряженной частицы или заряженного тела в однородном электростатическом поле подобно движению тела, брошенного горизонтально или под углом к горизонту, потому что и в том, и в другом случае частица или тело движется под действием *постоянной* силы.

Если начальная скорость заряженной частицы или заряженного тела направлена под углом к линиям напряжённости поля, то траекторией движения будет *парабола*. Если же начальная скорость частицы или тела равна нулю либо направлена вдоль линий напряжённости, то траекторией движения будет *прямая*.

При рассмотрении движения заряженных *частиц* в конденсаторе обычно можно пренебречь действующей на частицу силой тяжести по сравнению с силой, действующей на частицу со стороны электрического поля. Однако *массой частицы пренебрегать нельзя*, потому что согласно второму закону Ньютона ускорение частицы зависит не только от действующей на неё силы, но и от её массы.

16. Частица с зарядом  $q$  и массой  $m$  влетает в заряженный плоский конденсатор в точке, находящейся посередине между обкладками (рис. 39.3). Начальная скорость частицы равна по модулю  $v_0$  и параллельна обкладкам. Расстояние между обкладками равно  $d$ , а напряжение между ними равно  $U$ . Длина каждой обкладки равна  $l$ .

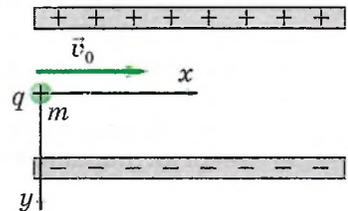


Рис. 39.3

- Запишите выражения для проекций ускорения частицы на показанные оси координат.
- Запишите выражения для проекций скорости частицы на те же оси координат.
- Запишите выражения для зависимости координат частицы от времени.
- При какой начальной скорости частица пролетит сквозь конденсатор, не попав на обкладку?

#### Похожие задачи

17. Частица с зарядом  $q$  и массой  $m$  влетает в заряженный плоский конденсатор в точке, находящейся посередине между обкладками (см. рис. 39.3). Начальная скорость частицы равна по модулю  $v_0$  и параллельна обкладкам, расстояние между которыми равно  $d$ , а напряжение равно  $U$ . Длина каждой обкладки равна  $l$ . Частица пролетает сквозь весь конденсатор и вылетает из него.

- а) Запишите выражение для тангенса угла  $\alpha$  между скоростью частицы и горизонталью в тот момент, когда частица вылетает из конденсатора.
- б) Запишите выражение для модуля скорости частицы  $v$  в момент, когда она вылетает из конденсатора.
18. Точно посередине между обкладками конденсатора в начальный момент удерживают в покое шарик с зарядом  $q$  и массой  $m$  (рис. 39.4). Напряжение между обкладками  $U$ , а расстояние между ними  $d$ . Шарик отпускают, и через некоторый промежуток времени он сталкивается с одной из обкладок.
- а) По какой траектории движется шарик между обкладками?
- б) Запишите выражение для проекции ускорения шарика на показанную на рисунке ось  $x$ .
- в) Запишите выражение для модуля ускорения шарика.
- г) Запишите выражение для времени  $t$  движения шарика до столкновения с обкладкой.

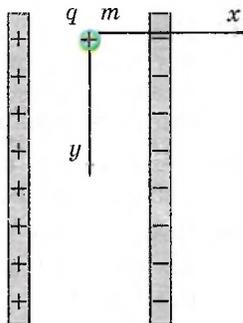


Рис. 39.4

ЧТО МЫ УЗНАЛИ

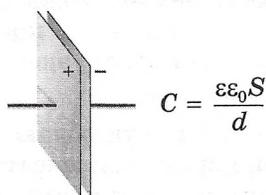
Емкостные свойства

$$C = \frac{q}{U}$$

Энергия заряженного конденсатора

$$W_p = \frac{qU}{2} \quad W_p = \frac{q^2}{2C} \quad W_p = \frac{CU^2}{2}$$

Плоский конденсатор



ДОПОЛНИТЕЛЬНЫЕ ВОПРОСЫ И ЗАДАНИЯ

Базовый уровень

19. На какой конденсатор надо подать большее напряжение: на конденсатор емкостью 200 пФ или на конденсатор емкостью 600 пФ, чтобы заряды конденсаторов стали равными? Во сколько раз большее?
20. На каком конденсаторе будет больший заряд при подключении к одному и тому же источнику напряжения: на конденсаторе

электроёмкостью 200 пФ или на конденсаторе электроёмкостью 600 пФ? Во сколько раз бóльший?

21. Конденсатор электроёмкостью 30 мкФ зарядили до напряжения 40 В. Насколько изменится заряд конденсатора, если напряжение увеличат до 50 В?
22. Конденсатор зарядили до напряжения 400 В и отключили от источника напряжения. Чему будет равно напряжение на обкладках конденсатора, если после этого расстояние между пластинами увеличить с 0,1 мм до 0,5 мм?
23. Чему равен заряд конденсатора, если напряжение на его обкладках 30 В, а энергия его электрического поля 6 мкДж?
24. Чему равна электроёмкость конденсатора, если напряжение на его обкладках 50 В, а энергия его электрического поля 0,5 мкДж?
25. Какая энергия выделится, если соединить пластины конденсатора электроёмкостью 1 мкФ, заряженного до напряжения 100 В?

### Повышенный уровень

26. Чему равна электроёмкость плоского воздушного конденсатора с квадратными пластинами со стороной 10 см, расположенными на расстоянии 1 мм друг от друга?
27. Заряд плоского воздушного конденсатора увеличили в 3 раза, а пространство между пластинами заполнили диэлектриком с диэлектрической проницаемостью, равной 6. Увеличилась или уменьшилась энергия электрического поля конденсатора? Во сколько раз?
28. Конденсатор отключают от источника тока, а затем удаляют заполнявший конденсатор диэлектрик и увеличивают расстояние между пластинами в 2 раза. При этом энергия конденсатора увеличилась в 12 раз. Чему равна диэлектрическая проницаемость диэлектрика?
29. В пространство между обкладками плоского воздушного конденсатора влетает электрон с начальной скоростью  $5 \cdot 10^7$  м/с, направленной параллельно обкладкам, на расстоянии 5 мм от каждой из них. Длина каждой обкладки 10 см.
  - а) Какой должна быть разность потенциалов между обкладками конденсатора, чтобы электрон не смог пролететь сквозь весь конденсатор?
  - б) На какую из обкладок попадёт электрон в этом случае?
  - в) На каком расстоянии от положительно заряженной обкладки будет находиться электрон при вылете из конденсатора,

если разность потенциалов между его обкладками будет равна 100 В?

- г) Чему будет равен тангенс угла между скоростью электрона и горизонталью в момент его вылета из конденсатора при разности потенциалов между его обкладками 100 В?
- д) Изменится ли потенциальная энергия электрона за время его движения в конденсаторе? Если да, то как: увеличится или уменьшится?
- е) Изменится ли кинетическая энергия электрона за время движения в конденсаторе? Если да, то как: увеличится или уменьшится?

**Высокий уровень**

30. Маленький заряженный шарик массой 0,2 г с зарядом 30 нКл подвешен на нити между вертикальными обкладками воздушного конденсатора, расстояние между которыми 5 см. Когда шарик находится в равновесии, нить отклонена на угол 30° от вертикали.

- а) Чему равна сила, действующая на шарик со стороны электрического поля?
- б) Чему равен модуль напряжённости электрического поля в конденсаторе?
- в) Чему равно напряжение на конденсаторе?

31. На точечный заряд 1 нКл, помещённый между пластинами плоского конденсатора, со стороны электрического поля действует сила 30 мкН. Чему равна энергия электрического поля конденсатора, если его электроёмкость 100 пФ, а расстояние между обкладками конденсатора 1 см?

32. Электрон влетел в вертикально направленное однородное электрическое поле перпендикулярно линиям напряжённости. Во сколько раз увеличилась кинетическая энергия электрона при движении в электрическом поле, если в момент вылета из поля направление его скорости составляет угол 60° с направлением начальной скорости?

33. Электрон влетает в плоский конденсатор с начальной скоростью  $v_0$  параллельно пластинам, расстояние между которыми равно  $d$  (рис. 39.5). Чему равно напряжение между пластинами конденсатора, если за время пролёта сквозь конденсатор вектор скорости электрона отклоняется от первоначального направления на угол  $\alpha$ ? Длина пластин конденсатора  $L$ , причём  $L \gg d$ .

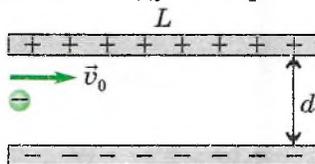


Рис. 39.5

## ГЛАВНОЕ В ГЛАВЕ VII

Одноимённо заряженные тела отталкиваются,  
а разноимённо заряженные притягиваются



Свободные носители электрического заряда —  
электроны и ионы

Закон Кулона

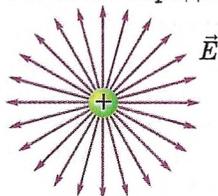
$$F = k \frac{|q_1||q_2|}{\epsilon r^2}$$

Напряжённость поля  $\vec{E} = \frac{\vec{F}}{q}$

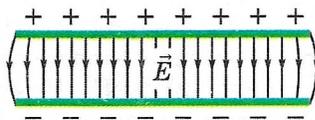
Принцип суперпозиции полей

$$\vec{E} = \vec{E}_1 + \vec{E}_2 + \dots$$

Поле  
точечного заряда



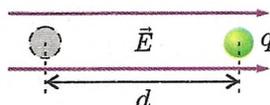
Поле двух разноимённо  
заряженных пластин



Разность потенциалов (напряжение)  $\varphi_1 - \varphi_2 = \frac{A_{12}}{q}$

В однородном поле

$$E = \frac{U}{d}$$



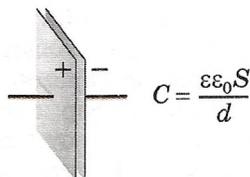
Ёмкость

$$C = \frac{q}{U}$$

Энергия заряженного  
конденсатора

$$W_p = \frac{qU}{2} \quad W_p = \frac{q^2}{2C} \quad W_p = \frac{CU^2}{2}$$

Плоский конденсатор



# Глава VIII. ПОСТОЯННЫЙ ЭЛЕКТРИЧЕСКИЙ ТОК

## § 40. Закон Ома для участка цепи

### 1. Сила тока

С определением и некоторыми свойствами электрического тока вы уже познакомились в курсе физики основной школы. Напомним, что

*электрическим током* называют направленное движение электрических зарядов.

За *направление электрического тока* условно принимают направление движения *положительно* заряженных частиц.

- ° 1. На рисунке 40.1 схематически изображено направление движения носителей заряда в металлах и направление электрического тока. Объясните, почему эти направления противоположны.

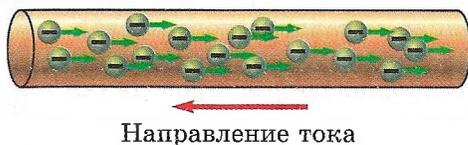


Рис. 40.1

Отношение заряда  $q$ , который переносится через поперечное сечение проводника за промежуток времени  $t$ , к этому промежутку времени называют *силой тока*:

$$I = \frac{q}{t}.$$

*Единицей силы тока* в СИ является *ампер* (А). Эта единица названа в честь французского учёного А. Ампера. Если сила тока в проводнике равна 1 А, то через поперечное сечение проводника каждую секунду проходит заряд, равный 1 Кл.

- ° 2. Докажите, что  $1 \text{ А} = \frac{1 \text{ Кл}}{1 \text{ с}}$ .

Расчёты показывают, что средняя скорость направленного движения заряженных частиц невелика: например, при силе тока 1 А в медном проводе сечением 1 мм<sup>2</sup> средняя скорость направленного движения электронов составляет около 0,1 мм/с.

### Действия электрического тока

С действиями электрического тока вы знакомы из курса физики основной школы. Вспомним их вместе.

- ° 3. В чём проявляется *тепловое* действие электрического тока?
- ° 4. В чём проявляется *химическое* действие электрического тока?
- ° 5. В чём проявляется *магнитное* действие электрического тока?

Отметим важную особенность магнитного действия электрического тока: это единственное действие, которое проявляется *всегда*. Другие же действия тока могут не проявляться. Например, тепловое действие электрического тока отсутствует при прохождении тока по сверхпроводнику<sup>1)</sup>, а химическое — при прохождении тока по металлическому проводнику. Указанной особенностью магнитного действия тока объясняется то, что в приборах для измерения силы тока используется обычно именно это действие электрического тока.

## 2. Закон Ома для участка цепи

Немецкий физик Г. Ом обнаружил на опыте, что при постоянной температуре *отношение* напряжения на концах металлического проводника к силе тока в нём *постоянно*. Это отношение называют *сопротивлением* проводника и обозначают  $R$ :

$$R = \frac{U}{I}.$$

Соотношение  $I = \frac{U}{R}$  называют *законом Ома для участка цепи*.



Г. Ом  
(1787—1854)

Опыт показывает, что закон Ома с хорошей точностью выполняется не только для металлов, но и для электролитов.

*Единицей сопротивления* в СИ является *ом* (Ом).

- ° 6. Докажите, что  $1 \text{ Ом} = \frac{1 \text{ В}}{1 \text{ А}}$ .

1) Далее мы расскажем о сверхпроводниках.

7. На рисунке 40.2 изображены графики зависимости  $I(U)$  для двух различных проводников.

- Сопротивление какого проводника больше?
- Чему равны сопротивления проводников?

Зависимость силы тока  $I$  в проводнике от напряжения  $U$  на его концах называют *вольтамперной характеристикой проводника*.

Как мы видим, графиком этой зависимости для металлического проводника при *постоянной* температуре является *прямолинейный* отрезок, один из концов которого совпадает с началом координат.

Специально изготовленные проводники с определённым значением сопротивления называют *резисторами*.

### Удельное сопротивление

Сопротивление  $R$  характеризует данный *проводник*, а точнее — *провод*, потому что в качестве проводников используют часто провода. Какая же физическая величина характеризует *вещество*, из которого изготовлен данный провод?

Измерения показывают, что сопротивление  $R$  провода прямо пропорционально его длине  $l$  и обратно пропорционально площади поперечного сечения  $S$ . Поэтому можно записать:

$$R = \rho \frac{l}{S}.$$

Величина  $\rho$  в этой формуле не зависит ни от длины проводника, ни от площади его поперечного сечения, поэтому она характеризует не проводник, а *вещество*, из которого он изготовлен. Эту величину называют *удельным сопротивлением* вещества.

В справочных данных на форзаце учебника приведены значения удельных сопротивлений некоторых металлов и сплавов.

8. У какого вещества наименьшее удельное сопротивление?

9. Почему провода обычно медные или алюминиевые?

10. Масса медного провода длиной 10 м равна 89 г. Плотность меди равна  $8,9 \cdot 10^3 \text{ кг/м}^3$ .

- Найдите площадь поперечного сечения провода.
- Найдите сопротивление провода.

Из сплавов с большим удельным сопротивлением изготавливают нагревательные элементы электрических приборов. Скоро мы поймём, почему сопротивление нагревательного прибора должно быть значительно больше, чем сопротивление подводящих проводов.

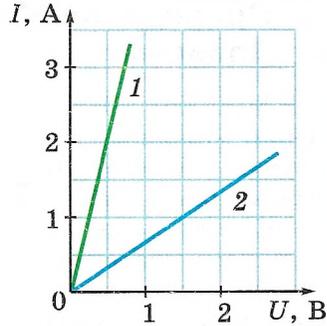


Рис. 40.2



### 3. Природа электрического сопротивления. Зависимость сопротивления от температуры

**Металлы.** Начав исследовать природу электрического сопротивления металлов, учёные предположили, что сопротивление металлов обусловлено тем, что свободные электроны сталкиваются с ионами в узлах кристаллической решётки.

Однако скоро выяснилось, что это предположение противоречит расчётам: значение сопротивления, рассчитанное в этом предположении, оказалось в тысячи раз больше измеренного на опыте! Это означало, что свободные электроны в металлах практически не сталкиваются с ионами решётки.

Объяснить малое сопротивление металлов удалось только в 20-м веке на основе квантовой теории, с основами которой вы познакомитесь в следующем учебном году. Оказалось, что движение электронов в металлах больше напоминает движение не частиц, а *волн*, которые плавно «обтекают» ионы в узлах кристаллической решётки.

Расчёты показали, что если бы эта решётка была *идеально периодической*, то электроны-волны проходили бы сквозь неё, вообще не испытывая сопротивления! Этот удивительный результат объяснил уже обнаруженное в начале 20-го века на опыте явление *сверхпроводимости*, которое состояло в том, что сопротивление некоторых металлов и сплавов при достаточно низкой температуре равно нулю.

Однако реальная кристаллическая решётка металлов не является идеально периодической, поэтому сопротивление металлов хотя и мало, но всё же отлично от нуля. Главная причина сопротивления металлов — *тепловые колебания* ионов в узлах кристаллической решётки, которые нарушают периодичность. Чем выше температура металла, тем больше амплитуда этих колебаний, поэтому

удельное сопротивление металлов при нагревании значительно *увеличивается*.

Например, сопротивление раскалённой добела нити электрической лампы накаливания примерно в 10 раз больше, чем сопротивление той же нити при комнатной температуре.

**Электролиты.** В отличие от металлов

удельное сопротивление электролитов при нагревании *уменьшается*.

Главная причина уменьшения сопротивления электролитов при нагревании состоит в том, что с повышением температуры увеличи-

вается число свободных зарядов — *ионов*, образовавшихся из нейтральных атомов и молекул.

11. На рисунке 40.3 приведены примеры графиков вольтамперной характеристики металлического провода и электролита. График какого цвета соответствует вольтамперной характеристике металлического провода?

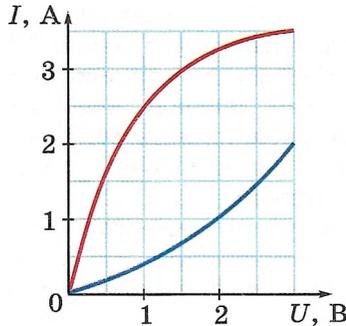


Рис. 40.3

### Сверхпроводимость

В начале 20-го века голландский физик Г. Каммерлинг-Оннес обнаружил, что при температуре ниже  $4,15\text{ К}$  сопротивление ртути уменьшается до *нуля*. Сила тока в охлаждённом до такой температуры ртутном кольце<sup>1)</sup> оставалась постоянной в течение нескольких лет. Описанное явление назвали *сверхпроводимостью*.

В дальнейшем было установлено, что в сверхпроводящее состояние при достаточно низких температурах переходят многие металлы и сплавы. Исключения, как ни странно, составляют самые лучшие проводники: серебро и медь не становятся сверхпроводниками даже при температуре, очень близкой к абсолютному нулю.

В середине 20-го века физики смогли объяснить явление сверхпроводимости<sup>2)</sup>. Выяснилось, что вследствие взаимодействия электронов с ионами кристаллической решётки между электронами проводимости возникает своеобразное *притяжение*: каждый из них немного деформирует решётку таким образом, что другие электроны втягиваются в область этой деформации. В результате электроны как бы объединяются в пары, которые проходят сквозь решётку с достаточно малыми нерегулярностями, «не замечая» их. Чтобы уменьшить нерегулярности решётки, нужно охладить металл или

1) При столь низкой температуре ртуть является твёрдым телом.

2) Большой вклад в развитие теории сверхпроводимости внесли советские физики А. А. Абрикосов, Н. Н. Боголюбов, В. Л. Гинзбург и Л. Д. Ландау, а также американские физики Дж. Бардин, Л. Купер и Дж. Шриффер.

сплав: вот почему сверхпроводимость наблюдается только при очень низких температурах.

Описанный механизм сверхпроводимости объясняет также, почему лучшие проводники не становятся сверхпроводниками: в лучших проводниках слишком слабо взаимодействие между свободными электронами и ионной решёткой. Это свойство делает их лучшими проводниками, но не позволяет стать сверхпроводниками.

В конце 20-го века учёные создали материалы, являющиеся сверхпроводниками при температуре выше 100 К. Благодаря этому стало возможным использовать для охлаждения проводников жидкий азот, который значительно дешевле используемого ранее жидкого гелия. Благодаря этому расширилась область применения сверхпроводников (например, для создания очень сильных магнитных полей и сверхмощных компьютеров).

Учёные надеются получить вещества, являющиеся сверхпроводниками при комнатной температуре. Это позволило бы во много раз уменьшить потери электроэнергии при передаче на большие расстояния.

#### 4. Последовательное и параллельное соединение проводников

##### Последовательное соединение

Рассмотрим *последовательное соединение* двух проводников (рис. 40.4).

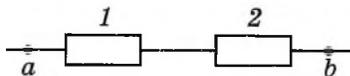


Рис. 40.4

12. Докажите, что при последовательном соединении проводников сила тока  $I$  во всём участке равна силе тока в каждом проводнике:

$$I = I_1 = I_2.$$

13. Докажите, что напряжение  $U$  на участке, состоящем из двух последовательно соединённых проводников, равно сумме напряжений на каждом из них:

$$U = U_1 + U_2.$$

14. Докажите, что *общее сопротивление  $R$  двух последовательно соединённых проводников сопротивлениями  $R_1$  и  $R_2$  выражается формулой*

$$R = R_1 + R_2.$$

Обобщим теперь этот вывод на *произвольное* число последовательно соединённых проводников.

15. Докажите, что *общее сопротивление  $n$  последовательно соединённых проводников (рис. 40.5) выражается формулой*

$$R = R_1 + R_2 + \dots + R_n.$$

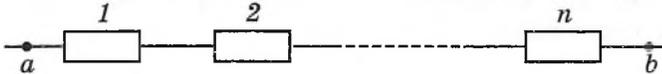


Рис. 40.5

16. Может ли сопротивление нескольких последовательно соединённых проводников быть равным 10 Ом, если сопротивление одного из них равно 12 Ом?
17. Найдите выражение для общего сопротивления  $n$  одинаковых последовательно соединённых проводников сопротивлением  $r$  каждый.

Рассмотрим теперь, как распределяется *напряжение* между проводниками при их последовательном соединении. Для этого мы воспользуемся законом Ома для участка цепи.

18. Проводники сопротивлениями  $R_1 = 1$  Ом и  $R_2 = 3$  Ом соединены последовательно. На участке цепи, состоящем из этих проводников, напряжение  $U = 40$  В.

- а) Чему равно отношение напряжений на проводниках  $\frac{U_1}{U_2}$ ?
- б) Чему равны напряжения на проводниках?

Обратите внимание: *при последовательном соединении проводников большее напряжение будет на проводнике с большим сопротивлением.*

19. Участок цепи состоит из двух последовательно соединённых проводников. Напряжение на всём участке 12 В, напряжение на первом проводнике 4 В, а сила тока во втором проводнике 2 А.

- а) Каково напряжение на втором проводнике?
- б) Чему равна сила тока в каждом проводнике?
- в) Чему равно сопротивление каждого проводника?

### Параллельное соединение

На схеме (рис. 40.6) показано параллельное соединение двух проводников.

Изучим свойства параллельного соединения проводников сначала на примере двух проводников.

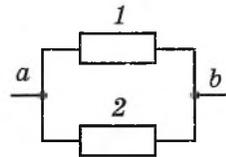


Рис. 40.6

20. Докажите, что сила тока на участке цепи, состоящем из двух параллельно соединённых проводников, равна сумме сил токов в проводниках:

$$I = I_1 + I_2.$$

21. Докажите, что напряжения на каждом из параллельно соединённых проводников одинаковы:

$$U = U_1 = U_2.$$

22. Докажите, что общее сопротивление  $R$  двух параллельно соединённых проводников связано с их сопротивлениями  $R_1$  и  $R_2$  соотношением

$$\frac{1}{R} = \frac{1}{R_1} + \frac{1}{R_2}.$$

23. Выразите сопротивление  $R$  через  $R_1$  и  $R_2$ .

Заметим, что полученной при выполнении последнего задания формулой не всегда удобно пользоваться, и к тому же аналогичная формула для сопротивления нескольких параллельно соединённых проводников довольно громоздка.

24. Докажите, что общее сопротивление  $n$  параллельно соединённых проводников (рис. 40.7) связано с их сопротивлениями соотношением

$$\frac{1}{R} = \frac{1}{R_1} + \frac{1}{R_2} + \dots + \frac{1}{R_n}.$$

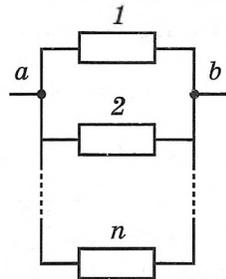


Рис. 40.7

25. Может ли сопротивление нескольких параллельно соединённых проводников быть равным 12 Ом, если сопротивление одного из них равно 10 Ом?

26. Найдите выражение для общего сопротивления  $n$  одинаковых параллельно соединённых проводников сопротивлением  $r$  каждый.

Рассмотрим теперь, чему равно отношение сил токов в параллельно соединённых проводниках. Для этого мы снова воспользуемся законом Ома для участка цепи.

27. Проводники сопротивлением  $R_1 = 1$  Ом и  $R_2 = 3$  Ом соединены параллельно. Во всём участке цепи, состоящем из этих проводников, сила тока  $I = 4$  А.

- а) Чему равно отношение сил токов в проводниках  $\frac{I_1}{I_2}$  ?  
 б) Чему равна сила тока в каждом проводнике?

Обратите внимание: *при параллельном соединении проводников сила тока больше в проводнике с меньшим сопротивлением.*

28. Сила тока в участке цепи, состоящем из двух проводников, равна 3 А. При этом сила тока в первом проводнике равна 1 А, а напряжение на втором проводнике равно 6 В.

- а) Как соединены эти проводники — последовательно или параллельно?  
 б) Чему равна сила тока во втором проводнике?  
 в) Чему равно сопротивление каждого проводника?

29. Когда два проводника соединили *параллельно* и включили ток, оказалось, что сила тока в проводниках одинакова. Затем эти же проводники соединили *последовательно* и измерили напряжение на каждом из них. Оказалось ли оно одинаковым для обоих проводников?

30. Когда два проводника соединили *параллельно*, сила тока в первом проводнике оказалась равной 2 А, а во втором — 6 А. Затем эти же проводники соединили *последовательно* и подключили к источнику напряжения 20 В. Чему равно напряжение на каждом проводнике?

## 5. Измерение силы тока и напряжения

Напомним, что *силу тока измеряют амперметром, а напряжение — вольтметром.*

31. Почему для измерения силы тока в проводнике *амперметр* надо подключать к этому проводнику *последовательно* (рис. 40.8)?

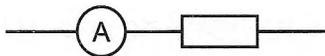


Рис. 40.8

Чтобы включение амперметра в цепь для измерения силы тока в проводнике не изменило заметно значение силы тока, сопротивление амперметра должно быть *малым* по сравнению с сопротивлением проводника, в котором измеряют силу тока. При решении задач, если особо не оговорено, сопротивлением амперметра пренебрегают,

то есть полагают его равным нулю. Такую модель амперметра называют *идеальным амперметром*.



32. Почему для измерения напряжения на концах проводника *вольтметр* надо подключать к этому проводнику *параллельно* (рис. 40.9)?

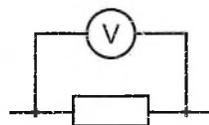


Рис. 40.9

Чтобы включение вольтметра в цепь для измерения напряжения на проводнике не изменило заметно значение напряжения, сопротивление вольтметра должно быть *большим* по сравнению с сопротивлением проводника, на котором измеряют напряжение. При решении задач, если особо не оговорено, сопротивление вольтметра считают *бесконечно большим*. Такую модель вольтметра называют *идеальным вольтметром*.



## ЧТО МЫ УЗНАЛИ

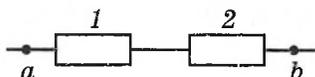
Закон Ома для участка цепи

$$I = \frac{U}{R}$$

Сопротивление провода

$$R = \rho \frac{l}{S}$$

Последовательное соединение

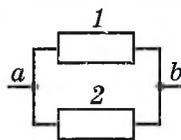


$$I = I_1 = I_2$$

$$U = U_1 + U_2$$

$$R = R_1 + R_2$$

Параллельное соединение



$$I = I_1 + I_2$$

$$U = U_1 = U_2$$

$$\frac{1}{R} = \frac{1}{R_1} + \frac{1}{R_2}$$

## ? ДОПОЛНИТЕЛЬНЫЕ ВОПРОСЫ И ЗАДАНИЯ

**Базовый уровень**

33. Чему равна сила тока в проводнике, если через его поперечное сечение за 7 мин проходит  $4 \cdot 10^{20}$  электронов?
34. Чему равна длина никелиновой проволоки сопротивлением 11 Ом, если площадь поперечного сечения проволоки равна  $0,5 \text{ мм}^2$ ?

35. Изменится ли, и если изменится, то как, сила тока, протекающего через алюминиевый провод при постоянной температуре, если:
- длину провода уменьшить в 2 раза, а напряжение на его концах увеличить в 2 раза;
  - длину провода уменьшить в 1,5 раза, а напряжение на его концах уменьшить в 3 раза;
  - длину провода уменьшить в 2 раза, а напряжение на его концах уменьшить в 2 раза?
36. Обмотка реостата изготовлена из никелиновой проволоки длиной 25 м и площадью поперечного сечения  $1 \text{ мм}^2$ . Чему равна сила тока в реостате, если напряжение на его зажимах равно 42 В?
37. Сила тока в стальном проводнике длиной 3 м и площадью поперечного сечения  $0,2 \text{ мм}^2$  равна 0,5 А. Чему равно напряжение на его концах?
38. Чему равна сила тока в каждой из 44 одинаковых ламп, соединённых последовательно и включённых в сеть напряжением 220 В, если сопротивление одной лампы равно 50 Ом?
39. Общее сопротивление какого числа параллельно соединённых одинаковых резисторов, сопротивлением 80 Ом каждый, равно 4 Ом?
40. Чему равна сила тока в гирлянде, состоящей из 20 одинаковых соединённых параллельно лампочек сопротивлением 1,1 кОм каждая, если гирлянда подключена к источнику напряжения 220 В?

### Повышенный уровень

41. Начертите схемы всех возможных соединений трёх резисторов сопротивлением 30 Ом каждый и найдите сопротивление для каждой схемы.
42. Сопротивления резисторов, изображённых на рисунке 40.10, равны  $R_1 = 8 \text{ Ом}$ ,  $R_2 = 20 \text{ Ом}$ ,  $R_3 = 30 \text{ Ом}$ . Напряжение между точками  $a$  и  $b$  равно 4 В. Чему равно напряжение на втором и третьем резисторах?

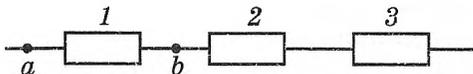


Рис. 40.10

43. Сопротивления резисторов, изображённых на рисунке 40.11, равны  $R_1 = 12$  Ом,  $R_2 = 20$  Ом,  $R_3 = 30$  Ом. Сила тока в первом резисторе равна 5 А. Чему равно напряжение на каждом из резисторов и напряжение на концах участка цепи?

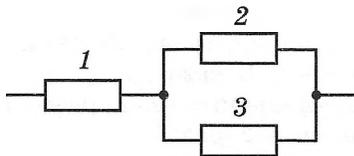


Рис. 40.11

44. Сила тока в каждом из двух резисторов равна 2 А. Можно ли утверждать, что они соединены последовательно? Если нет, то что можно сказать об этих резисторах? Поясните свой ответ рисунком.
45. На рисунке 40.12 изображены графики зависимости сопротивления от длины для двух проводов, изготовленных из одинакового материала. Диаметр какого провода больше? Во сколько раз?

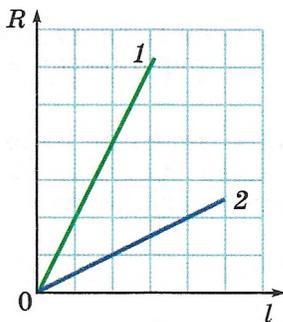


Рис. 40.12

46. Чему равна длина медной проволоки массой 300 г, если сопротивление проволоки равно 57 Ом?
47. Напряжение на концах стальной спирали увеличили в 2 раза. Можно ли утверждать, что сила тока в спирали увеличилась при этом тоже в 2 раза? Обоснуйте свой ответ.
48. Стальную проволоку длиной 3 м и площадью поперечного сечения  $0,5$  мм<sup>2</sup> соединили последовательно с никелиновой проволокой длиной 5 м и площадью поперечного сечения  $0,25$  мм<sup>2</sup>. Поставьте по этой ситуации три вопроса и найдите ответы на них.

49. Три последовательно соединённых резистора подключили к источнику напряжения 30 В. Сопротивления резисторов  $R_1 = 6$  Ом,  $R_2 = 14$  Ом, напряжение на концах третьего резистора  $U_3 = 20$  В.
- Чему равна сила тока в цепи?
  - Чему равны напряжения на первом и втором резисторах?
  - Чему равно сопротивление третьего резистора?

### Высокий уровень

50. Электрическая лампа сопротивлением 240 Ом рассчитана на напряжение 120 В. Какой длины нихромовый провод надо подключить последовательно с лампой к источнику напряжения 220 В, чтобы лампа горела нормальным накалом? Площадь поперечного сечения нихромового провода равна  $0,55$  мм<sup>2</sup>.
51. К кольцу сопротивлением  $R$  подключают провода, как показано на рисунке 40.13. Поставьте три вопроса по этой ситуации и найдите ответы на них.

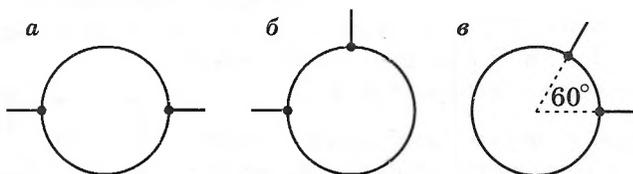


Рис. 40.13

52. Перенесите рисунки 40.14,  $a-g$  в тетрадь. Сопротивление каждого резистора 1 Ом, а напряжение на всей цепи 4 В. Возле каждой схемы напишите, чему равно соответствующее ей общее сопротивление. Напишите рядом с обозначением каждого резистора силу тока в нём и напряжение на нём.

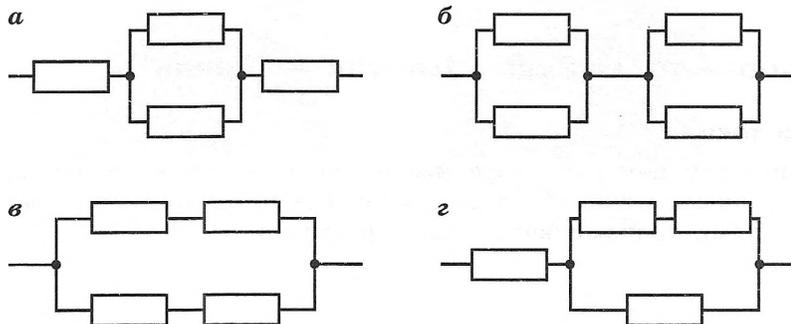


Рис. 40.14

53. Чему равны сопротивления двух резисторов, если при их последовательном соединении общее сопротивление равно 10 Ом, а при параллельном соединении — 1,6 Ом?
54. Резистор сопротивлением 4 Ом подключают к источнику постоянного напряжения один раз последовательно с резистором неизвестного сопротивления, а другой раз — параллельно с ним. Сила тока в одном из опытов в 6,25 раза больше, чем в другом. При каком соединении резисторов сила тока в цепи больше? Чему равно сопротивление второго резистора?
55. Чему равна напряжённость электрического поля в прямолинейном алюминиевом проводе площадью поперечного сечения  $1,4 \text{ мм}^2$ , если сила тока в нём равна 2 А? Электрическое поле внутри проводника считайте однородным.
56. Последовательно соединённые резисторы 1 и 2 подключены к источнику постоянного напряжения. После того, как параллельно резистору 1 подключили резистор 3, напряжение на резисторе 1 уменьшилось в 3 раза, а сила тока в резисторе 2 увеличилась в 3 раза. Чему равно отношение сопротивлений резисторов 1 и 2?
57. На рисунке 40.15 изображена схема цепи для измерения сопротивления резистора  $R$ . Чему равно сопротивление резистора, если показания амперметра 0,5 А, показания вольтметра 120 В, а сопротивление вольтметра 3 кОм?

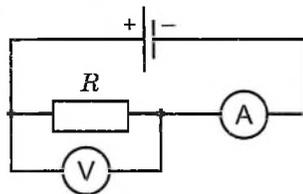


Рис. 40.15

## § 41. Работа и мощность тока

### 1. Работа тока. Закон Джоуля — Ленца

#### Работа тока

В предыдущем параграфе мы установили, что если напряжение между точками равно  $U$ , то работа поля  $A$  по перемещению заряда  $q$  между этими точками выражается формулой

$$A = qU.$$

Работу электрического поля по перемещению заряда в проводнике, по которому течёт ток, называют *работой тока*.

° 1. Докажите, что работу тока можно выразить формулой

$$A = UIt.$$

### Закон Джоуля — Ленца

Рассмотрим случай, когда основным действием тока является тепловое действие. В таком случае *количество теплоты*, выделившееся в проводнике, равно работе тока:

$$Q = A.$$

Следовательно,

$$Q = IUt.$$

° 2. Докажите, что справедлива формула

$$Q = I^2Rt.$$

Последнее соотношение установили на опыте независимо друг от друга российский учёный Э. Х. Ленц и английский учёный Дж. Джоуль. Поэтому оно получило название *закона Джоуля — Ленца*:

за время  $t$  в проводнике сопротивлением  $R$  выделяется количество теплоты

$$Q = I^2Rt,$$

где  $I$  — сила тока в проводнике.



Дж. Джоуль  
(1818—1889)



Э. Х. Ленц  
(1804—1865)

° 3. Докажите, что  $Q$  можно выразить также формулой

$$Q = \frac{U^2}{R}t.$$

- ° 4. Составьте по одной задаче на применение каждой из трёх написанных выше формул для количества теплоты, выделившегося в проводнике с током.

## 2. Применение закона Джоуля — Ленца к последовательно и параллельно соединённым проводникам

### Последовательное соединение проводников

- ° 5. Два проводника сопротивлениями  $R_1 = 1$  Ом и  $R_2 = 4$  Ом соединены *последовательно* и включены в электрическую цепь. В первом проводнике за 10 мин выделилось количество теплоты  $Q_1 = 600$  Дж.
- Какой из трёх формул для количества теплоты удобнее пользоваться для сравнения количества теплоты, выделившегося в последовательно соединённых проводниках? Обоснуйте свой ответ.
  - Какое количество теплоты выделилось за то же время во втором проводнике?
  - Чему равна сила тока в каждом проводнике?

Обратите внимание: при *последовательном* соединении проводников большее количество теплоты выделяется в проводнике, сопротивление которого *больше*.

- ° 6. Два проводника соединены последовательно. Напряжение на первом проводнике равно 10 В, а на втором — 20 В. В каком проводнике выделится большее количество теплоты за одно и то же время? Во сколько раз?

### Параллельное соединение проводников

- ° 7. Два проводника сопротивлениями  $R_1 = 1$  Ом и  $R_2 = 4$  Ом соединены *параллельно* и включены в электрическую цепь. В первом проводнике за 10 мин выделилось количество теплоты  $Q_1 = 600$  Дж.
- Какой из трёх формул для количества теплоты удобнее пользоваться для сравнения количества теплоты, выделившегося в параллельно соединённых проводниках? Обоснуйте свой ответ.
  - Какое количество теплоты выделилось за то же время во втором проводнике?
  - Чему равно напряжение на каждом проводнике?

Обратите внимание: при *параллельном* соединении проводников большее количество теплоты выделяется в проводнике, сопротивление которого *меньше*.

8. Два проводника соединены параллельно. Сила тока в первом проводнике равна 1 А, а во втором — 0,5 А. В каком проводнике выделится большее количество теплоты за одно и то же время? Во сколько раз?
9. Участок цепи состоит из двух проводников и подключён к источнику тока. За некоторое время в проводниках выделилось количество теплоты  $Q_1 = 300$  Дж,  $Q_2 = 1,2$  кДж. Чему равно отношение сопротивлений проводников, если они соединены: а) параллельно; б) последовательно?
10. Имеются два проводника сопротивлением  $R_1 = 1$  Ом и  $R_2 = 2$  Ом, источник напряжения на 6 В и таймер на 10 с. Поставьте по этим данным вопросы, ответами на которые являются: а) 360 Дж; б) 180 Дж; в) 120 Дж; г) 540 Дж.

### Поставим опыт

Когда лампы накаливания 1 и 2 подключают к источнику напряжения *параллельно*, лампа 1 горит ярче, чем лампа 2 (рис. 41.1).

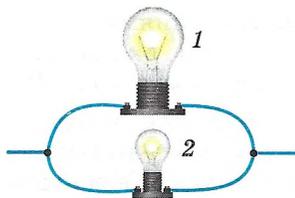


Рис. 41.1

11. Объясните, почему, когда эти же самые лампы соединяют *последовательно* (рис. 41.2), лампа 1 горит менее ярко, чем лампа 2.



Рис. 41.2

12. Нагревательный элемент электрочайника сильно нагревается, а последовательно соединённые с ним провода остаются при комнатной температуре. Какой вывод отсюда можно сделать о соотношении сопротивлений нагревательного элемента и проводов?

### 3. Мощность тока

*Мощностью тока*  $P$  называют отношение работы тока  $A$  к промежутку времени  $t$ , в течение которого эта работа совершена:

$$P = \frac{A}{t}.$$

Напомним, что *единица мощности* в СИ — *ватт* (Вт). Часто используют кратные единицы, например киловатт (кВт).

13. Выведите следующие формулы для мощности тока:

$$P = IU,$$

$$P = I^2R,$$

$$P = \frac{U^2}{R}.$$

#### Последовательное соединение проводников

14. Два проводника сопротивлениями  $R_1 = 1$  Ом и  $R_2 = 4$  Ом соединены *последовательно* и включены в электрическую цепь. В первом проводнике мощность тока  $P_1 = 9$  Вт.

- Какой из трёх формул для мощности тока удобнее пользоваться для сравнения значений мощности в последовательно соединённых проводниках? Обоснуйте свой ответ.
- Чему равна мощность тока во втором проводнике?
- Чему равна сила тока в каждом проводнике?

Обратите внимание: при *последовательном* соединении проводников мощность тока больше в проводнике, сопротивление которого больше.

15. Два проводника соединены последовательно. Напряжение на первом проводнике равно 12 В, а на втором — 6 В. В каком проводнике мощность тока больше? Во сколько раз?

#### Параллельное соединение проводников

16. Два проводника сопротивлениями  $R_1 = 1$  Ом и  $R_2 = 4$  Ом соединены *параллельно* и включены в электрическую цепь. В первом проводнике мощность тока  $P_1 = 64$  Вт.

- Какой из трёх формул для мощности тока удобнее пользоваться для сравнения значений мощности в параллельно соединённых проводниках? Обоснуйте свой ответ.
- Чему равна мощность тока во втором проводнике?

в) Чему равно напряжение на каждом проводнике?

Обратите внимание: при *параллельном* соединении мощность тока больше в проводнике, сопротивление которого *меньше*.

°17. Два проводника соединены параллельно. Сила тока в первом проводнике равна 6 А, а во втором — 2 А. В каком проводнике мощность тока больше? Во сколько раз?

18. Имеются два проводника сопротивлением  $R_1 = 1$  Ом и  $R_2 = 2$  Ом, а также источник напряжения на 6 В. Поставьте по этим данным вопросы, ответами на которые являются: а) 36 Вт; б) 18 Вт; в) 12 Вт; г) 54 Вт.

*Мощностью электроприбора* называют мощность тока в нём при включении в сеть с напряжением, на которое он рассчитан. Как правило, эта мощность указана на приборе.

Ниже приведены примерные значения мощности некоторых приборов.

|                                                        |             |
|--------------------------------------------------------|-------------|
| Лампа карманного фонарика                              | около 1 Вт  |
| Лампы осветительные энергосберегающие или светодиодные | 2—20 Вт     |
| Лампы накаливания                                      | 25—95 Вт    |
| Электронагреватель                                     | 200—2000 Вт |
| Электрочайник                                          | до 2000 Вт  |

Все электроприборы в квартире включены в сеть *параллельно*, поэтому *напряжение на них одинаково*.

19. На электрочайнике указано, что он рассчитан на напряжение 220 В и его мощность равна 2 кВт.

а) Чему равно сопротивление нагревательного элемента в рабочем режиме?

б) Чему равна сила тока в чайнике в рабочем режиме?

в) За какое время нагрелся бы в чайнике 1 л воды от 20 °С до кипения, если бы теплообменом с окружающим воздухом и другими предметами можно было пренебречь?

20. Два нагревательных элемента имеют сопротивления  $R_1$  и  $R_2$ . Напряжение в сети равно  $U$ . Как надо их соединить, чтобы общая мощность тока была максимальной? минимальной (но не равной нулю)? Запишите выражения для этих значений мощности.



## ЧТО МЫ УЗНАЛИ

Работа тока  $A = IUt$

Закон Джоуля — Ленца  $Q = I^2Rt$

Мощность тока  $P = IU$

## ? ДОПОЛНИТЕЛЬНЫЕ ВОПРОСЫ И ЗАДАНИЯ

### Базовый уровень

21. Какую работу совершает ток при прохождении через резистор в течение 10 мин, если напряжение на резисторе 20 В, а сила тока в нём 5 А?
22. В резисторе сопротивлением 5 Ом за 2 мин выделилось количество теплоты, равное 5,4 кДж. Чему была равна сила тока в резисторе?
23. Чему равен заряд, который проходит через резистор сопротивлением 20 Ом за 10 мин, если за это время в нём выделяется количество теплоты, равное 120 Дж?
24. Проводники сопротивлениями 300 Ом и 100 Ом соединены последовательно и подключены к источнику постоянного напряжения. В первом проводнике за некоторое время выделилось количество теплоты, равное 21 кДж. Какое количество теплоты выделится во втором проводнике за это же время?
25. Проводники сопротивлениями 300 Ом и 100 Ом соединены параллельно и подключены к источнику постоянного напряжения. В первом проводнике за некоторое время выделилось количество теплоты, равное 21 кДж. Какое количество теплоты выделится во втором проводнике за это же время?
26. Какую мощность потребляет лампочка карманного фонаря, если напряжение на лампочке равно 3,5 В, а сила тока в ней равна 0,2 А?
27. Какое количество теплоты выделяется в лампочке мощностью 100 Вт за 10 мин, если её рабочее сопротивление равно 484 Ом?

28. По графику зависимости силы тока в резисторе от напряжения на нём (рис. 41.3) определите:

- чему равно сопротивление резистора;
- чему равна мощность тока в резисторе, если сила тока в нём равна 6 А.

Постройте в тетради график зависимости мощности тока в резисторе от напряжения на нём.

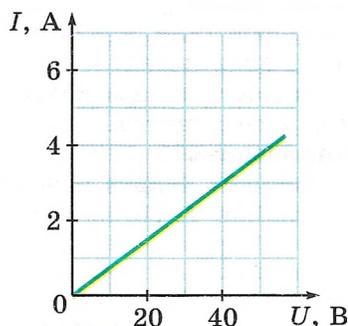


Рис. 41.3

### Повышенный уровень

- Два соединённых последовательно резистора сопротивлениями 20 Ом и 40 Ом подключены к источнику постоянного напряжения 120 В. Чему равна мощность тока в каждом резисторе?
- Электроплита, рассчитанная на напряжение 220 В, содержит два нагревательных элемента сопротивлением 100 Ом каждый. С помощью переключателя можно включать как один, так и оба нагревательных элемента. Чему равна мощность электроплитки в случае, если:
  - включён один нагревательный элемент;
  - последовательно включены два нагревательных элемента;
  - параллельно включены два нагревательных элемента?
- Электронагревателем, включённым в сеть с напряжением 220 В, можно нагреть 4 л воды на 40 °С за 10 мин. Нагревательный элемент изготовлен из никелиновой проволоки длиной 36 м и площадью поперечного сечения 0,5 мм<sup>2</sup>. Чему равен КПД нагревателя?
- Сколько электронов прошло через поперечное сечение проводника за время, в течение которого количество теплоты, выделившееся в проводнике, составило 4 кДж? Напряжение на проводнике равно 50 В.

33. Четыре одинаковых резистора соединены так, как показано на рисунке 41.4, и подключены к источнику постоянного напряжения. Зависимостью сопротивления резистора от температуры можно пренебречь.

- На каком из резисторов (или на каких резисторах) напряжение наибольшее? наименьшее?
- В каком из резисторов (или в каких резисторах) сила тока наибольшая? наименьшая?
- В каком из резисторов (или в каких резисторах) мощность тока наибольшая? наименьшая?
- Как изменится мощность тока в каждом из резисторов, если заменить резистор 1 соединительным проводом с пренебрежимо малым сопротивлением?
- Как изменится мощность тока в каждом из резисторов, если убрать из цепи резистор 1, оставив на его месте разрыв?

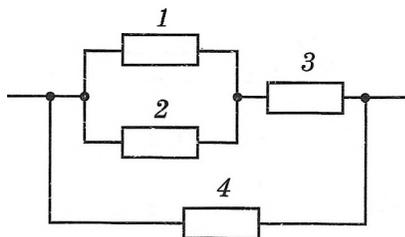


Рис. 41.4

### Высокий уровень

34. Чему равно отношение количеств теплоты  $\frac{Q_2}{Q_3}$ , выделившихся за одинаковое время на резисторах 2 и 3, если сопротивления  $R_1 = 2 \text{ Ом}$ ,  $R_2 = 4 \text{ Ом}$ ,  $R_3 = 3 \text{ Ом}$ ,  $R_4 = 5 \text{ Ом}$  (рис. 41.5)?

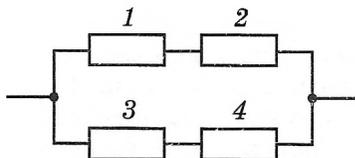


Рис. 41.5

35. На сколько процентов увеличится мощность тока в проводе, если уменьшить длину провода на 25 % при том же напряжении на концах провода?

36. Суммарная мощность тока в двух последовательно соединённых резисторах, подключённых к источнику тока с напряжением 100 В, равна 40 Вт. Если эти же два резистора соединить параллельно и подключить к тому же источнику, суммарная мощность тока в них будет равна 250 Вт. Чему равны сопротивления резисторов?
37. К источнику постоянного тока с напряжением 2 В подключают концы медного теплоизолированного провода длиной 10 м. За какой промежуток времени температура провода увеличится на 10 °С, если изменением сопротивления проводника при нагревании можно пренебречь?
38. В приборе для нагревания воды есть два нагревательных элемента. Если включить только первый элемент, вода закипит через 20 мин, а если только второй — через 30 мин. Сколько времени понадобится, чтобы закипятить воду, если подключить оба элемента последовательно? параллельно? Считайте, что тепловыми потерями можно пренебречь. Масса и начальная температура воды во всех случаях одинаковы.
39. Имеются три электрические лампы номинальной мощностью по 4 Вт и две лампы номинальной мощностью по 6 Вт. Каждая из ламп рассчитана на напряжение 9 В. Ученик соединил эти лампы так, что при подключении к источнику тока напряжением 18 В все лампы горели нормальным накалом. Начертите схему такого соединения.

## § 42. Закон Ома для полной цепи

### 1. Источник тока

Когда по проводнику течёт ток, в нём выделяется некоторое количество теплоты. Как вы уже знаете из курса физики основной школы, ток может совершать *работу* в электродвигателях (мы рассмотрим это в следующем учебном году).

На то и другое *расходуется* энергия. А откуда она *поступает* в электрическую цепь? Заметим, что работа *электростатического* поля по перемещению заряда по замкнутой траектории равна нулю — следовательно, *электростатическое* поле не может быть источником энергии в замкнутой электрической цепи.

Источником энергии в электрической цепи является *источник тока*. Особенность этого элемента цепи заключается в том, что в источнике тока носители заряда перемещаются *против сил электростатического поля* (рис. 42.1).

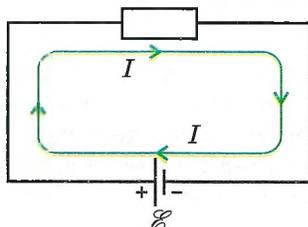


Рис. 42.1

Для этого на заряженные частицы должны действовать силы, которые имеют *неэлектростатическую природу*. Их называют *сторонними силами*.

Результатом действия сторонних сил является *разделение зарядов*: на одном *полюсе* источника тока возникает положительный заряд, а на другом — отрицательный. Полюсы источника поэтому называют *положительным* и *отрицательным*.

Часть электрической цепи, находящуюся «вне» источника тока, называют *внешней цепью*. Разделение зарядов в источнике тока приводит к тому, что возникает электростатическое поле, которое «подгоняет» носители заряда во внешней цепи.

Природа сторонних сил может быть различной. В химических источниках тока эти силы имеют химическую природу. Например, погрузим цинковую и медную пластины в серную кислоту. Цинк будет растворяться в ней, при этом положительные ионы цинка будут переходить в раствор, в результате чего на цинковом электроде будут скапливаться свободные электроны, и он приобретёт отрицательный заряд. Медь же не вступает в реакцию с кислотой. Таким образом, различие во взаимодействии цинка и меди с кислотой приведёт к тому, что медный электрод станет *положительным полюсом источника тока*, а цинковый — *отрицательным*.

Основными источниками тока в современном мире являются *генераторы тока* на электростанциях. Сторонние силы в генераторах — это силы, действующие на свободные электроны со стороны *электрического поля*, однако это поле является не *электростатическим*, а *вихревым*. Линии напряжённости вихревого электрического поля *замкнуты*, поэтому работа этих сил при перемещении заряда по замкнутому контуру *не равна нулю*. Принципы работы генераторов тока мы рассмотрим в следующем учебном году.

### Электродвижущая сила источника тока

Работа сторонних сил  $A_{\text{стор}}$  по перемещению заряда  $q$  в источнике тока пропорциональна величине заряда, поэтому характеристикой *источника тока* является *отношение* работы сторонних сил к величине заряда.

*Электродвижущей силой источника*<sup>1)</sup> (ЭДС) называют отношение работы сторонних сил по перемещению заряда к величине заряда:

$$\mathcal{E} = \frac{A_{\text{стор}}}{q}.$$

ЭДС, как и напряжение, измеряют в *вольтах*. Например, ЭДС пальчиковой батарейки составляет около полутора вольт.

## 2. Закон Ома для полной цепи

*Полной цепью* называют замкнутую электрическую цепь, включающую источник тока. Докажем, что справедлив

*закон Ома для полной цепи:*

$$I = \frac{\mathcal{E}}{R + r},$$

где  $I$  — сила тока в цепи,  $\mathcal{E}$  — ЭДС источника тока,  $R$  — сопротивление внешней цепи, а  $r$  — сопротивление источника тока, которое называют *внутренним сопротивлением*.

Величину  $R + r$  называют *полным сопротивлением цепи*.

1. Обозначим  $Q_{\text{внеш}}$  и  $Q_{\text{внутр}}$  — количества теплоты, выделившиеся соответственно за время  $t$  во внешней цепи и в источнике тока,  $A_{\text{стор}}$  — работу сторонних сил за то же время. Докажите, что

$$Q_{\text{внеш}} + Q_{\text{внутр}} = A_{\text{стор}}.$$

2. Докажите, что написанное выше соотношение можно переписать в виде

$$I^2 R t + I^2 r t = \mathcal{E} I t.$$

3. Докажите, что из последнего соотношения следует закон Ома для полной цепи.

<sup>1)</sup> Это название не совсем удачно, потому что данная величина — не «сила» в механическом смысле, а энергетическая характеристика источника.



- ° 4. ЭДС источника тока 24 В, а его внутреннее сопротивление равно 4 Ом.
- Выберите сами два различных значения сопротивления внешней цепи  $R$  и найдите силу тока в цепи при этих значениях.
  - При каком сопротивлении внешней цепи сила тока в цепи максимальна? Чему она при этом равна?
5. Ученик решил измерить ЭДС источника тока  $\mathcal{E}$  и его внутреннее сопротивление  $r$ . Для этого он измерил значения силы тока  $I_1$  и  $I_2$  при двух известных значениях сопротивления внешней цепи  $R_1$  и  $R_2$ . В результате он получил систему двух уравнений с двумя неизвестными:  $\mathcal{E}$  и  $r$ .
- Запишите эту систему уравнений.
  - Выразите внутреннее сопротивление  $r$  через  $R_1$ ,  $R_2$ ,  $I_1$ ,  $I_2$ .
  - Выразите ЭДС источника  $\mathcal{E}$  через  $R_1$ ,  $R_2$ ,  $I_1$ ,  $I_2$ .

### Похожая задача

6. Если к источнику тока подключить резистор сопротивлением 2 Ом, то сила тока в цепи будет равна 1,5 А, а если последовательно соединить с этим резистором второй такой же, то сила тока в цепи станет равной 1 А.
- Чему равно внутреннее сопротивление источника?
  - Чему равна ЭДС источника?

### Напряжение на полюсах источника

Напряжение на внешней цепи сопротивлением  $R$  выражается согласно закону Ома формулой

$$U = IR.$$

Это же напряжение является одновременно и *напряжением на полюсах источника тока*, потому что полюса источника тока и концы внешней цепи — это *одни и те же точки*.

- ° 7. Докажите, что напряжение  $U$  на полюсах источника тока выражается формулой

$$U = \mathcal{E} - Ir.$$

8. Докажите, что напряжение  $U$  на *разомкнутых* полюсах источника тока равно ЭДС этого источника.

Используя формулу  $U = \mathcal{E} - Ir$ , можно определить на опыте значение ЭДС источника  $\mathcal{E}$  и его внутреннее сопротивление  $r$  *графически*, не решая систему уравнений.

## Поставим опыт

Соберём цепь по схеме, изображённой на рисунке 42.2.

Сопротивление внешней цепи можно изменять с помощью реостата. При этом будут изменяться сила тока  $I$  в цепи и напряжение  $U$ , которое является одновременно напряжением на внешней цепи и напряжением на полюсах источника, поэтому можно построить график зависимости  $U(I)$ .

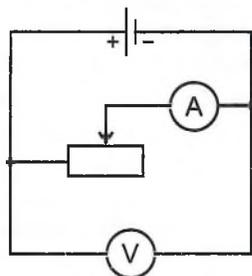


Рис. 42.2

°9. На рисунке 42.3 изображён полученный из опыта график зависимости напряжения  $U$  на полюсах источника от силы тока  $I$  в цепи.

- Чему равна ЭДС данного источника тока?
- Чему равно внутреннее сопротивление источника тока?

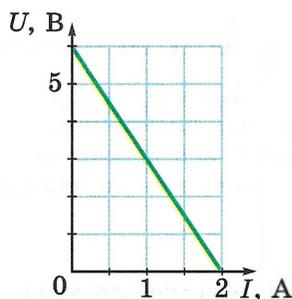


Рис. 42.3

## Похожая задача

10. Собрав цепь по схеме, изображённой на рисунке 42.2, и измеряя силу тока при разных положениях движка реостата, ученик обнаружил, что при силе тока в цепи 2 А напряжение на полюсах источника равно 8 В, а при силе тока 4 А напряжение на полюсах равно 4 В.

- Нанесите по полученным данным точки в координатах  $(I, U)$ .
- Используя эти точки, постройте график зависимости  $U(I)$ .
- Найдите ЭДС источника тока и его внутреннее сопротивление.

11. Изображённый на рисунке 42.3 график зависимости напряжения  $U$  от силы тока  $I$  совершенно не похож на график прямой пропорциональности, который соответствует закону Ома для участка цепи:  $U = IR$ . Чем объясняется это отличие?

Соединение полюсов источника тока проводником с очень малым сопротивлением называют *коротким замыканием*. В этом случае можно считать, что сопротивление внешней цепи  $R = 0$ . Напряжение между полюсами источника тока при этом равно нулю.

°12. Докажите, что сила тока короткого замыкания выражается формулой

$$I_{\text{кз}} = \frac{\mathcal{E}}{r}.$$

Из этой формулы следует, что если внутреннее сопротивление источника тока очень мало (как, например, у автомобильного аккумулятора), сила тока будет очень большой. Из-за этого источник тока может испортиться.



13. Когда полюса батарейки замыкают на амперметр, он показывает 2 А; а когда последовательно с амперметром подключают резистор сопротивлением 4 Ом, сила тока становится равной 1 А.
- Чему можно считать равным сопротивление внешней цепи в первом случае? во втором случае?
  - Как изменилось полное сопротивление цепи после подключения резистора?
  - Чему равно внутреннее сопротивление батарейки?

### 3. КПД источника тока

Из закона сохранения энергии следует, что работа сторонних сил равна суммарному количеству теплоты, выделившемуся во внешней цепи и в источнике тока. Следовательно, используя закон Джоуля — Ленца, можно записать:

$$A_{\text{стор}} = I^2 R t + I^2 r t.$$

Первое слагаемое, равное работе тока во внешней цепи, называют *полезной работой*:  $A_{\text{пол}} = I^2 R t$ .

*Коэффициентом полезного действия (КПД) источника тока* называют выраженное в процентах отношение полезной работы тока во внешней цепи к работе сторонних сил:

$$\eta = \frac{A_{\text{пол}}}{A_{\text{стор}}} \cdot 100 \%$$



14. Докажите, что КПД источника тока с внутренним сопротивлением  $r$  при подключении к внешней цепи с сопротивлением  $R$  выражается формулой

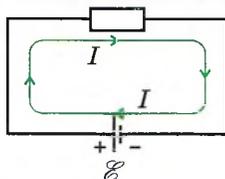
$$\eta = \frac{R}{R + r} \cdot 100 \%$$

15. ЭДС источника тока равна 12 В, а его внутреннее сопротивление равно 2 Ом.
- При каком значении сопротивления внешней цепи КПД источника тока равен 50 %? 80 %? 99 %?
  - Чему равны соответствующие значения силы тока?
  - Имеет ли смысл приближать КПД источника тока к 100 %, изменяя сопротивление внешней цепи?

## ЧТО МЫ УЗНАЛИ



Источник тока



$$\mathcal{E} = \frac{A_{\text{стор}}}{q}$$

Закон Ома для полной цепи

$$I = \frac{\mathcal{E}}{R + r}$$

Напряжение на полюсах источника тока

$$U = \mathcal{E} - Ir$$

Сила тока при коротком замыкании

$$I_{\text{кз}} = \frac{\mathcal{E}}{r}$$

## ? ДОПОЛНИТЕЛЬНЫЕ ВОПРОСЫ И ЗАДАНИЯ

### Базовый уровень

- При протекании заряда, равного 2 Кл, по замкнутой электрической цепи сторонними силами была совершена работа 6 Дж. Чему равна ЭДС источника тока?
- Резистор сопротивлением 5 Ом подключён к источнику тока с ЭДС, равной 18 В, и внутренним сопротивлением 1 Ом. Чему равна сила тока в резисторе и напряжение на клеммах источника?
- Чему равно внутреннее сопротивление источника тока с ЭДС, равной 20 В, если сила тока короткого замыкания равна 10 А?
- Нагреватель подключён к источнику тока с ЭДС, равной 24 В, и внутренним сопротивлением 2 Ом. Чему равно количество теплоты, выделившееся в нагревателе за 5 мин, если сила тока в цепи равна 2 А?

### Повышенный уровень

- Сила тока в лампочке, подключённой к батарейке с ЭДС, равной 1,5 В, равна 0,1 А. Какую работу совершают сторонние силы за 10 мин?
- Электрическую лампочку подключили к батарейке с внутренним сопротивлением 2 Ом. Чему равна ЭДС батарейки, если напряжение на лампочке равно 4 В, а сила тока в ней равна 0,25 А?

22. Электрическая цепь состоит из источника тока, реостата и подключённого к нему вольтметра. При первом положении ползунка реостата сила тока в цепи равна  $0,4\text{ А}$ , а при втором положении ползунка напряжение на реостате равно  $1,6\text{ В}$ . ЭДС источника тока  $2,4\text{ В}$ , его внутреннее сопротивление равно  $4\text{ Ом}$ . При каком положении ползунка сопротивление реостата было больше? Насколько больше?
23. Две параллельно соединённые лампы сопротивлениями  $10\text{ Ом}$  и  $40\text{ Ом}$  подключены к источнику тока с ЭДС, равной  $20\text{ В}$ . Чему равно внутреннее сопротивление источника, если сила тока в цепи равна  $2\text{ А}$ ?
24. Чему равна ЭДС источника тока и его внутреннее сопротивление, если при увеличении сопротивления подключённого к нему реостата от  $4\text{ Ом}$  до  $9,5\text{ Ом}$  сила тока в цепи уменьшается от  $8\text{ А}$  до  $3,6\text{ А}$ ?
25. К батарее с ЭДС  $120\text{ В}$  и внутренним сопротивлением  $10\text{ Ом}$  подключают параллельно соединённые лампы, рассчитанные на силу тока  $0,5\text{ А}$  и напряжение  $100\text{ В}$  каждая. Сколько надо взять ламп, чтобы они горели полным накалом?
26. Когда к источнику тока с ЭДС  $16\text{ В}$  подключают резистор сопротивлением  $24\text{ Ом}$ , мощность тока в резисторе равна  $6\text{ Вт}$ . Чему будет равна сила тока короткого замыкания источника тока?
27. Если к источнику тока подключить резистор сопротивлением  $4\text{ Ом}$ , то мощность тока в резисторе равна  $4\text{ Вт}$ . ЭДС источника тока равна  $6\text{ В}$ . Чему равно внутреннее сопротивление источника?
28. К источнику тока с внутренним сопротивлением  $0,5\text{ Ом}$  подключают участок цепи, состоящий из трёх резисторов сопротивлением  $1\text{ Ом}$  каждый. Начертите схему соединения этих резисторов, если известно, что КПД источника при таком соединении равен  $75\%$ .

### Высокий уровень

29. Когда к источнику тока поочерёдно подключают по одному резисторы сопротивлениями  $2\text{ Ом}$  и  $8\text{ Ом}$ , мощность тока в резисторе оказывается одной и той же. Чему равно внутреннее сопротивление источника?
30. При подключении к источнику тока только первого резистора сила тока равна  $5\text{ А}$ , а мощность тока в резисторе равна  $30\text{ Вт}$ . При подключении к тому же источнику только второго резистора сила тока в резисторе равна  $10\text{ А}$ , а мощность тока равна  $40\text{ Вт}$ . Чему равна сила тока короткого замыкания для этого источника?

31. Если подключить к источнику тока резистор сопротивлением 12 Ом, КПД источника будет равен 60 %. Чему будет равен КПД этого источника, если последовательно с первым резистором подключить второй сопротивлением 60 Ом?

## \* § 43. Дополнительные примеры расчёта электрических цепей

### 1. Метод эквивалентных электрических схем

Соединение проводников, при котором часть проводников соединена друг с другом последовательно, а часть — параллельно, называют *смешанным*.

Для расчёта сопротивления участка цепи при смешанном соединении часто используют *метод эквивалентных схем*. Он состоит в том, что данную схему преобразуют в *более простую, но имеющую такое же сопротивление*.

1. Рассмотрите схему участка цепи, изображённую на рисунке 43.1. Сопротивления резисторов (в омах) равны номерам резисторов (например, сопротивление резистора 3 равно 3 Ом).

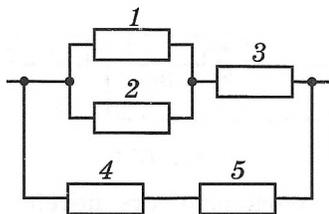


Рис. 43.1

- а) Какие пары резисторов можно заменить одним резистором? Каким должно быть сопротивление этого резистора, чтобы сопротивление участка цепи не изменилось? Начертите соответствующую эквивалентную схему.
- б) Какие следующие аналогичные упрощения схемы можно сделать, не изменяя сопротивления участка цепи?
- в) Чему равно общее сопротивление  $R$  данного участка цепи?

## Похожая задача



2. На рисунке 43.2 изображена схема участка электрической цепи. Сопротивление каждого резистора 1 Ом.

- Используя метод эквивалентных схем, начертите схемы последовательного упрощения данной схемы, содержащие меньше резисторов.
- для каждой схемы рассчитайте её сопротивление и найдите общее сопротивление  $R$  участка цепи.

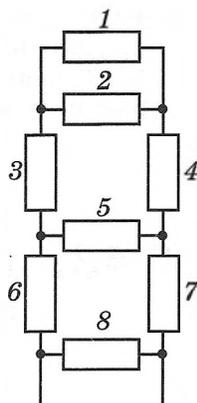


Рис. 43.2

## 2. Использование точек с равным потенциалом

С первого взгляда не всегда удаётся распознать вид соединения проводников в схеме: соединены они последовательно или параллельно.

В таком случае советуем найти точки схемы, *разность потенциалов между которыми равна нулю* (например, точки, соединённые проводом, сопротивление которого обычно принимают равным нулю). Затем попробуйте начертить эквивалентную схему, объединив указанные точки в одну. Рассмотрим примеры.



3. На рисунке 43.3 изображена схема участка электрической цепи. Сопротивления резисторов (в омах) равны номерам резисторов.

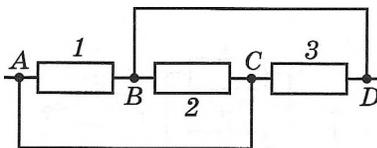


Рис. 43.3

- Для каких пар точек разность потенциалов равна нулю?
- Перечертите схему данного участка цепи, объединив в одну точку те точки, разность потенциалов между которыми равна нулю.
- Чему равно общее сопротивление  $R$  данного участка цепи?

## Похожая задача



4. На рисунке 43.4 изображена схема участка электрической цепи. Сопротивления резисторов (в омах) равны номерам резисторов.

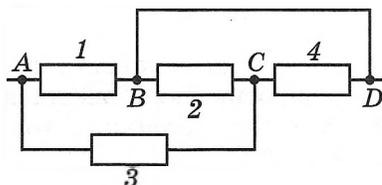


Рис. 43.4

- а) Для какой пары (или каких пар) точек разность потенциалов равна нулю?
- б) Перечертите схему данного участка цепи, объединив в одну точку точки, разность потенциалов между которыми равна нулю.
- в) Чему равно общее сопротивление  $R$  данного участка цепи?

### 3. Максимальная мощность во внешней цепи

5. На рисунке 43.5 изображена схема электрической цепи. Выразите мощность тока во внешней цепи через  $\mathcal{E}$ ,  $r$  и  $R$ .

Из полученной формулы следует, что выделяемая во внешней цепи мощность  $P$  равна нулю при  $R = 0$ , а также стремится к нулю при бесконечно большом внешнем сопротивлении ( $R \rightarrow \infty$ ).

Поставим вопрос: при каком сопротивлении внешней цепи выделяемая во внешней цепи мощность *максимальна*?

Найти условие, при котором выделяемая во внешней цепи мощность максимальна, можно, используя свойства квадратичной функции.

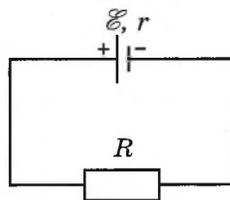


Рис. 43.5

6. Выразите выделяемую во внешней цепи мощность  $P$  через силу тока  $I$  в цепи, ЭДС источника  $\mathcal{E}$  и его внутреннее сопротивление  $r$ .

7. Начертите график зависимости  $P(I)$ .

- а) Используя этот график, найдите выражение для силы тока, при котором функция  $P(I)$  достигает максимума.
- б) При каком соотношении между  $R$  и  $r$  сила тока максимальна?

Ответ последней задачи означает, что *максимальная мощность тока во внешней цепи достигается, когда сопротивление внешней цепи равно внутреннему сопротивлению источника тока.*

8. Чему равен КПД источника тока, когда выделяемая во внешней цепи мощность максимальна?

## Похожая задача

9. Для данного источника тока мощность тока во внешней цепи максимальна, если сопротивление внешней цепи равно 2 Ом. Чему равен КПД этого же источника тока, если внешнее сопротивление равно 8 Ом?

## 4. Конденсаторы в цепи постоянного тока

10. Может ли через конденсатор течь постоянный электрический ток? Обоснуйте свой ответ.

С учётом ответа на последнюю задачу рассмотрим простейшие электрические цепи с конденсаторами.

11. На рисунке 43.6 показана схема электрической цепи. ЭДС источника тока  $\mathcal{E} = 12$  В, его внутреннее сопротивление  $r = 2$  Ом, сопротивление резистора  $R = 1$  Ом, ёмкость конденсатора  $C = 2$  мкФ.

- Чему равно напряжение между точками  $A$  и  $B$ ?
- Чему равно напряжение между точками  $B$  и  $D$ ?
- Чему равно напряжение между точками  $A$  и  $D$ ?
- Чему равен заряд конденсатора?

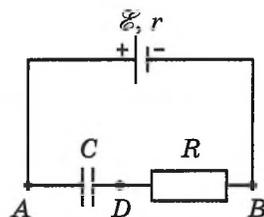


Рис. 43.6

## Похожие задачи

12. На рисунке 43.7 изображена схема электрической цепи, в которой  $\mathcal{E} = 24$  В,  $r = 2$  Ом,  $R = 10$  Ом,  $C = 4$  нФ.

- Чему равно напряжение  $U$  между полюсами источника?
- Чему равен заряд  $q$  конденсатора?

Рассмотрим более сложный пример.

13. На рисунке 43.8 изображена схема электрической цепи, в которой  $\mathcal{E} = 6$  В,  $r = 1$  Ом,  $R_1 = 3$  Ом,  $R_2 = 5$  Ом,  $R_3 = 8$  Ом,  $C = 8$  мкФ.

- Перечертите схему в тетради и обведите те элементы цепи, через которые будет течь ток.
- Чему равно сопротивление внешней цепи  $R$ ?

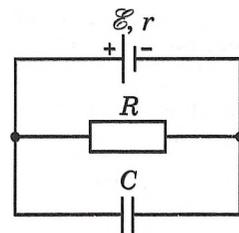


Рис. 43.7

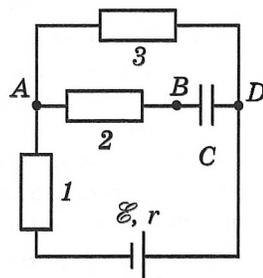


Рис. 43.8

- в) Чему равно полное сопротивление цепи?
- г) Чему равна сила тока в резисторе 3?
- д) Чему равно напряжение между точками  $A$  и  $D$ ?
- е) Чему равно напряжение на конденсаторе?
- ж) Чему равен заряд конденсатора?
- з) Каков знак заряда обкладки конденсатора, соединённой с резистором 2?

## ? ДОПОЛНИТЕЛЬНЫЕ ВОПРОСЫ И ЗАДАНИЯ<sup>1)</sup>

### Повышенный уровень

14. На рисунке 43.9 изображена схема участка электрической цепи. Сопротивление каждого резистора 6 Ом. Что покажет амперметр, если на концы данного участка подать напряжение 18 В?

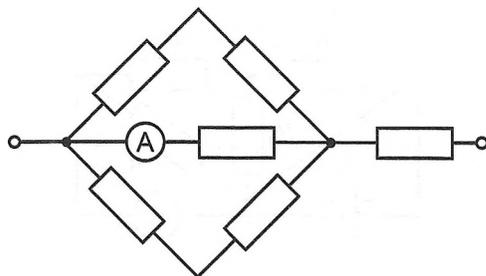


Рис. 43.9

15. Напряжение на концах участка цепи, изображённой на рисунке 43.10, равно 36 В. Чему равна сила тока в каждом резисторе, если  $R_1 = R_2 = R_5 = R_6 = 3$  Ом,  $R_3 = 20$  Ом,  $R_4 = 24$  Ом?

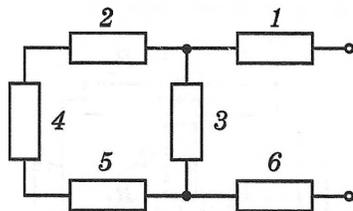


Рис. 43.10

1) Если сопротивления амперметра и вольтметра не указаны, считайте эти приборы идеальными: сопротивление амперметра равным нулю, а сопротивление вольтметра — бесконечно большим.

16. Амперметр, включённый в цепь, схема которой изображена на рисунке 43.11, показывает силу тока 3 А. Чему равно напряжение на концах участка цепи, если сопротивления резисторов  $R_1 = R_2 = 4$  Ом,  $R_3 = R_4 = R_5 = R_6 = 2$  Ом?

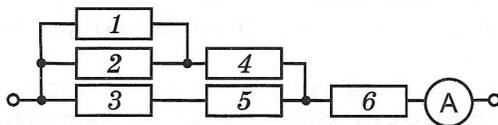


Рис. 43.11

17. Чему равна сила тока в цепи, если ЭДС источника тока 36 В, его внутреннее сопротивление 1 Ом, а сопротивления резисторов  $R_1 = 6$  Ом,  $R_2 = 8$  Ом,  $R_3 = 12$  Ом,  $R_4 = 24$  Ом (рис. 43.12)?

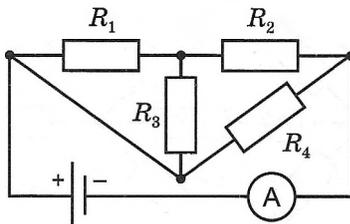


Рис. 43.12

18. В цепи, схема которой изображена на рисунке 43.13, ЭДС источника 30 В, его внутреннее сопротивление 2 Ом, а сопротивления резисторов  $R_1 = 5$  Ом,  $R_2 = 7$  Ом,  $R_3 = 10$  Ом,  $R_4 = 14$  Ом,  $R_5 = 2$  Ом. Будет ли течь ток через резистор  $R_5$ ? Чему равна сила тока в резисторе  $R_1$ ?

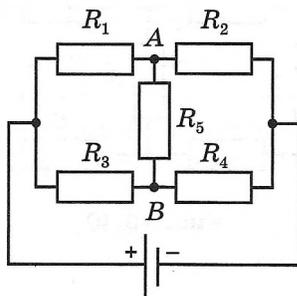


Рис. 43.13

19. Когда резистор сопротивлением 8 Ом подключён к источнику тока с ЭДС 4 В, сила тока в резисторе равна 0,4 А. Какова максимальная мощность тока при использовании данного источника тока?
20. К источнику тока со внутренним сопротивлением 2 Ом подключён реостат, сопротивление которого можно изменять в пределах от 1 до 5 Ом. Чему равна ЭДС источника, если максимальная мощность тока равна 4,5 Вт?
21. Напряжение на концах участка цепи, изображённой на рисунке 43.14, равно 140 В. Известно, что  $C_1 = 2$  мкФ,  $C_2 = 5$  мкФ,  $R_1 = 10$  Ом,  $R_2 = 20$  Ом,  $R_3 = 40$  Ом. Заряд какого из двух конденсаторов больше? Во сколько раз больше?

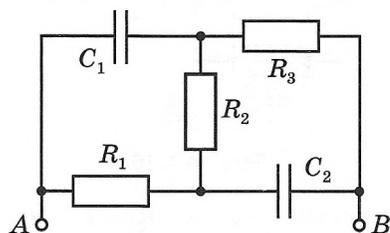


Рис. 43.14

**Высокий уровень**

22. Сопротивление каждого резистора в единицах СИ в цепи, схема которой изображена на рисунке 43.15, равно номеру этого резистора. ЭДС источника равна 7,5 В, сила тока в резисторе 2 равна 0,5 А. Чему равно внутреннее сопротивление источника?

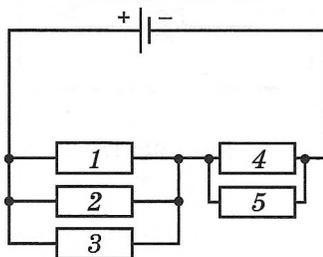


Рис. 43.15

23. Заряд конденсатора ёмкостью  $5 \text{ мкФ}$ , включённого в электрическую цепь (рис. 43.16) равен  $1 \text{ мКл}$ . Сопротивления резисторов  $R_1 = 90 \text{ Ом}$ ,  $R_2 = 30 \text{ Ом}$ ,  $R_3 = 60 \text{ Ом}$ ,  $R_4 = 40 \text{ Ом}$ . Чему равна ЭДС источника, если его внутреннее сопротивление  $2 \text{ Ом}$ ?

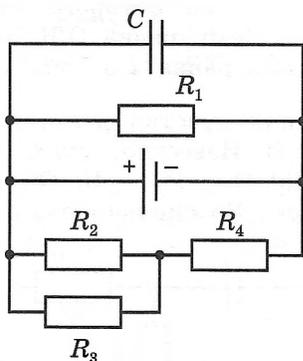


Рис. 43.16

24. Какой заряд пройдёт через ключ после его замыкания (рис. 43.17)? Ёмкости конденсаторов  $C_1 = 4 \text{ мкФ}$ ,  $C_2 = 2 \text{ мкФ}$ , сопротивления резисторов  $R_1 = 0,5 \text{ Ом}$ ,  $R_2 = 2 \text{ Ом}$ , напряжение на полюсах источника тока  $U = 10 \text{ В}$ . Внутренним сопротивлением источника можно пренебречь.

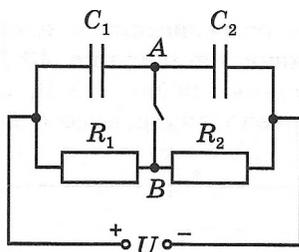


Рис. 43.17

## § 44. Электрический ток в жидкостях и газах

### 1. Электрический ток в электролитах

#### Поставим опыт

Опустим в сосуд с дистиллированной водой (она не содержит примесей и растворённых веществ) два электрода — проводника, соединённых с источником тока через лампу (рис. 44.1, а). Лампа не загорится. Следовательно, дистиллированная вода — *диэлектрик*: в ней нет свободных носителей заряда.

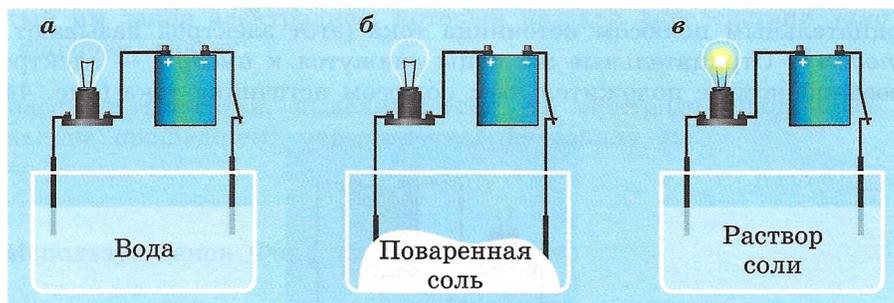


Рис. 44.1

Вытрем насухо электроды и опустим их в сосуд с сухой поваренной солью (рис. 44.1, б). И на этот раз лампа тоже не загорится — следовательно, сухая поваренная соль также является *диэлектриком*, в ней тоже нет свободных носителей заряда.

А теперь «объединим» эти два диэлектрика: насыплем в сосуд с водой несколько ложек поваренной соли. Теперь при погружении в сосуд электродов лампа загорается (рис. 44.1, в), причём по мере растворения соли накал лампы увеличивается. Это означает, что раствор соли в воде является *проводником*, то есть в нём есть свободные носители заряда, причём появились они именно при *растворении* соли в воде. Какова же их природа?

#### Электролитическая диссоциация

Опыты показывают, что раствор поваренной соли не исключение: практически все водные растворы и расплавы солей, щелочей и кислот являются проводниками. Их называют *электролитами*<sup>1)</sup>.

<sup>1)</sup> От «электро» и греческого «литос» — разложимый, растворимый.

Чем же обусловлена проводимость электролитов? Какова природа свободных носителей зарядов в них?

Рассмотрим это на примере раствора поваренной соли. Как вам известно из курса химии, химическая формула поваренной соли  $\text{NaCl}$ . При растворении соли в воде молекулы соли распадаются на положительно заряженные ионы натрия  $\text{Na}^+$  и отрицательно заряженные ионы хлора  $\text{Cl}^-$ . Эти ионы и становятся свободными носителями заряда в растворе соли. Таким образом,

носителями заряда в электролитах являются *ионы*, то есть *электролиты обладают ионной проводимостью*.

Распад нейтральной молекулы на ионы в электролите называют *электролитической диссоциацией*<sup>1)</sup>.

Положительные ионы движутся к электроду, соединённому с отрицательным полюсом источника тока (этот электрод называют *катодом*<sup>2)</sup>). Отрицательные же ионы движутся к *аноду*<sup>3)</sup> — электроду, соединённому с положительным полюсом источника тока (рис. 44.2).

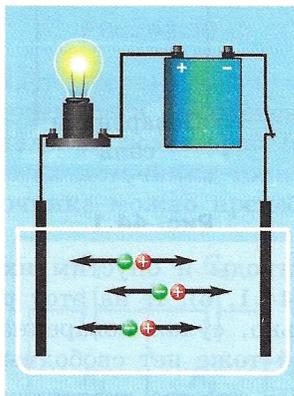


Рис. 44.2

° 1. Как направлен ток, обусловленный направленным движением:

- положительных ионов;
- отрицательных ионов?

На аноде отрицательные ионы отдают избыточные электроны, а на катоде положительные ионы получают недостающие электроны. В результате те и другие ионы превращаются в *нейтральные* атомы или молекулы.

1) От латинского «диссоциацио» — разъединение.

2) От греческого «катодос» — спуск.

3) От греческого «анодос» — подъём.

При повышении температуры интенсивность теплового движения увеличивается, что приводит к увеличению числа ионов в электролите. Увеличение же числа носителей заряда приводит к тому, что удельное сопротивление электролита уменьшается.

Вот почему *при нагревании сопротивление электролитов уменьшается.*

- ° 2. Сравните зависимость от температуры удельного сопротивления электролитов и металлов.

## 2. Закон электролиза (закон Фарадея)

Процесс выделения вещества на электродах, протекающий вследствие прохождения электрического тока, называют *электролизом*.

Явление электролиза первым изучил на опыте М. Фарадей. Открытый им закон электролиза, который назвали впоследствии *законом Фарадея*, гласит:

масса  $m$  вещества, выделившегося на электроде, пропорциональна прошедшему через электролит заряду  $q$ :

$$m = kq.$$

- ° 3. Используя закон Фарадея, докажите, что

$$m = kIt,$$

где  $I$  — сила тока,  $t$  — время прохождения тока.

Постоянную  $k$  называют *электрохимическим эквивалентом* вещества.

4. Используя закон Фарадея, докажите, что

$$k = \frac{m_0}{en},$$

где  $m_0$  — масса одного *иона*,  $e$  — элементарный заряд,  $n$  — число недостающих (или избыточных) электронов у иона (то есть его *валентность*).

## 3. Применения электролиза

### Покрывание слоем металла

Чтобы предохранить железные или стальные изделия от коррозии или придать им более красивый вид, их часто покрывают, используя электролиз, тонким слоем другого металла, обычно не подверженного коррозии, — например, никеля, хрома, серебра,

золота. Покрытие металла слоем никеля или хрома называют соответственно никелированием и хромированием.

Металлическое изделие при этом служит катодом, а электролитом является водный раствор соли того металла, которым надо покрыть данное изделие (никеля, хрома и т. д.). Анодом служит пластинка тоже из этого металла. В результате электролиза атомы металла осаждаются на катоде, покрывая его равномерным тонким слоем.

С помощью электролиза можно получать также точные копии поверхности какого-либо тела, состоящего из диэлектрика (например, гипсовой или восковой статуэтки). С этой целью тело покрывают графитом (который является проводником) и используют в качестве катода. Когда на поверхности тела вследствие электролиза «нарастёт» достаточно толстый слой металла (например, меди), этот слой осторожно отделяют от тела. В результате получается точная металлическая копия поверхности тела. Такой способ изготовления металлических копий предметов называют *гальванопластикой*.

### Электрометаллургия

Электролиз используют также для очистки металлов от примесей и для получения металлов из руды.

Например, полученную из руды неочищенную медь используют в качестве анода, который постепенно растворяется в процессе электролиза. Электролитом служит водный раствор солей меди. В качестве катода используют пластинку из чистой меди. На эту пластинку вследствие электролиза осаждаются атомы меди.

Важнейшим практическим применением электролиза является получение алюминия. Его получают при электролизе расплава бокситов — алюминиевых руд. Именно этот способ промышленного получения алюминия сделал его дешёвым и обеспечил тем самым его широчайшее распространение в быту и в технике: от кастрюль до самолётов.

## 4. Электрический ток в газах и вакууме

### Несамостоятельный разряд в газах

При обычных условиях (не очень высоких температурах и не очень сильных электрических полях) газы не проводят электрический ток, то есть являются диэлектриками. Это означает, что в них отсутствуют свободные носители заряда. В частности, хорошим диэлектриком является воздух.

Однако свободные носители заряда можно *создать* в газе, и тогда он станет проводить электрический ток.

## Поставим опыт

Соединим заряженный демонстрационный плоский конденсатор с электрометром (рис. 44.3, а).

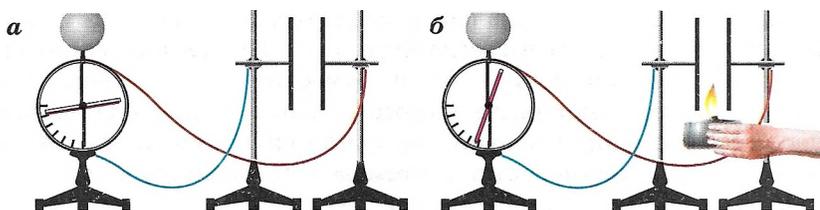


Рис. 44.3

Мы заметим, что заряд конденсатора в течение длительного времени остаётся практически неизменным. Это означает, что при комнатной температуре воздух является диэлектриком.

Внесём теперь пламя в пространство между пластинами конденсатора (рис. 44.3, б). Конденсатор начнёт разряжаться. Значит, нагретый воздух проводит электрический ток, то есть в нём есть свободные носители заряда.

В описанном выше опыте, вследствие нагревания воздуха пламенем, молекулы, входящие в состав воздуха, начинают двигаться настолько быстро, что при столкновениях некоторые из них «разбиваются», превращаясь в *положительно заряженные ионы* и *электроны*. При столкновениях электронов с нейтральными атомами могут образовываться также и *отрицательные ионы*.

Появление в газе ионов называют *ионизацией газа*, а энергию, которую надо сообщить молекуле, чтобы превратить её в заряженные частицы, называют *энергией ионизации*.

Ионизированный газ является проводником: носителями заряда в нём являются положительные и отрицательные ионы, а также электроны.

Ионизировать газ можно не только с помощью нагревания: нейтральные атомы и молекулы газа могут превращаться в ионы также *под воздействием различных излучений*.

Факторы, вызывающие ионизацию газа, называют *ионизаторами*.

Если ток через газ идёт только в присутствии ионизатора, процесс протекания тока называют *несамостоятельным газовым разрядом*. Именно таким и являлся газовый разряд в рассмотренном выше опыте: если убрать пламя из области между пластинами конденсатора, ток перестаёт идти, и разрядка конденсатора прекращается.

### Самостоятельный разряд в газах

При определённых условиях ток в газах может идти и без ионизатора. В таком случае процесс протекания тока называют *самостоятельным газовым разрядом*.

Какова же причина появления носителей заряда в этом случае?

Дело в том, что в газе всегда есть хотя бы немного заряженных частиц (электронов и ионов). Если поместить газ в электрическое поле, то оно будет действовать на эти частицы. Если поле достаточно сильное, то заряженная частица разгоняется полем до такой скорости, что при её столкновении с атомом или молекулой происходит ионизация.

Вследствие ионизации появляются новые заряженные частицы — ионы и электроны. Они также разгоняются полем, ионизируя новые атомы или молекулы, что, в свою очередь, приводит к дополнительному увеличению числа заряженных частиц.

В результате число заряженных частиц резко возрастает — это явление называют *электронной лавиной*. Именно ею и объясняется самостоятельный разряд в газах.

Рассмотрим различные типы самостоятельного разряда в газах.

**Тлеющий разряд.** При уменьшении давления газа среднее расстояние, которое пролетает электрон между последовательными столкновениями, увеличивается. Поэтому в достаточно разрежённом газе электроны успевают между столкновениями с молекулами «набрать» энергию, достаточную для ионизации нейтральных молекул газа, при сравнительно небольшой напряжённости поля.

Описанный разряд, происходящий при низком давлении (доли миллиметра ртутного столба, то есть в тысячи раз меньше атмосферного давления), называют *тлеющим разрядом*.

Тлеющий разряд используют в люминесцентных лампах и трубках для рекламы (рис. 44.4).

**Коронный разряд.** В грозовую или предгрозовую погоду вблизи заострённых металлических предметов возникает своеобразное свечение, напоминающее корону.

Это — проявление газового разряда, названного по указанной причине *коронным разрядом*.

В старину свечение, обусловленное коронным разрядом, называли «огнями святого Эльма».

Какова же природа коронного разряда?

Дело в том, что в достаточно сильном электрическом поле (а такое поле возникает вблизи *острия* заряженного тела) ионизация



Рис. 44.4

молекулы при столкновении с электроном происходит даже при атмосферном давлении.

По мере удаления от острия напряжённость поля быстро убывает, поэтому вдали от острия электронной лавины не возникает.

Коронный разряд используют в *электрофильтрах* для очистки воздуха. Под действием коронного разряда воздух ионизируется. Ионы, сталкиваясь с частицами дыма, заряжают их, после чего заряженные частицы притягиваются к электродам и оседают на них.

**Искровой разряд.** При очень большой напряжённости электрического поля в воздухе возникают ярко светящиеся зигзагообразные нити. Это — искровой разряд. Его характерной особенностью является прерывистость.

Искровой разряд в небольших масштабах возникает при включении или выключении тока обычным выключателем. Но он может происходить и в гигантских масштабах — это *молнии* (рис. 44.5).

**Дуговой разряд.** Если привести в соприкосновение угольные электроды, к которым приложено напряжение в несколько десятков вольт, в цепи возникнет большой ток. При этом в месте контакта электродов (где сопротивление максимально) электроды раскалятся настолько, что с катода (отрицательно заряженного электрода) начинают вылетать электроны. Это явление называют *термоэлектронной эмиссией*<sup>1)</sup>.

Благодаря термоэлектронной эмиссии ток в газе (воздухе) не прекращается и после раздвигания электродов: возникает самостоятельный разряд. Его называют *дуговым разрядом* (рис. 44.6). Дуговой разряд открыл русский физик В. В. Петров. Он же предложил и первые практические применения этого разряда.

Температура при дуговом разряде достигает  $6000\text{ }^{\circ}\text{C}$  (такова, например, температура на поверхности Солнца).

Дуговой разряд используют для электросварки металлов, а также в прожекторах, проекционных аппаратах и на маяках. В металлургии широко применяют дуговые электропечи: в них выплавляют, например, сталь, чугун и бронзу.



Рис. 44.5



Рис. 44.6

<sup>1)</sup> От латинского «эмиссио» — испускание, излучение.

### Электрический ток в вакууме

Чтобы электрический ток мог течь в вакууме, носители заряда должны быть «порождены» самими электродами. Это возможно, если один из электродов нагреть до достаточно высокой температуры: при этом возникает термоэлектронная эмиссия. Из нагретого электрода вылетают электроны, которые становятся носителями заряда.

? <sup>o</sup> 5. С каким полюсом источника тока надо соединить нагретый электрод, чтобы возник электрический ток?

Благодаря термоэлектронной эмиссии мы встречаемся с новым явлением — *односторонней проводимостью*. Ведь если один из электродов нагрет, а другой остаётся холодным, то ток может течь только в одном направлении.

? <sup>o</sup> 6. В каком направлении может течь ток — от нагретого электрода к холодному или от холодного к нагретому? В каком направлении будут при этом двигаться электроны?

Явление термоэлектронной эмиссии используют для создания *вакуумных диодов* — электрических приборов с односторонней проводимостью. В середине 20-го века они очень широко использовались в радиотехнике, но во второй половине 20-го века их начали заменять *полупроводниковыми диодами*, о которых мы расскажем в следующем параграфе. Тем не менее вакуумные диоды применяют и сегодня, например в *выпрямителях* — приборах, предназначенных для промышленного преобразования переменного тока в постоянный.

## 5. Плазма

*Плазмой* называют сильно ионизированный газ. Плазма образуется, например, при нагревании газа до очень высокой температуры. Плазма обладает особыми свойствами, вследствие чего её называют «четвёртым состоянием вещества», которое следует за газообразным в уже знакомом вам ряду агрегатных состояний «твёрдое тело — жидкость — газ».

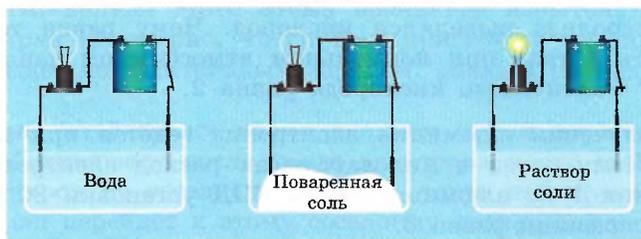
Плазма — сравнительно редкое состояние вещества на Земле (в естественных условиях это, например, состояние вещества в шаровой молнии), но в космических масштабах это очень распространённое состояние, потому что именно в таком состоянии находятся звёзды, в том числе Солнце.

Поскольку в плазме есть свободные заряды, она является *проводником*. Свободными носителями заряда в плазме являются *электроны и ионы*.

## ЧТО МЫ УЗНАЛИ



## Электролиз



Носителями заряда в электролитах являются ионы, то есть электролиты обладают ионной проводимостью

Закон Фарадея: масса  $m$  вещества, выделившегося на электроде, пропорциональна прошедшему через электролит заряду  $q$ :

$$m = kq,$$

$k$  — электрохимический эквивалент вещества

Носители заряда в газах — электроны и ионы

Носители заряда в вакууме — электроны

## ? ДОПОЛНИТЕЛЬНЫЕ ВОПРОСЫ И ЗАДАНИЯ

### Повышенный уровень

7. Через электролит течёт ток.
  - а) Двигутся положительные и отрицательные ионы в одном направлении или в противоположных?
  - б) Обусловленный движением этих ионов ток направлен одинаково или противоположно?
8. Электролитическую ванну наполнили слабым раствором поваренной соли и подключили к источнику тока с достаточно большим внутренним сопротивлением. Увеличится или уменьшится напряжение на полюсах батареи, если в ванну добавить ещё соли? Обоснуйте свой ответ.
9. Для никелирования металлической пластинки площадью поперечного сечения  $48 \text{ см}^2$  через ванну в течение 4 ч пропуска-

- ли ток. Чему равна толщина образовавшегося слоя никеля на пластинке, если сила тока равна  $0,15 \text{ А}$ , а валентность никеля 2? Плотность никеля  $8900 \text{ кг/м}^3$ .
10. Через ванну с электролитом прошёл заряд  $2500 \text{ Кл}$ . В процессе электролиза выделялся кислород. Чему равна температура, если объём газа при нормальном атмосферном давлении равен  $0,18 \text{ л}$ ? Валентность кислорода равна 2.
11. Для получения алюминия электролиз ведётся при напряжении  $10 \text{ В}$ . Чему равен в киловатт-часах расход электроэнергии для получения  $1 \text{ кг}$  алюминия, если КПД установки  $80 \%$ ? Валентность алюминия равна 3.

## § 45. Электрический ток в полупроводниках

### 1. Полупроводники

*Полупроводниками* называют вещества, удельное сопротивление которых во много раз меньше, чем у диэлектриков, но намного больше, чем у металлов.

Наиболее распространёнными полупроводниками являются *кремний* и *германий*.

«Промежуточное» между проводниками и диэлектриками удельное сопротивление полупроводников само по себе не представляло особого интереса для учёных и инженеров. Их куда больше заинтересовало то, что *сопротивление полупроводников сильно зависит от наличия примесей, а также от внешних условий* — например, температуры и освещённости. Именно эти особенности полупроводников оказались главными для создания приборов нового типа.

#### Носители заряда в полупроводниках

В полупроводниках электроны внешних оболочек связаны со «своими» атомами сильнее, чем в металлах, но слабее, чем в диэлектриках.

Поэтому некоторые из этих электронов могут оторваться от «своих» атомов, став при этом *отрицательными* носителями заряда (1 на рис. 45.1). Их называют *электронами проводимости*.

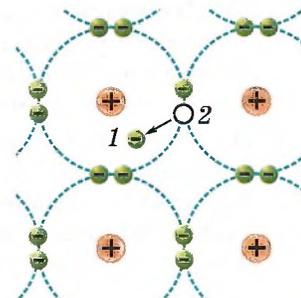


Рис. 45.1

Проводимость полупроводника, обусловленную перемещением *электронов*, называют *электронной*.

Когда электрон покидает «свой» атом, становясь электроном проводимости, вблизи этого атома возникает избыточный *положительный* заряд (2 на рис. 45.1). Ему присвоили термин «дырка». Дырка обладает положительным зарядом, равным по модулю заряду электрона.

Дырка не остаётся всё время в одном и том же месте, потому что на освободившееся после ухода электрона место может переместиться электрон из соседнего атома — тогда избыточный положительный заряд перейдёт к этому соседнему атому. Выглядеть это будет так, будто к этому атому *переместилась дырка*. Таким образом, дырки становятся *положительными носителями заряда*.

Проводимость полупроводника, обусловленную перемещением *дырок*, называют *дырочной*.

Когда полупроводник помещают в электрическое поле, электроны и дырки начинают двигаться под действием этого поля. А это значит, что по полупроводнику начинает течь *электрический ток*.

° 1. Совпадает ли направление электрического тока, обусловленное движением электронов, с направлением электрического тока, обусловленного движением дырок?

Когда электрон проводимости встречается с дыркой, они уничтожают друг друга. Взаимное уничтожение электрона проводимости и дырки называют *рекомбинацией*.

В полупроводнике, не содержащем примесей, число дырок равно числу электронов проводимости, потому что появление каждого электрона проводимости (отрыв внешнего электрона от «своего» атома) сопровождается появлением дырки (избыточного положительного заряда у того же атома).

Проводимость полупроводника, обусловленную равным числом свободных электронов и дырок, называют *собственной проводимостью*.

### Зависимость сопротивления полупроводников от температуры и освещённости

Опыты показывают, что

удельное сопротивление полупроводника при повышении температуры уменьшается.



Уменьшение сопротивления полупроводника обусловлено увеличением числа *свободных зарядов*: при повышении температуры доля электронов, имеющих энергию, достаточную для того, чтобы оставить свои атомы и стать электронами проводимости, увеличивается, причём довольно быстро. При этом так же увеличивается и число дырок.

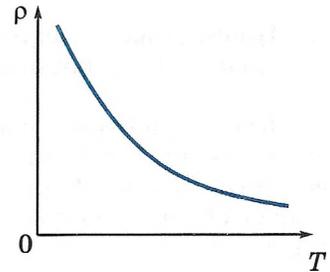


Рис. 45.2

Типичный график зависимости удельного сопротивления полупроводника от температуры приведён на рисунке 45.2.

Зависимость сопротивления полупроводников от температуры лежит в основе действия датчиков температуры — *термисторов*. Их используют, например, в противопожарной сигнализации.

Электроны в полупроводниках могут покинуть свои атомы, становясь электронами проводимости, также под действием *света*, то есть при увеличении освещённости. Это проявляется в том, что

при увеличении освещённости сопротивление полупроводника уменьшается.

Зависимость сопротивления полупроводников от освещённости лежит в основе действия датчиков освещённости — *фоторезисторов*. Их используют, например, в турникетах метро, а также для автоматического включения и выключения осветительных приборов (например, уличного освещения).

## 2. Примесная проводимость полупроводников

В полупроводнике, не содержащем примесей, число дырок равно числу электронов проводимости. Однако, добавляя в полупроводник сравнительно небольшое число атомов другого элемента, можно существенно изменить соотношение между числом дырок и числом электронов проводимости.

**Донорные примеси.** Если в кристалл кремния, состоящий из *четырёхвалентных* атомов, добавить некоторое число *пятивалентных* атомов мышьяка, то один из валентных электронов каждого атома мышьяка окажется «лишним», благодаря чему он станет *электроном проводимости* (рис. 45.3).

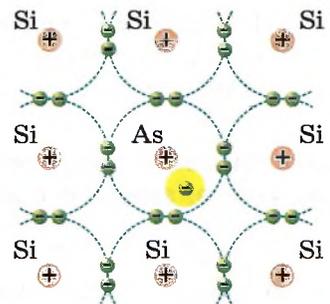


Рис. 45.3

Следовательно, основными носителями заряда в полупроводнике станут электроны проводимости.

Полупроводники, в которых основными носителями заряда являются электроны проводимости, называют *полупроводниками  $n$ -типа*<sup>1)</sup>.

Примеси, добавление которых делает данный полупроводник полупроводником  $n$ -типа, называют *донорными*<sup>2)</sup>.

**Акцепторные примеси.** Если в кристалл кремния добавить некоторое число *трёхвалентных* атомов алюминия, то увеличится число дырок, потому что каждому атому алюминия будет не хватать одного валентного электрона для образования связей с соседними четырёхвалентными атомами кремния: одна из электронных связей останется незаполненной. Её вскоре заполнит валентный электрон, покинувший какой-либо из соседних атомов кремния, в результате чего на его месте возникнет некомпенсированный положительный заряд, то есть образуется *дырка* (рис. 45.4).

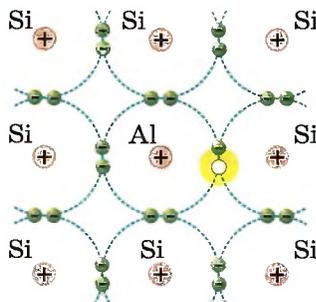


Рис. 45.4

Число же электронов проводимости в полупроводнике при этом не увеличится. Следовательно, основными носителями заряда станут дырки.

Полупроводники, в которых основными носителями заряда являются дырки, называют *полупроводниками  $p$ -типа*<sup>3)</sup>.

Примеси, добавление которых делает данный полупроводник полупроводником  $p$ -типа, называют *акцепторными*<sup>4)</sup>.

2. Используя таблицу Менделеева, укажите, атомы каких химических элементов можно добавить в кристалл кремния, чтобы получить полупроводник:

- а)  $n$ -типа;
- б)  $p$ -типа?

Предлагаемые элементы для примесей: индий, сурьма, фосфор, скандий, галлий.

1) От латинского «негативус» — отрицательный.

2) От латинского «донор» — дающий.

3) От латинского «позитивус» — положительный.

4) От латинского «акцептор» — получающий.

### 3. Полупроводниковый диод

На границе раздела полупроводников разного типа происходит диффузия носителей заряда: электроны проводимости проникают в полупроводник  $p$ -типа, а дырки проникают в полупроводник  $n$ -типа. Это приводит к возникновению на границе раздела слоя, обеднённого носителями заряда, потому что в этом слое электроны проводимости и дырки взаимно уничтожают друг друга. Этот слой называют *запирающим*. На схеме (рис. 45.5) он ограничен пунктирными линиями. Как мы сейчас увидим, данный слой оказывается «запирающим» только для одного направления тока.

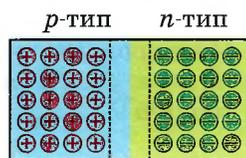


Рис. 45.5

Подключим к полупроводнику  $p$ -типа положительный полюс источника тока, а к полупроводнику  $n$ -типа — отрицательный. Чтобы не загромождать рисунок 45.6, на нём показаны только носители заряда, находящиеся вблизи границы раздела.

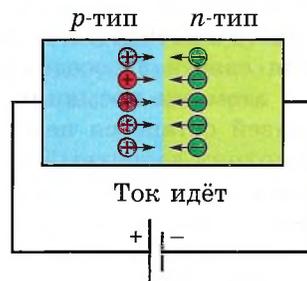


Рис. 45.6

Мы видим, что в этом случае внешнее электрическое поле «гонит» носители заряда (дырки и электроны проводимости) с двух сторон к границе раздела полупроводников разного типа. В результате концентрация носителей заряда вблизи границы раздела увеличится, запирающий слой разрушится, и через границу раздела полупроводников потечёт ток.

Изменим теперь полярность подключения источника тока (рис. 45.7).

На этот раз внешнее электрическое поле «гонит» носители заряда от границы раздела полупроводников разного типа. В результате обеднённый носителями заряда запирающий слой будет расширяться, и его сопротивление станет очень большим. Следовательно, сила тока будет очень малой. В большинстве случаев этим током можно пренебречь.

Итак, через границу полупроводников  $p$ -типа и  $n$ -типа, которую называют  $p$ - $n$ -переходом, может течь ток только в одном направлении — от полупроводника  $p$ -типа к полупроводнику  $n$ -типа. Это и означает, что  $p$ - $n$ -переход обладает *односторонней проводимостью*.

Полупроводниковое устройство с односторонней проводимостью называют *полупроводниковым диодом*.

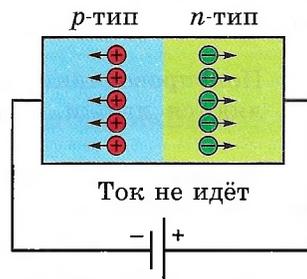


Рис. 45.7

На рисунке 45.8 показана простейшая электрическая схема с *прямым* подключением диода, когда ток идёт через диод, а на рисунке 45.9 — с *обратным*, когда ток не идёт через диод. Обратите внимание на то, как обозначают диоды на электрических схемах: стрелка-треугольник показывает направление тока через диод при *прямом* подключении.

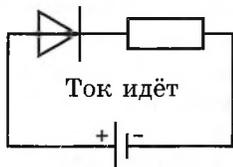


Рис. 45.8



Рис. 45.9

3. К клеммам *A* и *B* (рис. 45.10) подключают источник тока с ЭДС, равной 12 В, и внутренним сопротивлением 2 Ом. Сопротивления резисторов  $R_1 = 2$  Ом,  $R_2 = 4$  Ом.

- а) Чему равно полное сопротивление цепи, если положительный полюс источника тока подключён к клемме *A*?
- б) Чему равны при этом мощность тока в резисторе и КПД источника тока?
- в) Чему равны мощность тока в резисторе и КПД источника тока, если положительный полюс источника тока подключён к клемме *B*?

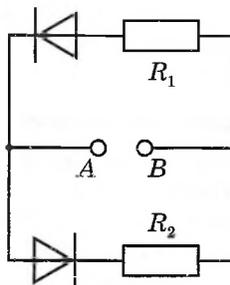


Рис. 45.10

### \*4. Транзистор

Транзистор — это полупроводниковый прибор, с помощью которого можно управлять силой тока в цепи (например, усиливать электрический сигнал).

На рисунке 45.11 схематически изображён *p-n-p*-транзистор. Между двумя слоями полупроводника *p*-типа, которые называют *эмиттером*<sup>1)</sup> и *коллектором*<sup>2)</sup>, находится очень тонкая прослойка полупроводника *n*-типа, которую называют *базой*.

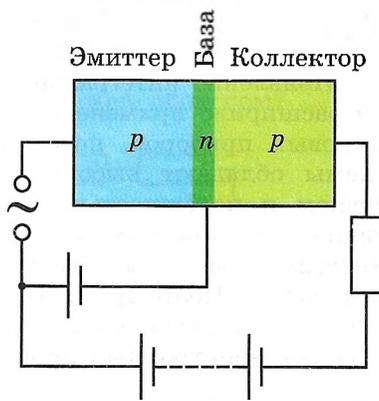


Рис. 45.11

1) От английского «emit» — излучать, испускать.  
2) От английского «collect» — собирать.



Как мы сейчас увидим, *малые изменения* напряжения между эмиттером и базой вызывают *во много раз большие* изменения напряжения в цепи коллектора. Благодаря этому транзистор используют для *усиления электрических сигналов* — это и есть его основное назначение.

Дело в том, что базу делают настолько тонкой, что она сама по себе практически не задерживает дырки при их переходе с эмиттера на коллектор. Однако число этих дырок сильно зависит от *напряжения между эмиттером и базой*: чем сильнее «отрицательная» база притягивает положительно заряженные дырки, тем большее их число пройдет *сквозь* базу и попадёт в коллектор.

Это приводит к тому, что изменение напряжения между базой и эмиттером на *сотые доли вольта* влечёт за собой изменение напряжения между эмиттером и коллектором на *несколько вольт*. Благодаря этому можно усиливать очень слабые сигналы в антеннах радиоприёмников и мобильных телефонов. Мы рассмотрим это подробнее в следующем учебном году.

Заметим, что наряду с *p-n-p*-транзисторами используются также *n-p-n*-транзисторы, в которых эмиттером и коллектором являются полупроводники *n*-типа, а базой — полупроводник *p*-типа.

### Интегральные схемы

Диод и транзистор принадлежат к числу основных элементов так называемых *интегральных схем*, входящих, например, в состав компьютеров, планшетов и мобильных телефонов. Одна интегральная схема может содержать тысячи и даже миллионы элементов.

Интегральную схему обычно размещают на выращенном особым способом кристалле кремния. Кристалл, содержащий интегральную схему, часто называют *чипом*<sup>1)</sup>.

На рисунке 45.12 приведены фотографии некоторых чипов рядом с масштабной линейкой.

Появление интегральных схем резко расширило применение полупроводниковых приборов, потому что такие схемы обладают высоким быстродействием и надёжностью. Очень важно также, что при массовом производстве интегральные схемы были достаточно дешёвыми. Поэтому на их основе созданы и создаются многочисленные доступные электронные приборы.

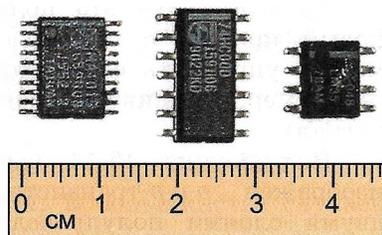


Рис. 45.12

1) От английского «chip» — тонкая пластинка.

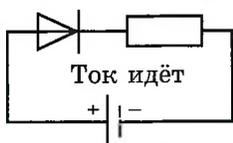
ЧТО МЫ УЗНАЛИ



В полупроводниках *n*-типа основные носители заряда — электроны

В полупроводниках *p*-типа основные носители заряда — дырки

Полупроводниковый диод



? ДОПОЛНИТЕЛЬНЫЕ ВОПРОСЫ И ЗАДАНИЯ<sup>1)</sup>

Базовый уровень

4. Расскажите о носителях заряда:
  - а) в полупроводниках без примесей;
  - б) в полупроводниках с донорной примесью;
  - в) в полупроводниках с акцепторной примесью.
5. Элемент с какой валентностью надо добавить в качестве примеси в кремний, чтобы получить полупроводник *n*-типа? полупроводник *p*-типа? Приведите примеры таких примесей.
6. На рисунках 45.13, *a*, *б* изображены схемы цепей, в которые включён *p-n*-переход. На какой из схем *p-n*-переход изображён при прямом подключении, а на какой — при обратном?

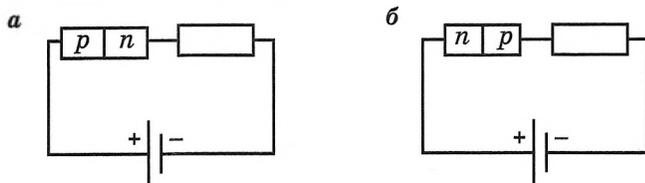


Рис. 45.13

<sup>1)</sup> При решении задач этого параграфа примите, что если иное не оговорено в условии, то сопротивлением диода при его прямом подключении можно пренебречь, а его сопротивление при обратном подключении можно считать бесконечно большим.

7. Начертите две схемы с диодами, используя обозначение диода на схеме. На первой схеме должно быть прямое подключение диода, а на второй — обратное.

### Повышенный уровень

8. Используя вольтамперную характеристику полупроводникового диода (рис. 45.14), определите, во сколько раз его сопротивление при обратном подключении больше, чем при прямом, если модуль напряжения при прямом подключении равен 0,2 В, а при обратном — 400 В.

Обратите внимание на *различные масштабы* на осях для прямого и обратного подключения.

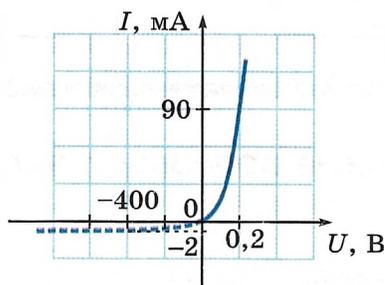


Рис. 45.14

9. В зависимости от полярности подключения источника тока напряжением 30 В к участку цепи, изображённому на рисунке 45.15, мощность тока в участке цепи равна либо 20 Вт, либо 60 Вт. Перенесите рисунок в тетрадь и укажите на нём направление тока в резисторах в обоих случаях, а также сопротивления резисторов. Внутренним сопротивлением источника тока можно пренебречь.

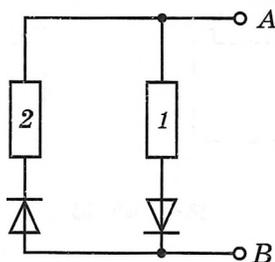


Рис. 45.15

**Высокий уровень**

10. Сопротивление каждого резистора в цепи, схема которой изображена на рисунке 45.16, равно внутреннему сопротивлению источника тока  $r$ , ЭДС источника тока равна  $\mathcal{E}$ .

- а) Перенесите схему в тетрадь и укажите на ней направление электрического тока в каждом резисторе.
- б) Найдите сопротивление всей цепи.
- в) Найдите мощность тока в цепи.
- г) Найдите КПД источника.
- д) Как изменятся результаты, если изменить полярность подключения источника тока?

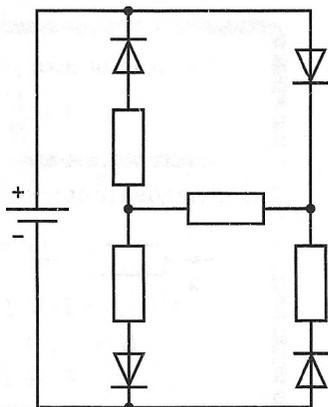


Рис. 45.16

11. В зависимости от полярности подключения источника тока напряжением 100 В к участку цепи, схема которого изображена на рисунке 45.17, мощность тока в участке цепи равна либо 150 Вт, либо 83 Вт. Перенесите рисунок в тетрадь и укажите на нём направление тока в резисторах при различных способах подключения источника тока. Чему равны сопротивления первого и третьего резисторов, если сопротивление второго резистора 200 Ом?

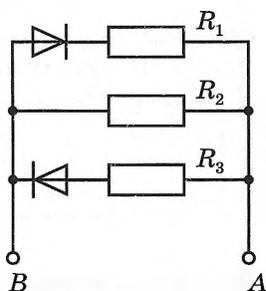


Рис. 45.17

## ГЛАВНОЕ В ГЛАВЕ VIII

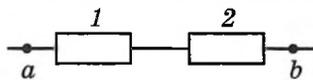
Закон Ома для участка цепи

$$I = \frac{U}{R}$$

Сопротивление провода

$$R = \rho \frac{l}{S}$$

Последовательное соединение

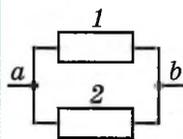


$$I = I_1 = I_2$$

$$U = U_1 + U_2$$

$$R = R_1 + R_2$$

Параллельное соединение



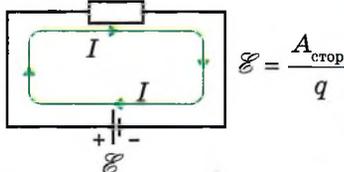
$$I = I_1 + I_2$$

$$U = U_1 = U_2$$

$$\frac{1}{R} = \frac{1}{R_1} + \frac{1}{R_2}$$

Работа тока  $A = IUt$ Мощность тока  $P = IU$ Закон Джоуля — Ленца  $Q = I^2 R t$ 

Источник тока



Закон Ома для полной цепи

$$I = \frac{\mathcal{E}}{R + r}$$

Напряжение на полюсах  
источника тока

$$U = \mathcal{E} - Ir$$

Полупроводниковый диод

В полупроводниках  $n$ -типа основные носители заряда —  
*электроны.*В полупроводниках  $p$ -типа основные носители заряда —  
*дырки*Закон Фарадея: масса  $m$  вещества, выделившегося  
на электроде, пропорциональна прошедшему  
через электролит заряду  $q$ :  $m = kq$ Носителями заряда в электролитах являются ионы,  
в газах — электроны и ионы, в вакууме — электроны

# ЛАБОРАТОРНЫЕ РАБОТЫ

## 6. Опытная проверка закона Бойля — Мариотта

**Цель работы:** убедиться на опыте в справедливости закона Бойля — Мариотта.

**Оборудование:** прозрачная трубка с пробкой<sup>1)</sup>, гибкий шланг длиной около 1,5 м, прозрачная воронка, сантиметровая лента, линейка, штатив с двумя лапками, барометр-анероид (один на класс).

### Подготовка к работе

1. Изучите описание работы.
2. Запишите в тетради формулы, используемые в работе (§ 26).

### Описание работы

На рисунке 1, *а* изображена опытная установка. Верхние концы U-образной трубки укреплены в лапках двух стоящих рядом штативов (они не показаны на рисунке).

При открытой трубке в воронку наливают воду так, чтобы в трубке остался столб воздуха высотой 10—12 см. Затем трубку плотно закрывают пробкой. Воронку поднимают на некоторую высоту. При этом высота столба воздуха в левой трубке уменьшается (рис. 1, *б*).

Обозначим  $l_1$  начальную высоту столба воздуха в трубке,  $l_2$  — конечную высоту столба воздуха,  $h$  — результирующую разность уровней воды в трубке и воронке.

Температуру воздуха в закрытой части трубки можно считать постоянной вследствие теплообмена с окружающим воздухом. Поэтому справедлив закон Бойля — Мариотта, согласно которому

$$p_1 V_1 = p_2 V_2.$$

Здесь индексами 1 и 2 обозначены давление и объём воздуха в левой трубке в начальном и конечном состояниях.

<sup>1)</sup> В качестве трубки и воронки можно использовать одноразовые шприцы на 50 мл.

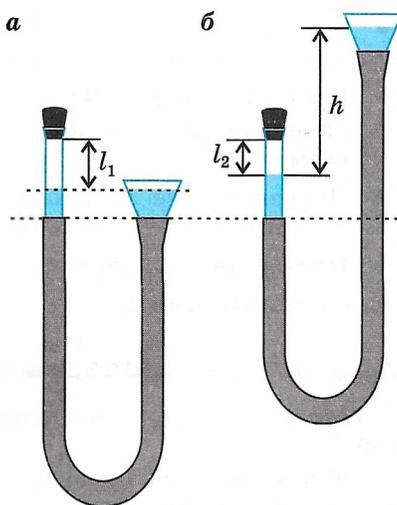


Рис. 1

Объём воздуха в цилиндрической трубке пропорционален высоте столба воздуха, поэтому приведённое выше соотношение можно записать в виде

$$p_1 l_1 = p_2 l_2.$$

В начальном положении давление в трубке равно атмосферному:  $p_1 = p_a$ . В конечном положении давление воздуха в закрытой трубке  $p_2 = p_a + \rho gh$ , где  $\rho$  — плотность воды. Следовательно, должно выполняться соотношение

$$p_a l_1 = (p_a + \rho gh) l_2.$$

### Ход работы

- Определите по барометру-анероиду<sup>1)</sup> атмосферное давление  $p_a$ . Результат (в паскалях) запишите в таблицу, заголовок которой приведён ниже.

| $p_a$ , Па | $l_1$ , м | $l_2$ , м | $h$ , м | $p_a + \rho gh$ , Па |
|------------|-----------|-----------|---------|----------------------|
|------------|-----------|-----------|---------|----------------------|

- Трубку и воронку осторожно закрепите в двух лапках штатива, расположив их как можно ниже<sup>2)</sup>.
- Проведите все необходимые измерения (при измерении  $h$  и  $l_2$  укрепите правый конец шланга с воронкой на максимально возможной высоте). Результаты запишите в таблицу.
- Проведите все необходимые расчёты и запишите результаты в таблицу.
- Проверьте, выполняется ли закон Бойля — Мариотта.
- Запишите вывод.

## 7. Опытная проверка закона Гей-Люссака

**Цель работы:** убедиться на опыте в справедливости закона Гей-Люссака.

**Оборудование:** прозрачная трубка с одним открытым концом<sup>3)</sup>, пробка, термометр, линейка, стаканы с горячей и холодной водой<sup>4)</sup>.

### Подготовка к работе

1. Изучите описание работы.
2. Запишите в тетради формулы, используемые в работе (§ 26).

- 1) Если в классе нет барометра-анероида, можно принять, что значение атмосферного давления равно нормальному атмосферному давлению ( $10^5$  Па).
- 2) Для этого штатив удобно расположить на краю стола.
- 3) Можно использовать пробирку или одноразовый шприц на 20 мл с плотно закрытым (например, пластилином, клеем или воском) отверстием для иглы.
- 4) В качестве холодной можно взять водопроводную воду, а в качестве горячей — воду с температурой примерно  $60^\circ\text{C}$  (более горячая вода может вызвать ожоги).

## Описание работы

Обозначим  $T_1$  и  $T_2$  значения абсолютной температуры в стаканах с горячей и холодной водой соответственно.

Прозрачную трубку опускают почти полностью открытым концом вверх в стакан с горячей водой и ждут 2—3 мин, пока воздух внутри трубки нагреется до температуры  $T_1$  (рис. 2). Затем трубку быстро вынимают и опускают открытым концом вниз в стакан с холодной водой так, чтобы вся трубка была погружена в воду (рис. 3).

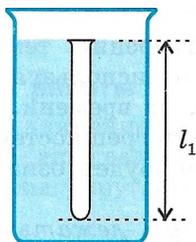


Рис. 2

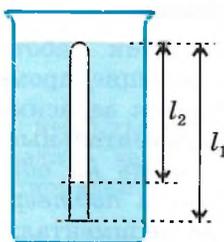


Рис. 3

Изменением давления воздуха в трубке в данном случае можно пренебречь, поэтому справедлив закон Гей-Люссака, согласно которому

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

Здесь индексами 1 и 2 обозначены абсолютная температура и объём воздуха в трубке соответственно в начальном и конечном положениях.

Объём воздуха в цилиндрической трубке пропорционален высоте столба воздуха, поэтому приведённое выше соотношение можно записать в виде

$$\frac{l_1}{T_1} = \frac{l_2}{T_2}.$$

## Ход работы

- Выполните все необходимые измерения и вычисления. Запишите результаты в таблицу, заголовок которой приведён ниже.

| $l_1$ , м | $T_1$ , К | $l_2$ , м | $T_2$ , К | $\frac{l_1}{T_1}$ , $\frac{\text{м}}{\text{К}}$ | $\frac{l_2}{T_2}$ , $\frac{\text{м}}{\text{К}}$ |
|-----------|-----------|-----------|-----------|-------------------------------------------------|-------------------------------------------------|
|           |           |           |           |                                                 |                                                 |

- Проверьте, выполняется ли закон Гей-Люссака.
- Запишите вывод.

## 8. Исследование скорости остывания воды<sup>1)</sup>

**Цель работы:** проверить справедливость гипотезы: «Температура воды при остывании линейно зависит от времени».

**Оборудование:** термометр, сосуд с горячей водой<sup>2)</sup>, часы.

### Подготовка к работе

Изучите описание работы.

### Описание работы

При выполнении работы производят измерения температуры воды через небольшие промежутки времени и, используя эти данные, строят график зависимости температуры от времени.

Если экспериментальные точки (с учётом погрешностей измерений) *будут лежать на одной прямой*, то это будет означать, что указанная гипотеза *подтверждается*.

Если же экспериментальные точки *не будут лежать на одной прямой*, то это будет означать, что опыт *опровергает* гипотезу.

### Ход работы

- В течение 30 мин измеряйте температуру воды в стакане с интервалом 5 мин. Результаты измерений записывайте в таблицу, первые строки которой приведены ниже.

| Время после начала опыта, мин | $t$ , °C |
|-------------------------------|----------|
| 0                             |          |
| 5                             |          |

- Нанесите в тетради на координаты «Время» и «Температура» полученные вами экспериментальные значения.
- Определите: лежат ли экспериментальные точки на одной прямой (с учётом погрешностей измерений)?
- Запишите вывод: подтверждается ли справедливость сформулированной выше гипотезы?

1) Во время выполнения данной лабораторной работы можно, например, обучать школьников решению задач, чтобы не пропало время, требуемое для остывания воды. Удобно поставить таймер, чтобы напоминать ученикам об очередном измерении температуры воды.

2) Температура воды не должна превышать 60 °C.

## \*9. Измерение модуля Юнга

**Цель работы:** определить на опыте модуль Юнга для резины.

**Оборудование:** штатив с муфтой и лапкой, резиновый шнур<sup>1)</sup> длиной 10 см, груз из набора по механике, линейка, штангенциркуль<sup>2)</sup>, динамометр.

### Подготовка к работе

1. Изучите описание работы.

2. Запишите в тетради вывод всех формул, используемых в работе (§ 30).

### Описание работы

Если удлинение резинового шнура в несколько раз меньше его длины, то для резинового шнура справедлив закон Гука, то есть модуль силы упругости  $F$  прямо пропорционален его удлинению  $\Delta l$ :

$$F = k\Delta l, \text{ где } k \text{ — жёсткость шнура.}$$

Жёсткость  $k$  прямо пропорциональна площади  $S$  поперечного сечения шнура и обратно пропорциональна его длине  $l$ . Поэтому

$$F = ES \frac{\Delta l}{l}.$$

Здесь  $E$  — модуль Юнга для резины (он характеризует *вещество*, а не тело). Из последнего уравнения следует, что

$$E = \frac{Fl}{S\Delta l}.$$

### Ход работы

- Руководствуясь описанием работы и используя предложенное оборудование, измерьте все величины, необходимые для определения модуля Юнга резины. Для растяжения резинового шнура используйте груз. Результаты измерений запишите в таблицу, заголовок которой приведён ниже.

| $l, \text{ м}$ | $\Delta l, \text{ м}$ | $F, \text{ Н}$ | $S, \text{ м}^2$ | $E, \text{ Н/м}^2$ |
|----------------|-----------------------|----------------|------------------|--------------------|
|----------------|-----------------------|----------------|------------------|--------------------|

- По результатам измерений найдите модуль Юнга резины. Результат запишите.

1) Можно использовать резиновую полоску.

2) Если в классе нет штангенциркуля или микрометра, то диаметр резинки можно измерить методом рядов.

**\*10. Измерение удельной теплоты плавления льда**

**Цель работы:** измерить удельную теплоту плавления льда и сравнить полученное значение с табличным.

**Оборудование:** калориметр, термометр, стакан с водой комнатной температуры, измерительный цилиндр, кубики льда<sup>1)</sup>, плавающие в сосуде с водой<sup>2)</sup>.

**Подготовка к работе**

1. Изучите описание работы.
2. Запишите в тетради вывод всех формул, используемых в работе (§ 31, 34).

**Описание работы**

Если опустить в калориметр с водой кусок льда при температуре  $0^\circ\text{C}$ , вода начнёт остывать, а лёд — таять. Образовавшаяся из льда вода будет нагреваться, охлаждая при этом уже налитую в калориметр воду.

Обозначим начальную температуру воды в калориметре  $t_{\text{н}}$ , а конечную температуру воды (*в момент, когда весь лёд растает*) обозначим  $t_{\text{к}}$ . Если можно пренебречь тепловыми потерями, уравнение теплового баланса имеет вид

$$m_{\text{л}}\lambda + m_{\text{л}}c_{\text{в}}t_{\text{к}} = m_{\text{н}}c_{\text{в}}(t_{\text{н}} - t_{\text{к}}).$$

Здесь  $\lambda$  — удельная теплота плавления льда,  $m_{\text{л}}$  — масса льда,  $m_{\text{н}}$  — начальная масса воды в калориметре.

Из этого соотношения получаем:

$$\lambda = \frac{c_{\text{в}}[m_{\text{н}}(t_{\text{н}} - t_{\text{к}}) - m_{\text{л}}t_{\text{к}}]}{m_{\text{л}}}.$$

Масса льда  $m_{\text{л}} = m_{\text{к}} - m_{\text{н}}$ , где  $m_{\text{к}}$  — конечная масса воды в калориметре. Поэтому из предыдущего уравнения следует, что

$$\lambda = \frac{c_{\text{в}}(m_{\text{н}}t_{\text{н}} - m_{\text{к}}t_{\text{к}})}{m_{\text{к}} - m_{\text{н}}}.$$

Таким образом, для измерения теплоты плавления льда достаточно измерить начальную и конечную массу воды в калориметре ( $m_{\text{н}}$  и  $m_{\text{к}}$ ), а также начальную и конечную температуру воды ( $t_{\text{н}}$  и  $t_{\text{к}}$ ).

**Ход работы**

**Задание 1.** Измерение удельной теплоты плавления льда

- Руководствуясь описанием работы, измерьте физические величины, необходимые для определения удельной теплоты плавления.

1) Общий объём льда для одного опыта должен быть около  $20\text{ см}^3$ .

2) Кубики льда надо положить в воду заранее, чтобы лёд нагрелся до температуры плавления и начал таять.

ления льда. Начальную массу воды в калориметре возьмите равной 100 г. Конечную массу воды в калориметре можно определить с помощью измерительного цилиндра. Результаты измерений запишите в таблицу, заголовок которой приведён ниже.

| $m_{\text{н}}$ , кг | $t_{\text{н}}$ , °C | $m_{\text{к}}$ , кг | $t_{\text{к}}$ , °C |
|---------------------|---------------------|---------------------|---------------------|
|---------------------|---------------------|---------------------|---------------------|

- По результатам измерений определите значение удельной теплоты плавления льда. Значение удельной теплоёмкости воды возьмите из справочных данных.
- Сравните полученное вами на опыте значение удельной теплоты плавления льда с его значением в справочных данных. Сделайте вывод и запишите его.

#### \*Задание 2. Оценка тепловых потерь

- Оцените количество теплоты, которое отдал своему содержимому внутренний стакан калориметра в процессе установления теплового равновесия. Удельную теплоёмкость вещества, из которого изготовлен внутренний стакан калориметра, вам сообщит учитель<sup>1)</sup>. Подумайте, какие величины надо узнать или измерить для требуемой оценки количества теплоты, и произведите эти измерения.
- Сравните количество теплоты, которое отдал своему содержимому внутренний стакан калориметра в процессе установления теплового равновесия, с количеством теплоты, полученной при охлаждении начальной массы воды в калориметре от начальной температуры до конечной.
- Запишите вывод: обосновано ли предположение о том, что тепловыми потерями в данном опыте можно пренебречь?

## 11. Исследование вольтамперной характеристики лампы накаливания

**Цель работы:** проверить справедливость гипотезы: «Сила тока в лампе накаливания прямо пропорциональна напряжению на ней».

**Оборудование:** источник тока, ключ, лампа накаливания, амперметр, вольтметр, реостат, соединительные провода.

### Подготовка к работе

- Изучите описание работы.
- Запишите в тетради формулы, используемые в работе (§ 40).

1) Удельная теплоёмкость полистирола  $1,4 \frac{\text{кДж}}{\text{кг} \cdot ^\circ\text{C}}$ , удельная теплоёмкость алюминия  $0,9 \frac{\text{кДж}}{\text{кг} \cdot ^\circ\text{C}}$ .

## Описание работы

Удельное сопротивление металлов значительно увеличивается при повышении температуры, поэтому зависимость напряжения от силы тока (вольтамперная характеристика) для металлического проводника может отличаться от прямой пропорциональности, если при увеличении силы тока проводник заметно нагревается. Именно так и происходит в случае лампы накаливания.

Для проверки справедливости указанной выше гипотезы надо изменять силу тока в лампе так, чтобы при этом *заметно изменялся накал нити лампы*. Измеряя при этом значения силы тока в лампе и соответствующие им значения напряжений, строят по экспериментальным точкам график зависимости напряжения от силы тока (вольтамперную характеристику).

Если экспериментальные точки (с учётом погрешностей измерений) будут лежать на одной прямой, проходящей через начало координат ( $I, U$ ), то это будет означать, что опыт подтверждает указанную гипотезу.

Если же экспериментальные точки не будут лежать на одной прямой, проходящей через начало координат ( $I, U$ ), то это будет означать, что опыт опровергает гипотезу.

## Ход работы

### Задание 1. Построение вольтамперной характеристики нити лампы накаливания

- Руководствуясь описанием работы и используя предложенное оборудование, измерьте значения силы тока и напряжения для пяти различных значений силы тока. Подбирая значения силы тока, следите за тем, чтобы накал нити лампы в различных опытах заметно отличался. Запишите результаты измерений в таблицу, заголовок которой приведён ниже.

| № опыта | $I, A$ | $U, B$ | $R, Ом$ |
|---------|--------|--------|---------|
|---------|--------|--------|---------|

- Начертите оси координат для графика  $I(U)$ , выберите удобный масштаб и нанесите на координатную плоскость ( $I, U$ ) полученные вами на опыте значения силы тока и напряжения с учётом погрешностей.
- По экспериментальным точкам постройте примерный вид графика зависимости напряжения на лампе от силы тока в ней (вольтамперную характеристику).
- Найдите значения сопротивления нити накала лампы при измеренных значениях силы тока и напряжения. Запишите результаты в таблицу. Сделайте вывод из сравнения найденных значений сопротивления и запишите его.

**Задание 2. Проверка гипотезы:** «Сила тока в лампе накаливания прямо пропорциональна напряжению на ней»

- По виду построенной вами вольтамперной характеристики для нити лампы накаливания сделайте вывод: подтверждает ваш опыт указанную гипотезу или опровергает её? Запишите вывод.

## 12. Мощность тока в проводниках при последовательном и параллельном соединении

**Цель работы:** сравнить значения мощности тока в двух проводниках при последовательном и параллельном соединении.

**Оборудование:** источник тока<sup>1)</sup>, амперметр, вольтметр, два резистора<sup>2)</sup>, ключ, соединительные провода.

### Подготовка к работе

1. Изучите описание работы.

\*2. Запишите в тетради вывод всех формул, используемых в работе (§ 41).

### Описание работы

Чтобы сравнивать значения мощности тока в двух последовательно соединённых проводниках, используют формулу

$$P = I^2 R,$$

а чтобы сравнивать значения мощности тока в двух параллельно соединённых проводниках, используют формулу

$$P = \frac{U^2}{R}.$$

### Ход работы

**Задание 1. Сравнение значений мощности тока в проводниках при их последовательном соединении**

- Соберите электрическую цепь (рис. 4).
- Руководствуясь описанием работы и используя предоставленное оборудование, измерьте и рассчитайте величины, необходимые для определения мощности тока в двух последовательно

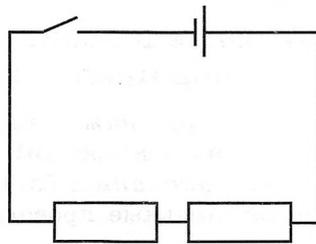


Рис. 4

1) Можно использовать батарейку с  $\mathcal{E} = 4,5$  В.

2) Сопротивления резисторов должны отличаться не менее чем в 2 раза.

соединённых резисторах. Запишите результаты измерений в таблицу, заголовок которой приведён ниже.

| $I$ , А | $R_1$ , Ом | $P_1$ , Вт | $R_2$ , Ом | $P_2$ , Вт | $R_1/R_2$ | $P_1/P_2$ |
|---------|------------|------------|------------|------------|-----------|-----------|
|---------|------------|------------|------------|------------|-----------|-----------|

- Вычислите значения мощности тока в резисторах и сравните отношение значений мощности и сопротивлений резисторов. Сделайте вывод и запишите его.

**Задание 2. Сравнение значений мощности тока в проводниках при их параллельном соединении**

- Соберите электрическую цепь (рис. 5).

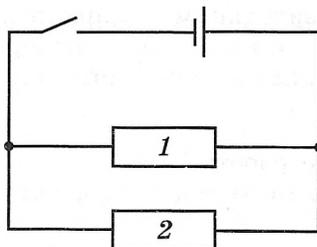


Рис. 5

- Руководствуясь описанием работы и используя предоставленное оборудование, измерьте величины, необходимые для определения мощности тока в двух параллельно соединённых резисторах. Запишите результаты измерений в таблицу, заголовок которой приведён ниже.

| $U$ , В | $R_1$ , Ом | $P_1$ , Вт | $R_2$ , Ом | $P_2$ , Вт | $R_1/R_2$ | $P_1/P_2$ |
|---------|------------|------------|------------|------------|-----------|-----------|
|---------|------------|------------|------------|------------|-----------|-----------|

- Вычислите значения мощности тока в резисторах и сравните отношение значений мощности и сопротивлений резисторов. Сделайте вывод и запишите его.

## 13. Определение ЭДС и внутреннего сопротивления источника тока

**Цель работы:** измерить ЭДС и внутреннее сопротивление источника тока (батарейки).

**Оборудование:** батарейка, амперметр, вольтметр, реостат, ключ, соединительные провода.

### Подготовка к работе

1. Изучите описание работы.
- \*2. Запишите в тетради вывод всех формул, используемых в работе (§ 42).

### Описание работы

Из закона Ома для полной цепи следует, что напряжение  $U$  на полюсах источника тока связано с ЭДС источника  $\mathcal{E}$ , силой тока в цепи  $I$  и внутренним сопротивлением источника  $r$  соотношением

$$U = \mathcal{E} - Ir.$$

Отсюда следует, что график зависимости  $U(I)$  имеет вид, показанный на рисунке 6. Найдя точки пересечения графика с осями координат, можно определить значения  $\mathcal{E}$  и  $r$ .

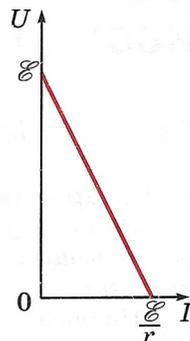


Рис. 6

### Ход работы

- Соберите электрическую цепь (рис. 7).

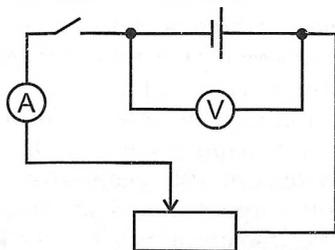


Рис. 7

- Измерьте силу тока в цепи и напряжение на полюсах источника при нескольких положениях ползунка реостата (сделайте три измерения). Результаты измерений запишите в таблицу, заголовков которой приведён ниже.

| $I, A$ | $U, B$ |
|--------|--------|
|--------|--------|

- Нанесите полученные на опыте точки с учётом погрешностей на координатную плоскость ( $I, U$ ), выбрав удобный масштаб.
- Используя прозрачную линейку, проведите через отмеченные точки с учётом погрешностей прямую так, чтобы отклонения точек от этой прямой были наименьшими.
- По точкам пересечения проведённой прямой с осями координат определите значения  $\mathcal{E}$  и  $r$ . Запишите полученные результаты.
- Проверьте: совпадает ли полученное вами значение ЭДС источника с показаниями вольтметра при разомкнутых полюсах источника. Сделайте соответствующий вывод.

# ЗАДАНИЯ ДЛЯ ПРОЕКТНО-ИССЛЕДОВАТЕЛЬСКОЙ ДЕЯТЕЛЬНОСТИ

## Глава V. Молекулярная физика

### 1. Сахар в аморфном и кристаллическом состоянии

*Цель: изучить на примере сахара условия, влияющие на переход вещества из жидкого в кристаллическое или аморфное состояние.*

Найдите в Интернете рекомендации по выращиванию крупных кристаллов сахара и вырастите такие кристаллы. Сфотографируйте их.

Насыпьте сахарный песок в половник и подержите его над слабым огнём. Когда весь сахар расплавится, вылейте его на холодную мелкую тарелку, смазанную тонким слоем сливочного масла. Когда расплав остынет, он превратится в леденец (довольно вкусный). Но прежде чем его съесть, поставьте с ним некоторые опыты.

Расколите выращенный вами кристалл и полученный леденец. Рассмотрите сколы кристалла и леденца с помощью лупы. Если сможете, сфотографируйте или зарисуйте их. Опишите различия, которые вы наблюдали. Объясните эти различия, а также то, почему в первом случае образовался кристалл, а во втором — аморфное тело.

Найдите в Интернете информацию о способах получения металлов в аморфном состоянии. Опишите необычные свойства таких металлов.

### 2. Опреснение воды замораживанием

*Цель: исследовать возможность опреснения воды замораживанием.*

В пол-литровой банке питьевой воды растворите половину чайной ложки соли. Налейте часть соляного раствора в пластиковый стакан, а оставшуюся воду не выливайте из банки — она понадобится в конце опыта.

Вырежьте в поролоновой губке углубление под стакан на половину её высоты. Стакан должен входить в углубление без зазора.

Стакан с соляным раствором на сделанной вами подставке поместите в морозильную камеру холодильника. Через каждый час смотрите, какая часть воды замёрзла. Когда замёрзнет примерно одна треть раствора (лёд будет сверху), выньте стакан из морозильной камеры.

Аккуратно выньте лёд и положите его в тарелку, подождите примерно 5 мин, пока лёд слегка подтает. Слейте образовавшуюся воду, после чего положите лёд в пустой стакан и подождите, пока он полностью растает и нагреется до комнатной температуры.

Сравните теперь солёность оставленного в банке соляного раствора и воды, образовавшейся из льда. Сделайте вывод и опишите его. Найдите в Интернете объяснение обнаруженному вами явлению, а также информацию о применении этого способа опреснения воды.

### 3. Очистка воды замораживанием

*Цель: исследовать возможность очистки воды замораживанием.*

В пол-литровую банку воды капните несколько капель чёрной туши и хорошо перемешайте воду.

Налейте часть загрязнённой воды в пластиковый стакан. Оставшаяся в банке вода понадобится в конце опыта.

Вырежьте в поролоновой губке углубление под стакан на половину её высоты. Стакан должен входить в углубление без зазора.

Стакан с загрязнённой водой на сделанной вами подставке поместите в морозильную камеру холодильника. Через каждый час смотрите, какая часть воды замёрзла. Когда замёрзнет примерно одна треть раствора (лёд будет вверху), выньте стакан из морозильной камеры.

Аккуратно выньте лёд и положите его на тарелку (рис. 1).

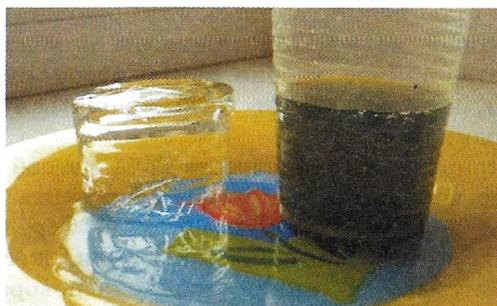


Рис. 1

Сделайте вывод и запишите его. Найдите в Интернете объяснение обнаруженному вами явлению, а также применение очистки воды замораживанием.

### 4. Волосной гигрометр

*Цель: изготовить волосной гигрометр.*

Принцип действия волосного гигрометра основан на увеличении длины волоса при увеличении влажности.

На рисунке 2 изображена схема устройства гигрометра. В качестве основы, на которой можно разместить детали гигрометра, возьмите пластину ламината, лист фанеры или толстого картона размером примерно 40 × 10 см.

Для эксперимента возьмите жёсткий волос (если есть возможность, лучше использовать конский) длиной не менее 50 см. Волос необходимо обезжирить (например, ацетоном).

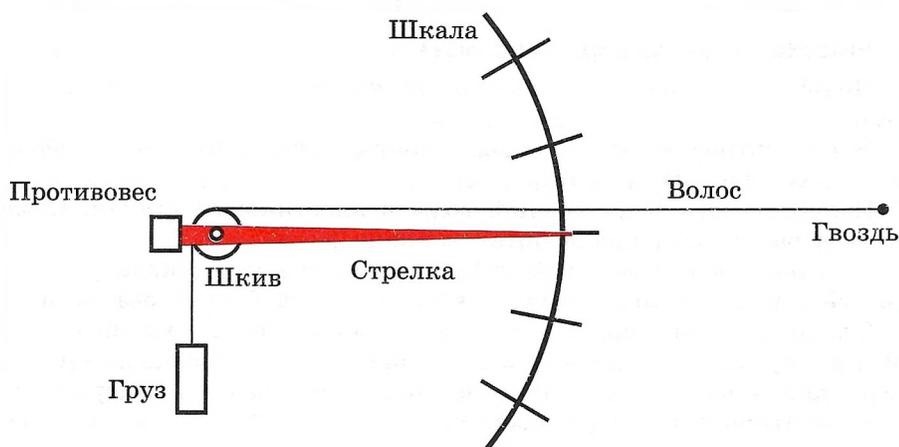


Рис. 2

На пластине (она лежит в плоскости рисунка) закреплена ось шкива и один конец волоса (он привязан к вбитому в пластину гвоздю). В качестве шкива удобно взять кусок пустой ампулы от шариковой ручки, который может легко вращаться вокруг оси (другого вбитого гвоздика).

Ко второму концу волоса подвесьте груз массой 20—50 г. Волос один раз оберните вокруг шкива, чтобы обеспечить достаточно большую силу трения между волосом и шкивом. Стрелку (длиной около 10—15 см) можно изготовить из проволоки, жести или картона. Плотнo насадите стрелку на шкив, чтобы она поворачивалась вместе с ним. На короткий широкий конец стрелки в качестве противовеса прилепите кусочек пластилина, подобрав его массу так, чтобы стрелка находилась в безразличном равновесии.

Изготовленный гигрометр проградуируйте с помощью школьного психрометра. Проведите измерения влажности воздуха утром, днём и вечером в течение недели. Найдите в Интернете информацию о значимости влажности воздуха для человека, растений, техники, произведений живописи.

## Глава VIII. Постоянный электрический ток

### 1. Химическое действие тока

Цель: исследовать на опыте явление электролиза.

Приготовьте пол-литра 10%-го раствора медного купороса (его можно купить в магазине химреактивов, химикатов или в магазине

для садовых). Из использованных батареек<sup>1)</sup> аккуратно извлеките два угольных стержня с металлическими колпачками — они будут играть роль электродов.

Приготовьте пол-литровую банку с полиэтиленовой крышкой. Сделайте в крышке два отверстия, в которые должны плотно войти электроды, чтобы они надёжно держались в крышке. Соедините электроды с полюсами новой плоской батарейки, подключив последовательно с ними лампочку от карманного фонаря (она будет указывать на наличие тока и ограничивать силу тока).

Пропускайте ток через электролит 15 мин. Разомкните цепь, выньте электроды из банки и промойте их водой.

Опишите, какие изменения произошли с электродами. Сделайте фотографию. Объясните результаты своего опыта.

Для второго опыта измените полярность подключения электродов. Половину покрытого слоем меди электрода плотно заклейте прозрачным скотчем. Повторите опыт, уменьшив его продолжительность до 10 мин. Объясните полученный результат.

---

<sup>1)</sup> Удобнее всего взять стержни из плоской батарейки (в одной батарейке три стержня). О наличии угольных стержней в данном типе батареек можно узнать в Интернете.

## ПОЛЕЗНЫЕ СОВЕТЫ

### Глава V

§ 25. 7. В одном моле *любого* вещества содержится *одно и то же* число молекул. 8. Вспомните химическую формулу воды и учтите, что водород и кислород — двухатомные газы. 15. Учтите, что молекулы водорода и кислорода — двухатомные. 17. Подставьте в соотношение  $m = \nu M$  значение  $\nu = 1$ . 19. г) Найдите, какому количеству вещества соответствует найденная масса воды. 21. а) Найдите с помощью таблицы Менделеева молярную массу поваренной соли (NaCl). 24. Учтите, что размер видимых глазом пылинок намного превышает размер молекул. 27. Воспользуйтесь табли-

цей Менделеева. 28. Воспользуйтесь формулами  $\nu = \frac{m}{M}$ ;  $\nu = \frac{N}{N_A}$ ;  $m = m_0 N$ .

32. Найдите массу вещества, воспользуйтесь таблицей Менделеева и выражением для расчёта количества вещества. 33. В одной молекуле азота содержится два атома, в одной молекуле углекислого газа содержится три атома. 36. Численность населения Земли можно узнать с помощью Интернета. 37. Для оценки примите, что каждый атом «занимает» ячейку кубической формы, причём все атомы расположены вплотную друг к другу.

§ 26. 7. Например: а) во сколько раз увеличилось значение *абсолютной* температуры газа; б) во сколько раз увеличился объём газа? При построении графиков зависимости  $p(V)$  и  $p(T)$  учтите, что по условию данная масса газа расширяется *изобарно*. 10. Например: а) во сколько раз уменьшилась абсолютная температура газа; б) во сколько раз уменьшилось давление газа? 14. а) По графику видно, что ни объём, ни температура газа не остаются постоянными. А чтобы выяснить, остаётся ли постоянным давление газа, определите, лежат ли все точки графика *на одной изобаре*. г) При постоянной температуре объём газа *уменьшался*. д) При постоянном объёме температура газа *увеличивалась*. 15. Например: а) как изменилась температура газа при данном переходе; б) как изменилось давление газа при данном переходе; в) как изменился объём газа при данном переходе? 16. Например: а) как изменился объём газа при данном переходе; б) как изменилось давление газа при данном переходе; в) как изменилась температура газа при данном переходе? 17. в) Не забудьте перевести начальную температуру газа в кельвины. 18. Обратите внимание на то, что сосуд закрытый, значит, объём газа при нагревании не изменится. 20. В данном случае процесс перехода воздуха из состояния 1 в состояние 2 происходит при постоянной температуре. 21. Сначала определите, какие изопроцессы изображены на участках 1—2 и 2—3 графика. 22. Сначала определите, какие изопроцессы изображены на участках 1—2 и 2—3 графика. 23. Воспользуйтесь законом Гей-Люссака и учтите, что изменение температуры на один градус по шкале Кельвина равно изменению температуры тоже на один градус по шкале Цельсия. 24. Воспользуйтесь законом Шарля. 27. Давление на начальной глубине равно сумме гидростатического давления и давления атмосферы. 29. Проведите через каждую из точек 1, 2, 3 и 4 изохору. 30. Проведите через каждую из точек 1, 2, 3 и 4 изобару. 31. Докажите, что точке 1 соответ-

ствуется наименьшее давление, а точке 3 — наибольшее. 33. Воспользуйтесь тем, что каждый из четырёх этапов представляет собой изобарный или изохорный процесс, для которого легко определить, как изменялась температура. 34. Докажите, что в процессе 1—2 температура повышается во столько же раз, во сколько раз она понижается в процессе 3—4.

§ 27. 1. Рассмотрите уравнение Клапейрона при условии, что один из параметров газа ( $p$ ,  $V$  или  $T$ ) остаётся постоянным. 3. Воспользуйтесь уравнением Клапейрона. 4. б) Согласно условию поршень *лёгкий* — это означает, что его массой можно пренебречь. Когда на поршень поставили гирию массой  $m$ , сила внешнего давления на газ в сосуде увеличилась на  $mg$ . Чтобы в конечном состоянии поршень находился в равновесии, давление газа в сосуде должно увеличиться так, чтобы сила давления газа на поршень стала равной возросшей силе внешнего давления. в) Воспользуйтесь уравнением Клапейрона и известными отношениями давления и температуры газа в двух рассматриваемых состояниях. 5. Например: а) чему равны начальное давление газа и его начальная температура по шкале Кельвина; б) чему равно отношение конечной абсолютной температуры газа к начальной; в) чему равна конечная температура газа по шкале Кельвина и Цельсия? 6. б) Введите обозначения для величин, которые остаются постоянными. в) Чтобы получить соотношение, в которое

входят только  $p$  и  $T$ , умножьте уравнение  $\frac{p}{V} = a$  на уравнение  $\frac{pV}{T} = c$ .

Чтобы получить соотношение, в которое входят только  $V$  и  $T$ , разделите уравнение  $\frac{p}{V} = a$  на уравнение  $\frac{pV}{T} = c$ . г) Воспользуйтесь соотношением

$\frac{p^2}{T} = b$ . 7. Введите обозначение для постоянной величины — произведения

давления на абсолютную температуру. 8. Например: а) какое соотношение между  $p$  и  $V$  справедливо для данного процесса; б) какое соотношение между  $p$  и  $T$  справедливо для данного процесса; в) как изменится давление газа, если его объём увеличится в 2 раза; г) как изменится давление газа, если его абсолютную температуру уменьшить в 2 раза? 9. Число молекул  $N$  в данном образце газа связано с количеством вещества  $\nu$  и постоянной Авогадро  $N_A$  соотношением  $N = \nu N_A$ . 10. Количество вещества  $\nu$  можно выразить через массу газа  $m$  и его молярную массу  $M$  с помощью соотношения  $\nu = \frac{m}{M}$ . 12. По условию поршень *подвижный* —

следовательно, *давления газов равны*. Кроме того, поршень *металлический*, а металлы обладают хорошей теплопроводностью. Значит, *температуры газов тоже равны*. Запишите уравнение Менделеева — Клапейрона для водорода и кислорода и учтите, какие параметры газов одинаковы. 13. Воспользуйтесь уравнением Менделеева — Клапейрона и определением

плотности  $\rho = \frac{m}{V}$ . 15. Воспользуйтесь уравнением  $\frac{pV}{T} = kN$  и определением

концентрации молекул. 16. Воспользуйтесь формулой  $p = nkT$ . 17. Например: а) чему равна молярная масса газа; б) какой это может быть газ? 18. Например: а) как изменилось количество вещества в газе;

б) как изменился объём газа? **20.** Например: а) чему равно парциальное давление кислорода; б) чему равно парциальное давление гелия; в) чему равно давление смеси газов? **21.** Воспользуйтесь уравнением Клапейрона. **22.** Воспользуйтесь уравнением Клапейрона. **23.** Воспользуйтесь уравнением Клапейрона. **24.** Переведите температуру воздуха в кельвины и воспользуйтесь уравнением Менделеева — Клапейрона. **26.** Воспользуйтесь уравнением Менделеева — Клапейрона и учтите, что  $v = \frac{m}{M}$ . **27.** Воспользуйтесь уравнением Менделеева — Клапейрона и учтите, что  $m = \rho V$ . Учтите, что молекула кислорода состоит из двух атомов. **29.** Воспользуйтесь законом Дальтона. **31.** Воспользуйтесь уравнением Клапейрона. **32.** Запишите уравнение Менделеева — Клапейрона для обоих случаев. Разделите одно уравнение на другое. **34.** Поскольку сосуд открытый, давление газа в нём не изменяется. **35.** Процесс происходит при постоянном давлении. **36.** Воспользуйтесь уравнением Менделеева — Клапейрона и учтите, что поршень находится в равновесии, когда давления в верхней и нижней частях сосуда равны. **37.** Среднее расстояние между центрами молекул равно корню кубическому из объёма, приходящегося на одну молекулу.

§ 28. 1. Средняя кинетическая энергия молекулы  $\bar{E}$  связана со средним квадратом её скорости  $\bar{v}^2$  соотношением  $\bar{E} = \frac{m_0 \bar{v}^2}{2}$ . **5.** Перепишите формулу  $\bar{E} = \frac{3}{2} kT$  в виде  $\frac{m_0 \bar{v}^2}{2} = \frac{3}{2} kT$ . **6.** Воспользуйтесь соотношениями  $k = \frac{R}{N_A}$  и  $m_0 N_A = M$ . **8.** Воспользуйтесь формулами:  $p = \frac{1}{3} n m_0 \bar{v}^2$ ;  $m_0 = \frac{m}{N}$ ;  $n = \frac{N}{V}$ ;  $\rho = \frac{m}{V}$ . **9.** Воспользуйтесь формулой  $\bar{v} = \sqrt{\frac{3p}{\rho}}$ . **13.** Учтите, что уда-

рится о стенку за время  $\Delta t$  сможет только половина всех молекул, находящихся в слое толщиной  $v_x \Delta t$  вблизи стенки, потому что со стенкой столкнутся только молекулы, которые движутся к стенке, а к стенке и от неё летит примерно одинаковое число молекул. **14.** Учтите, что перед ударом проекция скорости молекулы равна  $v_x$ , а после удара она равна  $-v_x$  (молекула летит от стенки). **15.** Найдите, чему была бы равна в этом случае передача импульса одной молекулой. **21.** Воспользуйтесь формулой, связывающей давление газа с его концентрацией и средней кинетической энергией поступательного движения молекул. **24.** Учтите, что давление газа в открытом сосуде не изменяется. **25.** При установившемся давлении воздуха в баллоне число молекул воздуха, вылетающих за некоторое время через малое отверстие из баллона, равно числу молекул, влетающих через это же отверстие из окружающего воздуха в баллон. **27.** а) Воспользуйтесь формулой для среднеквадратичной скорости молекул газа. б) Учтите, что средние кинетические энергии молекул разных газов при одной и той же температуре одинаковы.

§ 29. 1. Не забудьте об облаках и тумане. 2. а) Воспользуйтесь приведённой в тексте параграфа таблицей значений давления насыщенного пара при различных температурах. б) Воспользуйтесь уравнением Менделеева — Клапейрона (не забудьте выразить температуру по шкале Кельвина). Молярная масса водяного пара равна молярной массе воды. 11. б) Воспользуйтесь данными из условия об относительной влажности воздуха в комнате и таблицей зависимости давления насыщенного пара от температуры. в) Воспользуйтесь таблицей зависимости давления насыщенного пара от температуры. г) Учтите, что в воздухе, прилегающем к стёклам очков, началась конденсация водяного пара. Температуру прилегающего к стёклам воздуха можно приближённо считать равной температуре стёкол. 13. Воспользуйтесь уравнением Менделеева — Клапейрона. 15. Воспользуйтесь психрометрической таблицей. 16. Воспользуйтесь таблицей зависимости давления насыщенного водяного пара от температуры. 17. Воспользуйтесь таблицей зависимости давления насыщенного водяного пара от температуры. 18. Используя таблицу зависимости давления насыщенного водяного пара от температуры, найдите давление насыщенного водяного пара при  $30\text{ }^{\circ}\text{C}$  и  $50\text{ }^{\circ}\text{C}$ . 19. Воспользуйтесь таблицей зависимости давления насыщенного водяного пара от температуры. 20. Определите, при какой температуре водяной пар становится насыщенным. 21. Давление водяного пара при  $100\text{ }^{\circ}\text{C}$  равно нормальному атмосферному давлению. Найдите объём, занимаемый водяным паром, и воспользуйтесь уравнением Менделеева — Клапейрона. 22. Воспользуйтесь таблицей зависимости давления насыщенного водяного пара от температуры и формулой  $p = nkT$ . 23. Воспользуйтесь таблицей зависимости давления насыщенного водяного пара от температуры и уравнением Менделеева — Клапейрона. 24. Давление насыщенного пара зависит только от его температуры. 25. Воспользуйтесь таблицей зависимости давления насыщенного водяного пара от температуры и уравнением Менделеева — Клапейрона. 26. Учтите, что водяной пар в сосуде стал насыщенным. 27. Используя уравнение Менделеева — Клапейрона выясните, вся ли вода испарится. Учтите, что сосуд закрытый, значит, процесс можно считать изохорным. Давление влажного воздуха равно сумме парциальных давлений сухого воздуха и водяного пара. 28. Воспользуйтесь уравнением Менделеева — Клапейрона и таблицей зависимости давления насыщенного водяного пара от температуры. 29. Конденсация пара начнётся тогда, когда давление пара в сосуде станет равно давлению насыщенного пара. Воспользуйтесь таблицей зависимости давления насыщенного водяного пара от температуры и уравнением Менделеева — Клапейрона. 30. Определите массу водяного пара, содержащегося в воздухе помещения, а также массу водяного пара в забираемом снаружи таком же объёме воздуха.

§ 30. 6. Воспользуйтесь определением механического напряжения. 8. Воспользуйтесь формулами:  $F = ES \frac{\Delta l}{l}$ ,  $\sigma = \frac{F}{S}$  и  $\varepsilon = \frac{\Delta l}{l}$ . 10. б) Воспользуйтесь формулой  $\sigma = E\varepsilon$ . 12. Воспользуйтесь формулой для расчёта механического напряжения и учтите, что сечение стержня имеет форму круга.

## Глава VI

§ 31. 4. Учтите, что абсолютная температура газа пропорциональна его внутренней энергии. 6. Воспользуйтесь первым началом термодинамики и тем, что в адиабатном процессе  $Q = 0$ . 7. При адиабатном расширении температура газа уменьшается, поэтому при одном и том же объёме давление газа будет меньше, чем в изотермическом процессе. 8. Внутренняя энергия данной массы газа зависит только от температуры. 11. Воспользуйтесь первым законом термодинамики. 16. Внутренняя энергия данной массы газа зависит только от температуры. 17. При изобарном нагревании газ расширяется, а при изобарном охлаждении — сжимается. 18. Воспользуйтесь первым законом термодинамики. 19. Воспользуйтесь определением адиабатного процесса. 22. Внутренняя энергия данной массы газа при адиабатном расширении уменьшается, а при адиабатном сжатии увеличивается. 23. Воспользуйтесь формулой  $Q = cm(t_{\text{к}} - t_{\text{н}})$ . 24. Учтите, что горячая вода отдаёт такое же количество теплоты, какое холодная вода получает. 26. Воспользуйтесь первым законом термодинамики. 27. Воспользуйтесь первым законом термодинамики. 28. Воспользуйтесь первым законом термодинамики. 29. Воспользуйтесь первым законом термодинамики. 30. Определите, изменилась ли внутренняя энергия газа. 31. Определите, чему равна работа газа. 32. Учтите, что при изохорном процессе работа газа равна нулю. 33. Воспользуйтесь первым законом термодинамики. 34. Составьте уравнение теплового баланса. 35. Найдите объём воды, проходящей через поперечное сечение трубы за 1 с.

§ 32. 1. Воспользуйтесь формулами  $N = \nu N_A$ ,  $kN_A = R$ . 2. Гелий — одноатомный газ. 3. а) Воспользуйтесь формулой для изменения внутренней энергии. 4. Воспользуйтесь уравнением Менделеева — Клапейрона. 5. При изобарном процессе давление газа не изменяется, поэтому в данном случае  $\Delta(pV) = p_0\Delta V = p_0(3V_0 - V_0) = 2p_0V_0$ . 6. При изохорном процессе объём газа не изменяется, поэтому  $\Delta(pV) = V\Delta p$ . Учтите, что аргон — одноатомный газ. 7. а) Давление газа равно сумме внешнего давления и давления, оказываемого поршнем. в) Криптон — одноатомный газ. Воспользуйтесь формулой  $\Delta U = \frac{3}{2}(p_2V_2 - p_1V_1)$ . 8. Воспользуйтесь формулой  $U = \frac{5}{2}pV$ . 9. Обозначьте площадь поршня  $S$ , а его смещение  $\Delta x$ . Тогда сила давления газа  $F = pS$ , работа газа  $A_{\text{г}} = F \cdot \Delta x$ , а изменение объёма газа  $\Delta V = S \cdot \Delta x$ . 11. а) По графику видно, что объём газа прямо пропорционален абсолютной температуре газа — следовательно, это *изобарный* процесс. Воспользуйтесь уравнением Менделеева — Клапейрона. б) Воспользуйтесь формулой  $\Delta U = \frac{3}{2}\nu R\Delta T$ . в) Воспользуйтесь первым законом термодинамики. 12. а) Воспользуйтесь тем, что работа газа при расширении равна площади фигуры под графиком  $p(V)$ . б) Воспользуйтесь тем, что начальное состояние газа, как и конечное, при обоих способах перехода одно и то же. 13. Воспользуйтесь первым законом термодинамики. 14. Этапы цикла представляют собой изохорные и изобарные процессы. Воспользуйтесь первым законом термодинамики. 15. а) Воспользуйтесь

тем, что при адиабатном расширении температура газа понижается, а при адиабатном сжатии — повышается. б) Газ совершает положительную работу при *любом расширении* и отрицательную — при *любом сжатии*. в) Воспользуйтесь определением адиабатного процесса и первым законом термодинамики. 16. а) При изотермическом процессе температура не изменяется. б) Воспользуйтесь уравнением Менделеева — Клапейрона. д) Учтите, что в адиабатном процессе  $Q = 0$ , воспользуйтесь первым законом термодинамики и выражением для изменения внутренней энергии газа. е) Учтите, что в изотермическом процессе внутренняя энергия газа не изменяется, и воспользуйтесь первым законом термодинамики. 19. Учтите, что работа газа численно равна площади фигуры под графиком зависимости давления от объёма. Обратите внимание на единицы физических величин. 20. Процесс, происходящий с газом, — изохорный. 22. Гелий и аргон — одноатомные газы. Внутренняя энергия смеси газов равна сумме внутренних энергий каждого из газов. 23. Выразите значения температуры по шкале Кельвина. Найдите отношение увеличения внутренней энергии газа к внутренней энергии газа в начальном состоянии. 24. Процесс, происходящий с газом, — изохорный. 25. Учтите, что работа газа численно равна площади фигуры под графиком зависимости давления от объёма. Обратите внимание на единицы физических величин. 26. Изобразите график данного процесса в координатах ( $p, V$ ) и учтите, что работа газа равна площади фигуры под этим графиком. 27. Учтите, что температура газа при изобарном процессе увеличивается во столько же раз, во сколько раз увеличивается объём газа. Воспользуйтесь уравнением Менделеева — Клапейрона. 28. Запишите систему уравнений, первое из которых справедливо только для *данного* процесса, второе представляет собой уравнение Клапейрона, а третье — изменение внутренней энергии одноатомного газа. 29. Запишите первый закон термодинамики для изобарного нагревания, а также выражения для изменения внутренней энергии и работы газа через изменение температуры. 30. Запишите первое начало термодинамики для процесса 2—3. Воспользуйтесь клеточным фоном, чтобы найти соотношения между объёмами, а также температурами газа в различных состояниях. 31. Воспользуйтесь первым законом термодинамики для изобарного нагревания и изохорного нагревания. 32. Воспользуйтесь первым законом термодинамики и уравнением Менделеева — Клапейрона, чтобы связать значения работы внешних сил в двух процессах. 33. Воспользуйтесь тем, что давление насыщенного пара остаётся постоянным, а также уравнением Менделеева — Клапейрона. Учтите, что при сжатии работа газа отрицательна.

§ 33. 1. Воспользуйтесь выражением для полезной работы теплового двигателя через количество теплоты, полученное рабочим телом от нагревателя, и количество теплоты, отданное рабочим телом охладителю. 3. Выразите приведённые значения температуры по шкале Кельвина. 4. б) Воспользуйтесь тем, что работа газа численно равна площади фигуры под графиком зависимости  $p(V)$ . в) Воспользуйтесь первым законом термодинамики и выражением для внутренней энергии одноатомного газа через его давление и объём. г) Полезная работа газа равна площади фигуры, заключённой внутри графика цикла в координатах ( $p, V$ ). 8. Переведите значение температуры из шкалы Цельсия в шкалу Кельвина. 13. Воспользуйтесь выражением для КПД теплового двигателя через количество теплоты, полученное от нагревателя, и количество теплоты, отданное охладителю.

14. Переведите значение скорости в единицы СИ. Двигатель самолёта совершает полезную работу за счёт количества теплоты, выделяющегося при сгорании керосина. 15. а) Учтите, что работа газа численно равна площади фигуры под графиком зависимости  $p(V)$ . б) Воспользуйтесь первым законом термодинамики и выражением для внутренней энергии одноатомного газа через его давление и объём. 16. Полезная работа газа равна площади фигуры, заключённой внутри графика цикла в координатах  $(p, V)$ . Воспользуйтесь первым законом термодинамики и выражением для внутренней энергии одноатомного газа через его давление и объём. 19. Определите, в каком из процессов газ получает количество теплоты, а в каком — отдаёт. Работа, совершённая рабочим телом за цикл, равна разности работ в изотермическом и адиабатном процессах. 20. Газ отдаёт некоторое количество теплоты охладителю на участке 2—3.

\*§ 34. 5. а) Воспользуйтесь тем, что для нагревания образца на 10 градусов ему надо сообщить количество теплоты, равное 21 кДж. в) Определите по графику, какое количество теплоты надо сообщить образцу, взятому при температуре плавления, для полного плавления образца. г) Определите по графику количество теплоты, которое надо сообщить данному образцу для нагревания на 50 градусов. 11. При конденсации пара выделяется большое количество теплоты. 15. Прежде всего надо выяснить: сконденсируется ли весь водяной пар, который впустили в калориметр? Учтите, что после того, как водяной пар сконденсируется, образовавшаяся из него вода должна остыть до конечной температуры, отдав некоторое количество теплоты воде, уже содержащейся в калориметре. 16. Запишите уравнение теплового баланса с учётом того, что объём алюминиевого куба равен объёму растаявшего льда. 17. Вода в калориметре образуется из имевшегося там льда и поступающего пара. 20. Учтите, что снег сначала надо нагреть до температуры таяния льда. Удельная теплоёмкость снега равна удельной теплоёмкости льда. 21. Выясните, каким будет агрегатное состояние вещества, содержащегося в калориметре. 23. Учтите, что мокрый снег представляет собой смесь воды и льда при температуре 0 °С. В процессе установления теплового равновесия нагреваться будет вода, которая образуется изо льда, а также вода, содержащаяся в мокром снеге.

## Глава VII

§ 35. 7. Учтите перераспределение заряда в гильзе В. 8. а) Найдите молярную массу воды. б) Число электронов в атоме равно его порядковому номеру в таблице Менделеева. 12. а) Воспользуйтесь законом Кулона. б) Сравните силы, действующие на третий шарик со стороны первых двух при отклонении третьего шарика вдоль стержня от положения равновесия. 15. б) После соприкосновения заряды шариков станут равными. Воспользуйтесь законом сохранения электрического заряда. 17. Воспользуйтесь третьим законом Ньютона. 19. Вспомните о перераспределении свободных электрических зарядов в гильзе под действием заряженной палочки. Учтите знак заряда обеих палочек. 20. Учтите электризацию через влияние. 21. Часть электронов перейдёт с палочки на сферу. 22. а) Так как отклонение стрелки уменьшилось, то уменьшился заряд на стержне и стрелке. Значит, часть заряда перетекла на сферу электрометра вследствие притяжения к палочке. 24. Воспользуйтесь законом сохранения электрического заряда. 25. Воспользуйтесь законом Кулона. 26. Воспользуйтесь законом Кулона. 27. Воспользуйтесь законом Кулона. 30. Шарик, коснувшись

любой пластины, приобретает часть заряда этой пластины. **31.** Воспользуйтесь законом Кулона. **32.** Найдите равнодействующую сил, действующих на заряд, помещённый в центр квадрата, со стороны зарядов, помещённых в его вершины. Учтите знаки зарядов. **33.** Сила, действующая на заряд, помещённый в точку  $A$ , является *равнодействующей* сил, действующих на этот заряд со стороны зарядов, помещённых в точки  $B$  и  $C$ . **34.** Сделайте в тетради рисунок с указанием всех сил, действующих на шарик, подвешенный на нити. Воспользуйтесь вторым законом Ньютона и законом Кулона. **35.** Необходимо воспользоваться электризацией через влияние. **36.** Учтите электризацию через влияние и перераспределение зарядов. **37.** Воспользуйтесь законом Кулона. **38.** Найдите все ответы! **39.** Изобразите силы, действующие на каждый шарик, и воспользуйтесь законами Ньютона.

**§ 36. 1.** Воспользуйтесь формулой  $\vec{F} = q\vec{E}$ . **4.** Воспользуйтесь законом Кулона и определением напряжённости поля. **7. в)** Воспользуйтесь принципом суперпозиции полей и учтите направления напряжённости поля, созданного каждым из зарядов в данной точке. **8. в)** Воспользуйтесь принципом суперпозиции полей и учтите направления напряжённости поля, созданного каждым из зарядов в данной точке. **9. а)** Воспользуйтесь принципом суперпозиции полей. **б)** Воспользуйтесь выражением для напряжённости поля точечного заряда и теоремой Пифагора. **в)** Воспользуйтесь подобием треугольников. **10. а)** Напряжённость поля, созданного обоими зарядами в точке  $A$ , перпендикулярна серединному перпендикуляру. **13.** Если бы линии напряжённости пересекались, то в точке их пересечения направление напряжённости поля не было бы определено. **16. в)** Эта точка находится на расстоянии  $3$  см от точечного заряда на той же линии напряжённости однородного поля, на которой находится заряд. **19. б)** Воспользуйтесь тем, что вне равномерно заряженной сферы созданное ею поле совпадает с полем точечного заряда, равного суммарному заряду сферы и расположенного *в центре сферы*. **20. б)** Учтите, что вне сферы векторы напряжённости поля, созданного точечным зарядом, и поля, созданного равномерно заряженной сферой, направлены противоположно. **21.** На *отрицательный* заряд действует сила, направление которой *противоположно* направлению напряжённости поля. **23.** Воспользуйтесь принципом суперпозиции полей. **24.** Воспользуйтесь принципом суперпозиции полей. **25.** Воспользуйтесь вторым законом Ньютона. **26.** Учтите, что внутри сферы электрического поля нет. Вне сферы это поле совпадает с полем точечного заряда, равного суммарному заряду сферы и расположенного в центре сферы. **27.** Воспользуйтесь вторым законом Ньютона. **28.** Воспользуйтесь принципом суперпозиции полей. **29. б)** Задача имеет два решения. **в)** Задача имеет два решения. **30.** Изобразите на чертеже положение равновесия шарика и силы, действующие на него. **31.** Сделайте схематический рисунок и укажите на нём все силы, действующие на капельку. Воспользуйтесь первым условием равновесия. **32.** Воспользуйтесь принципом суперпозиции полей. **33.** Сделайте схематический рисунок и воспользуйтесь принципом суперпозиции полей. **34.** Сделайте схематический рисунок, воспользуйтесь принципом суперпозиции полей и теоремой Пифагора. **35.** Воспользуйтесь принципом суперпозиции полей и клеточным фоном, чтобы найти направления и сравнить модули напряжённости, создаваемой в точке  $C$  каждым зарядом. **36.** Сделайте схематический рисунок с указанием всех сил, действующих на один из шариков. Воспользуйтесь законом Кулона

и принципом суперпозиции полей. **37.** Воспользуйтесь вторым законом Ньютона в импульсной форме. Учтите, что в результате абсолютно упругого удара скорость шарика изменяется только по направлению.

**§ 37.** 1. Заряд электрона *отрицательный*, а направление напряжённости поля совпадает с направлением силы, действующей на помещённый в поле пробный *положительный* заряд. 3. Воспользуйтесь выражением для напряжённости поля точечного заряда и используйте значение диэлектрической проницаемости воды. 4. Воспользуйтесь формулой закона Кулона. 5. Найдите, чему равна диэлектрическая проницаемость данной жидкости, и воспользуйтесь справочными данными. 6. б) Воспользуйтесь третьим законом Ньютона. в) На каждый шарик действуют три силы: сила тяжести, сила натяжения нити и сила отталкивания со стороны другого шарика. г) Воспользуйтесь тем, что равнодействующая приложенных к шарiku сил равна нулю, когда он находится в равновесии. 7. б) Запишите условие равновесия для одного из шариков с учётом действующей на шарик силы Архимеда и того, что силы отталкивания уменьшились в  $\epsilon$  раз. 10. Напряжённость электрического поля, создаваемого точечным зарядом, в диэлектрике в  $\epsilon$  раз меньше напряжённости поля, создаваемого этим же зарядом в вакууме. Воспользуйтесь таблицей «Диэлектрическая проницаемость» на форзаце учебника. 12. Воспользуйтесь законом Кулона и таблицей «Диэлектрическая проницаемость» на форзаце учебника. 13. Воспользуйтесь законом Кулона и справочными данными на форзаце учебника. 14. Воспользуйтесь выражением для напряжённости поля точечного заряда. 15. Воспользуйтесь законом Кулона и справочными данными. 16. Воспользуйтесь законом Кулона и справочными данными. 17. Напряжённость поля в области, в которой находится кусочек ваты, лежащий на металлической пластине, увеличивается вследствие перераспределения свободных зарядов в этой пластине. 18. Воспользуйтесь законами Кулона и Гаука, а также тем, что силы взаимодействия шариков при погружении в керосин уменьшаются.

**§ 38.** 2. Воспользуйтесь формулой для работы  $A = Fscos\alpha$ , где  $\alpha$  — угол между направлением силы и направлением перемещения. 3. Воспользуйтесь формулой  $\vec{F} = q\vec{E}$  и выражением для работы силы. 11. Воспользуйтесь тем, что в данном случае работа поля  $A = qEd$ , а  $U = \frac{A}{q}$ . 12. Воспользуйтесь тем, что  $1 \text{ В} = 1 \text{ Дж}/1 \text{ Кл}$ , а  $1 \text{ Н} = 1 \text{ Дж}/1 \text{ м}$ . 15. При перемещении пробного заряда по поверхности любой из указанных сфер действующая на этот заряд со стороны электростатического поля сила перпендикулярна перемещению. 16. Если заряды на проводнике находятся в равновесии, напряжённость электрического поля внутри проводника равна нулю, а перенести заряд из одной точки поверхности проводника в любую другую точку его поверхности можно по траектории, лежащей внутри проводника. 17. а) Учтите знак заряда электрона. 18. а) Найдите сначала ускорение электрона. 20. Воспользуйтесь формулой для работы  $A = Fscos\alpha$ , где  $\alpha$  — угол между направлением силы и направлением перемещения. 21. Учтите, что работа электростатического поля при перемещении заряда из одной точки в другую зависит только от положения начальной и конечной точек и не зависит от траектории движения заряда. 25. При перемещении заряда

вдоль линии, *перпендикулярной* напряжённости поля, работа поля равна нулю. **26.** В таком поле работа поля по замкнутому контуру (например, вдоль прямоугольника, две стороны которого параллельны линиям напряжённости) не равна нулю. **27.** Воспользуйтесь тем, что если тело находится в равновесии, то равнодействующая всех приложенных к нему сил равна нулю. **29.** Воспользуйтесь законом сохранения энергии. **31.** Сила, действующая на заряд со стороны электрического поля, равна по модулю силе тяжести. **32.** Воспользуйтесь законом сохранения энергии, вторым законом Ньютона и выражением для центростремительного ускорения.

§ 39. **3.** Электроёмкость конденсатора не зависит ни от его заряда, ни от напряжения между его обкладками. **4.** Воспользуйтесь определением

электроёмкости  $C = \frac{q}{U}$ . **5.** Воспользуйтесь определением электроёмкости

$C = \frac{q}{U}$ . **7.** В пространстве между обкладками плоского конденсатора элек-

трическое поле можно считать практически однородным. **9.** Данные пластины можно рассматривать как обкладки плоского конденсатора, заряд которого не изменяется. Воспользуйтесь тем, что поле между пластинами однородно, а также тем, что при неизменном заряде пластин напряжённость этого поля практически не зависит от расстояния между пластинами. **10.** Разноимённо заряженные обкладки притягиваются друг к другу. **11.** Воспользуйтесь формулой  $C = q/U$ . **16.** г) Частица не попадёт ни на одну из обкладок конденсатора, если за время пролёта сквозь весь конденсатор она сместится в направлении, перпендикулярном обкладкам, на расстояние, меньшее  $d/2$ . Время пролёта частицы сквозь весь конденсатор

$t_{\text{прол}} = \frac{l}{v_0}$ . **18.** а) Учтите, что начальная скорость шарика равна нулю.

**19.** Воспользуйтесь выражением для электроёмкости. **20.** Воспользуйтесь выражением для электроёмкости. **21.** Электроёмкость конденсатора не зависит ни от его заряда, ни от напряжения между его обкладками. **22.** Учтите, что заряд конденсатора, отключённого от источника напряже-

ния, не изменяется. **27.** Воспользуйтесь формулами  $W_p = \frac{q^2}{2C}$  и  $C = \frac{\varepsilon\varepsilon_0 S}{d}$ .

**28.** Воспользуйтесь формулами  $W_p = \frac{q^2}{2C}$  и  $C = \frac{\varepsilon\varepsilon_0 S}{d}$ . **30.** Изобразите на

рисунке все силы, действующие на шарик, и воспользуйтесь вторым законом Ньютона. **32.** В данном случае модуль скорости электрона увеличился в 2 раза. **33.** Запишите уравнения зависимости координат электрона от времени и воспользуйтесь вторым законом Ньютона.

## Глава VIII

§ 40. **7.** а) Сравните силу тока в проводниках при одном и том же напряжении и воспользуйтесь законом Ома для участка цепи. б) Воспользуйтесь законом Ома для участка цепи. **10.** а) Объём меди равен произведению длины провода на площадь поперечного сечения. **11.** При увеличении силы тока любой проводник нагревается, а при нагревании

сопротивление *металлов* увеличивается. **12.** Воспользуйтесь законом сохранения электрического заряда и определением силы тока. **13.** Воспользуйтесь тем, что работа электростатического поля по перемещению заряда по двум последовательно соединённым проводникам равна сумме работ по перемещению заряда по каждому проводнику. **14.** Разделите уравнение  $U = U_1 + U_2$  на силу тока  $I$  в данном участке цепи и воспользуйтесь тем, что  $I = I_1 = I_2$ . **15.** Воспользуйтесь тем, что при последовательном соединении проводников сила тока во всех проводниках одинакова, а напряжение на концах всего участка равно сумме напряжений на каждом из них. **16.** Из формулы для общего сопротивления нескольких последовательно соединённых проводников следует, что общее сопротивление цепи *больше* сопротивления любого из проводников. **18.** а) Воспользуйтесь законом Ома для участка цепи и тем, что при последовательном соединении проводников сила тока в них одинакова. **19.** б) Воспользуйтесь тем, что при последовательном соединении проводников сила тока в них одинакова. **20.** Воспользуйтесь законом сохранения электрического заряда и определением силы тока. **21.** Воспользуйтесь тем, что концы проводников совпадают, а также тем, что работа электростатического поля по перемещению заряда зависит только от начального и конечного положения заряда. **22.** Разделите уравнение  $I = I_1 + I_2$  на напряжение  $U$  на всём участке цепи и воспользуйтесь тем, что  $U = U_1 = U_2$ . **24.** Воспользуйтесь тем, что при параллельном соединении проводников напряжение на всех проводниках одинаково, а сила тока во всём участке равна сумме сил токов в каждом из них. **25.** Из формулы для общего сопротивления нескольких параллельно соединённых проводников  $\frac{1}{R} = \frac{1}{R_1} + \frac{1}{R_2} + \dots + \frac{1}{R_n}$  следует, что общее сопротивление  $R$  цепи *меньше* сопротивления любого из проводников. Например, из этой формулы следует, что  $\frac{1}{R} > \frac{1}{R_1}$ , откуда получаем:  $R < R_1$ . **27.** а) Воспользуйтесь законом Ома для участка цепи и тем, что при параллельном соединении проводников напряжение на них одинаково. **28.** а) Если бы проводники были соединены последовательно, сила тока в каждом проводнике была бы равна силе тока во всём участке цепи. **29.** Если сила тока в параллельно соединённых проводниках одинакова, то сопротивления этих проводников равны. **30.** Воспользуйтесь тем, что при параллельном соединении проводников отношение сил токов в них *обратно* отношению их сопротивлений, а при последовательном соединении отношение напряжений на проводниках *равно* отношению их сопротивлений. **34.** Воспользуйтесь справочными данными на форзаце учебника. **36.** Воспользуйтесь законом Ома для участка цепи и справочными данными на форзаце учебника. **38.** Учтите, что при последовательном соединении проводников сила тока равна силе тока в каждом проводнике, а сопротивление участка цепи равно сумме сопротивлений каждого из проводников. **42.** Учтите, что при последовательном соединении проводников общая сила тока в участке цепи равна силе тока в каждом проводнике. **43.** Определите тип соединения резисторов. **44.** Резисторы могут быть соединены и параллельно. **47.** Учтите зависимость сопротивления металлического проводника от температуры. **49.** Найдите силу тока в последовательно соединённых первом и втором резисторах и учтите, что общая сила тока в участке

цепи равна силе тока в каждом проводнике. **53.** Составьте и решите систему двух уравнений с двумя неизвестными. **54.** В этой задаче больше одного ответа. **55.** Воспользуйтесь соотношением, связывающим напряжение на концах участка цепи и напряжённость однородного электрического поля на этом участке, законом Ома для участка цепи и выражением для сопротивления металлического проводника. **57.** Найдите общее сопротивление и воспользуйтесь законом Ома для участка цепи.

**§ 41.** **1.** Воспользуйтесь соотношением, которое связывает силу тока  $I$  с зарядом  $q$ , прошедшим через поперечное сечение проводника за время  $t$ . **2.** Воспользуйтесь формулой  $Q = IUt$  и законом Ома для участка цепи. **3.** Воспользуйтесь формулой  $Q = IUt$  и законом Ома для участка цепи. **5.** а) В последовательно соединённых проводниках сила тока одинакова. в) Воспользуйтесь законом Джоуля — Ленца. **6.** Сравните сопротивления проводников. **7.** а) На параллельно соединённых проводниках на-

пряжение одинаково. в) Воспользуйтесь формулой  $Q = \frac{U^2}{R}t$ . **11.** Если при параллельном соединении лампа  $1$  горит ярче, значит, её сопротивление меньше, чем сопротивление лампы  $2$ . **14.** а) В последовательно соединённых проводниках силы тока одинаковы. **16.** а) На параллельно соединённых проводниках напряжения одинаковы. в) Воспользуйтесь формулой

$P = \frac{U^2}{R}$ . **23.** Воспользуйтесь законом Джоуля — Ленца и тем, что сила тока  $I = \frac{q}{t}$ . **24.** Для сравнения количества теплоты, выделившегося в последовательно соединённых проводниках, удобнее использовать формулу  $Q = I^2Rt$ . **25.** Для сравнения количества теплоты, выделившегося в парал-

лельно соединённых проводниках, удобнее использовать формулу  $Q = \frac{U^2}{R}t$ . **27.** В задаче есть лишнее данное. **31.** Воспользуйтесь справочными данными. **35.** При постоянном напряжении выделяемая мощность обратно пропорциональна сопротивлению резистора. **36.** Запишите выражения для мощности тока при последовательном и параллельном соединении резисторов. Решите систему двух уравнений с двумя неизвестными — сопротивлениями резисторов. **37.** Составьте уравнение теплового баланса. **38.** Время закипания обратно пропорционально мощности тока.

**§ 42.** **1.** Воспользуйтесь законом сохранения энергии. **2.** Воспользуйтесь формулами  $\mathcal{E} = \frac{A_{\text{стоп}}}{q}$  и  $q = It$ . **5.** б) Удобно разделить одно уравнение на

другое. в) Удобно переписать систему уравнений в виде

$$\begin{cases} R_1 + r = \frac{\mathcal{E}}{I_1}, \\ R_2 + r = \frac{\mathcal{E}}{I_2} \end{cases} \text{ и вы-}$$

честь одно уравнение из другого. **7.** Запишите закон Ома для полной цепи

в виде  $\mathcal{E} = IR + Ir$  и воспользуйтесь тем, что, согласно закону Ома для участка цепи,  $IR = U$ . **8.** Из формулы  $U = \mathcal{E} - Ir$  следует, что  $U = \mathcal{E}$  при  $I = 0$ . **9.** а) ЭДС источника тока равна напряжению на его полюсах, когда они разомкнуты. При этом сила тока в цепи равна нулю. б) Из формулы закона Ома для полной цепи следует, что наибольшая сила тока достигается при сопротивлении внешней цепи, равном нулю:  $R = 0$ . **12.** Воспользуйтесь законом Ома для полной цепи. **13.** а) Если о сопротивлении амперметра в условии задачи ничего не сказано, его принимают равным нулю. б) Обратите внимание на то, как изменилась сила тока в цепи, и воспользуйтесь законом Ома для полной цепи. в) Составьте систему уравнений, выражающих закон Ома для полной цепи при коротком замыкании батарейки и при подключении к ней резистора. **14.** Воспользуйтесь

формулами:  $\eta = \frac{A_{\text{пол}}}{A_{\text{стоп}}} \cdot 100\%$ ,  $A_{\text{пол}} = I^2 R t$ ,  $A_{\text{стоп}} = I^2 R t + I^2 r t$ . **15.** в) Ис-

следуйте, при каком сопротивлении внешней цепи КПД источника тока приближается к 100%. **17.** Воспользуйтесь законом Ома для полной цепи и законом Ома для участка цепи. **18.** Воспользуйтесь законом Ома для полной цепи и учтите, что в этом случае можно считать сопротивление внешней цепи  $R$  равным 0. **19.** Используя закон Ома для полной цепи, найдите сопротивление нагревателя. **20.** Найдите заряд, прошедший через поперечное сечение проводника за это время. **21.** Воспользуйтесь законом Ома для полной цепи. **23.** Найдите сопротивление внешней цепи. **24.** Запишите систему двух уравнений с двумя неизвестными  $\mathcal{E}$  и  $r$ . **26.** Найдите внутреннее сопротивление источника тока. **30.** Составьте систему двух уравнений с двумя неизвестными  $\mathcal{E}$  и  $r$ .

**\*§ 43.** **3.** в) Воспользуйтесь формулой для параллельного соединения проводников. **5.** Воспользуйтесь выражениями для мощности тока и законом Ома для полной цепи. **6.** Воспользуйтесь формулой  $P = UI$  и законом Ома для полной цепи. **7.** б) Воспользуйтесь законом Ома для полной цепи. **8.** Воспользуйтесь формулой для КПД источника тока. **10.** Между обкладками конденсатора находится диэлектрик. **11.** а) Напряжение между полюсами разомкнутого источника равно его ЭДС. б) Учтите, что сила тока в цепи равна нулю, и воспользуйтесь законом Ома для участка цепи. в) Воспользуйтесь тем, что напряжение между полюсами разомкнутого источника равно его ЭДС, а также тем, что напряжение между точками  $B$  и  $D$  равно нулю. г) Воспользуйтесь соотношением между электроёмкостью конденсатора, зарядом конденсатора и напряжением на нём. **12.** а) Воспользуйтесь законом Ома для полной цепи и соотношением  $U = IR$ . б) Напряжение на конденсаторе равно в данном случае напряжению между полюсами источника. **13.** в) Полное сопротивление цепи равно сумме сопротивлений внешней цепи и внутреннего сопротивления источника тока. г) Воспользуйтесь законом Ома для полной цепи и учтите, что ток будет течь только через резисторы  $1$  и  $3$ . д) Напряжение между точками  $A$  и  $D$  равно напряжению на резисторе  $3$ . Воспользуйтесь законом Ома для участка цепи. е) Учтите, что напряжение на резисторе  $2$  равно нулю, потому что через него не течёт ток. **14.** Используя метод эквивалентных схем, начертите схемы последовательного упрощения данной схемы, содержащие меньше резисторов; для каждой схемы рассчитайте её сопротивление и найдите общее сопротивление  $R$  всего участка. **15.** Воспользуйтесь методом эквивалентных схем. **16.** Воспользуйтесь методом

эквивалентных схем. **17.** Перечертите схему данного участка цепи, объединив в одну точку точки, разность потенциалов между которыми равна нулю. **18.** Докажите, что через резистор  $R_5$  ток идти не будет. Отсюда будет следовать, что этот резистор можно удалить, не изменив общего сопротивления цепи. **19.** Докажите, что мощность тока максимальна, когда сопротивление внешней цепи равно внутреннему сопротивлению источника тока. **21.** Напряжение на конденсаторе  $C_1$  равно сумме напряжений на резисторах  $R_1$  и  $R_2$ , а напряжение на конденсаторе  $C_2$  равно сумме напряжений на резисторах  $R_2$  и  $R_3$ . **22.** Найдите внешнее сопротивление цепи и воспользуйтесь законом Ома для полной цепи. **23.** Напряжение на конденсаторе равно в данном случае напряжению между полюсами источника. **24.** До замыкания ключа заряды конденсаторов были одинаковыми, а после его замыкания напряжение на каждом из конденсаторов равно напряжению на параллельно соединённом с ним резисторе.

**§ 44. 1.** Вспомните, как определяют направление электрического тока. **4.** Воспользуйтесь формулой  $m = kq$ , а также тем, что масса  $m$  выделившегося на электроде вещества связана с массой одного иона  $m_0$  и количеством  $N$  ионов, достигших электрода, соотношением  $m = Nm_0$ . Учтите, что заряд одного иона равен по модулю  $en$ , поэтому  $q = Nen$ . **5.** Учтите знак заряда электрона. **6.** Учтите знак заряда электрона и определение направления электрического тока. **8.** Сопротивление электролита в этом случае уменьшится. **9.** Воспользуйтесь законом Фарадея и формулой плотности вещества. **10.** Воспользуйтесь законом Фарадея и уравнением Менделеева — Клапейрона. Учтите, что в формулу  $k = \frac{m_0}{en}$  для электрохимического эквивалента входит масса иона (которую можно считать равной массе атома). Не забудьте, что выделившиеся в результате электролиза атомы кислорода образуют двухатомные молекулы. **11.** Воспользуйтесь законом Фарадея и формулами для расчёта работы тока и КПД.

**§ 45. 1.** Учтите, что электроны и дырки будут двигаться в *противоположные* стороны. **3. а)** Определите, через какой резистор идёт ток. **5.** Воспользуйтесь таблицей Менделеева. **8.** Воспользуйтесь законом Ома для участка цепи.

## ОТВЕТЫ И РЕШЕНИЯ

### Глава V

- § 25. 1. То, что вещество состоит из атомов и молекул, и то, что они находятся в непрерывном хаотическом движении. 2. То, что вещество состоит из атомов и молекул, и то, что они находятся в непрерывном хаотическом движении. 3. Быстрее всего в газах, а медленнее всего — в твёрдых телах. 4. То, что атомы и молекулы взаимодействуют друг с другом. На взаимодействие молекул указывает также существование жидкостей и твёрдых тел. 5. На отталкивание молекул указывает несжимаемость жидкостей и твёрдых тел. 6. Вода. Вокруг нас всегда есть вода в жидком состоянии и газообразном (водяной пар в воздухе). Зимой вокруг нас есть также вода в твёрдом состоянии (лёд и снег). 7. В трёх молях водорода в 3 раза больше молекул, чем в одном моле кислорода. 8. 2 моля водорода и 1 моль кислорода. 9. В одном моле любого вещества содержится число молекул, равное числу атомов в 12 г углерода. Поскольку масса атома углерода примерно в 12 раз больше массы атома водорода, это означает, что *число молекул в одном моле приближённо равно числу атомов в одной граммe водорода*. 10. 1 а. е. м. приближённо равна массе одного атома водорода. 11. а)  $1,8 \cdot 10^{24}$ ; б)  $3 \cdot 10^{24}$ ; в)  $6 \cdot 10^{22}$ ; Число атомов  $5,4 \cdot 10^{24}$ ;  $6 \cdot 10^{24}$ ;  $1,8 \cdot 10^{23}$ . 12. 10 моль; 0,05 моль; 5,5 моль; 0,001 моль. 13. 1; 12. 15. а) 18; б) 2; в) 32; г) 4; д) 44. 16.  $m = \nu M$ .
18. а)  $M_{\text{H}_2\text{O}} = 18 \cdot 10^{-3} \frac{\text{КГ}}{\text{МОЛЬ}}$ ; б)  $M_{\text{H}_2} = 2 \cdot 10^{-3} \frac{\text{КГ}}{\text{МОЛЬ}}$ ; в)  $M_{\text{O}_2} = 32 \cdot 10^{-3} \frac{\text{КГ}}{\text{МОЛЬ}}$ ;
- г)  $M_{\text{He}} = 4 \cdot 10^{-3} \frac{\text{КГ}}{\text{МОЛЬ}}$ ; д)  $M_{\text{CO}_2} = 44 \cdot 10^{-3} \frac{\text{КГ}}{\text{МОЛЬ}}$ . 19. а)  $14,1 \text{ см}^3$ ;
- б)  $1,64 \cdot 10^{-4} \text{ см}^3$ ; в)  $1,64 \cdot 10^{-4} \text{ г}$ ; г)  $5,45 \cdot 10^{18}$ ; д)  $1,9 \cdot 10^{15}$ . 20.  $1,4 \cdot 10^{11}$ .
21. а) 0,086 молей; б)  $5,16 \cdot 10^{22}$  каждого вида атомов; в)  $3 \cdot 10^6 \text{ м}^3$ ;
- г)  $1,72 \cdot 10^{16}$  каждого вида ионов. д)  $3,45 \cdot 10^{10}$  каждого вида ионов.
22. Молекул в столовой ложке воды примерно в 10 раз больше, чем столовых ложек воды в Мировом океане. 23. Объединяет эти явления то, что оба они обусловлены хаотическим движением молекул. Однако диффузия обусловлена только движением самих молекул, а броуновское движение — это движение частиц, размеры которых намного больше размеров молекул. 24. Нет. Такое беспорядочное движение пылинок обусловлено потоками воздуха. 26. Твёрдые тела сохраняют объём и форму, жидкости сохраняют только объём, а газы не сохраняют ни объём, ни форму. 27. а)  $M_{\text{H}_2\text{SO}_4} = 98 \cdot 10^{-3} \frac{\text{КГ}}{\text{МОЛЬ}}$ ; б)  $M_{\text{N}_2} = 28 \cdot 10^{-3} \frac{\text{КГ}}{\text{МОЛЬ}}$ ;
- в)  $M_{\text{NaCl}} = 58 \cdot 10^{-3} \frac{\text{КГ}}{\text{МОЛЬ}}$ . 28.  $m_0 = \frac{M}{N_A}$ . 29. а) 280 г; б) 320 г; в)  $4,7 \cdot 10^{-26} \text{ кг}$ .
30. а)  $M_{\text{NH}_3} = 17 \cdot 10^{-3} \frac{\text{КГ}}{\text{МОЛЬ}}$ ; б)  $2,8 \cdot 10^{-26} \text{ кг}$ ; в) 8 г; г)  $2,8 \cdot 10^{23}$ . 31.  $198 \text{ см}^2$ .
32. а) 556 молей; б) 250 молей; в) 0,29 молей. 33. Одинаковое число

молекул. Число атомов, содержащихся в 28 г азота, в 1,5 раза меньше числа атомов, содержащихся в 44 г углекислого газа. **34.** а) В алюминиевом в 2,37 раза больше; б) в медном в 1,4 раза больше. **35.**  $N = 4 \cdot 10^{14}$ . **36.**  $N_{1c} = 7,7 \cdot 10^{18}$ . Примерно в миллиард раз. **37.** Около 400 слоёв.

§ 26. 1.  $T = t + 273$ . 2. а) 273 К; б) 373 К. 3. Температура тела увеличилась на 10 К. 4. 546 К. 6. Увеличивается тоже в 3 раза. 7. а) В 2 раза; б) в 2 раза. 9. Уменьшается тоже в 2 раза. 10. а) В 2 раза; б) в 2 раза. 12. Уменьшается в 3 раза. 13. б) В 2 раза; в) на  $5 \cdot 10^4$  Па. 14. а) Данный процесс не является каким-либо изопроцессом; б) см. рисунок 1; в) посредством изотермического процесса (рис. 2, а) или посредством изохорного процесса (рис. 2, б);

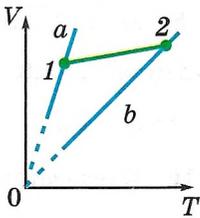


Рис. 1

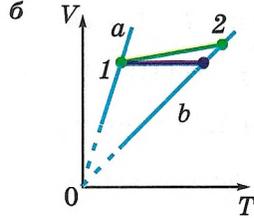
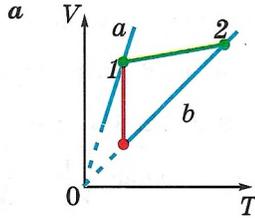


Рис. 2

г) давление *увеличивалось*; д) давление *увеличивалось*. 15. а) Увеличилась; б) уменьшилось; в) увеличился. 16. а) Увеличился; б) увеличилось; в) увеличилась. 17. а) Давление газа не изменяется; б) объём газа увеличивается в 3 раза; в) 819 К. 18. 1092 К, или 819 °С. 19. Давление газа увеличивается в 4 раза. 20.  $4 \cdot 10^4$  Па; 8 л. 21.  $T_2 = 150$  К;  $T_3 = 450$  К. 22.  $p_2 = 10^5$  Па;  $p_3 = 4 \cdot 10^5$  Па. 23. 375 К. 24. 120 кПа. 27. 50 м. 28. Конечная абсолютная температура составляет 2/3 от начальной. 29. Первому. 30. Четвёртому. 31. На участке 1—2—3 давление увеличивалось, а на участке 3—4—1 уменьшалось. 32. Точка 3 соответствует наибольшему объёму, а точка 1 — наименьшему. 33. На этапах 1—2 и 2—3 температура газа увеличивалась, а на этапах 3—4 и 4—1 уменьшалась. 34.  $T_2 = \sqrt{T_1 T_3}$ .

§ 27. 3.  $\frac{p_1 V_1}{T_1} = \frac{p_2 V_2}{T_2} \Rightarrow \frac{V_2}{V_1} = \frac{p_1}{p_2} \cdot \frac{T_2}{T_1} \Rightarrow \frac{V_2}{V_1} = \frac{1}{3} \cdot \frac{2}{1} = \frac{2}{3}$ . Итак, объём газа *уменьшился* в 1,5 раза. 4. а) 273 К и 373 К; б) давление  $p$  связано с силой давления  $F$  и площадью поршня  $S$  соотношением  $p = \frac{F}{S}$ . Следовательно, когда на поршень поставили гирию массой  $m$ , давление газа увеличилось на  $\Delta p = \frac{mg}{S}$ . Подставляя в эту формулу данные из условия, получаем, что давление газа в сосуде *увеличилось на*  $10^5$  Па. По условию в начальном состоянии газ находился при нормальном атмосферном давлении, которое тоже равно  $10^5$  Па. Таким образом, давление газа в сосуде увеличилось в 2 раза; в) из уравнения Клапейрона получаем:

$\frac{V_2}{V_1} = \frac{p_1}{p_2} \cdot \frac{T_2}{T_1} = \frac{1}{2} \cdot \frac{373}{273} = 0,68$ . Итак, объём газа *уменьшился*: отношение конечного объёма газа к начальному равно 0,68. 5. а) 273 К;  $2 \cdot 10^5$  Па;

б) 2; в) 546 К или 273 °С. 6. а) Не может; б)  $\begin{cases} \frac{p}{V} = a, \\ \frac{pV}{T} = c, \end{cases}$  где  $a$  и  $c$  — не-

которые постоянные величины; в)  $\frac{p^2}{T} = b$ ,  $\frac{T}{V^2} = d$ , где  $b$  и  $d$  — константы; г) давление увеличивается в 2 раза; д) температура увеличивается в 4 раза. 7. Давление газа уменьшается в 2 раза. 8. а)  $pV^3 = \text{const}$ ; б)  $\frac{T^3}{p^2} = \text{const}$ ; в) уменьшится в 8 раз; г) уменьшится в 2,8 раз.

11. а) 1,76 г; б) 28,2 г; в) 38,8 г. 12. Из уравнения Менделеева — Клапейрона следует, что в данном случае  $\frac{V_{\text{H}_2}}{V_{\text{O}_2}} = \frac{M_{\text{O}_2}}{M_{\text{H}_2}} = 16$ . Следовательно,

водород занимает объём, в 16 раз больший, чем кислород. Это означает, что водород занимает 16/17 объёма сосуда, а кислород — только 1/17 часть. То, что водород занимает в данном случае намного больший объём, чем кислород, обусловлено тем, что *при равных массах* газов водород содержит в 16 раз больше молекул, а свойства газов определяются главным образом *числом его молекул*. 14.  $1,29 \frac{\text{кг}}{\text{м}^3}$ ; примерно в 780 раз.

16.  $2,7 \cdot 10^{16}$ . Это число почти в сто тысяч раз превышает число звёзд в Галактике! 17. а)  $28 \cdot 10^{-3}$  кг/моль; б) например, азот. 18. а) Увеличилось в 1,5 раза, потому что из каждых двух молекул озона образовалось три молекулы кислорода. б) объём газа стал равным 0,6 от начального, то есть уменьшился в 1,67 раза. 19. а) 373 К и 273 К; б) нет, потому что он находился под подвижным поршнем и трением можно пренебречь; в) в 1,37 раза; г) 0,68. 20. а)  $1,4 \cdot 10^5$  Па; б)  $11,3 \cdot 10^5$  Па; в)  $12,7 \cdot 10^5$  Па.

21. 83,3 кПа. 22. 147 см<sup>3</sup>. 23. 375 К. 24.  $5 \cdot 10^5$  Па. 25. 241 К. 26. 0,04 моль. 27. В 8 раз. 28. 82,2 кПа. 29. 1,13 МПа. 30. Давление воздуха уменьшилось на 21 %. 31.  $T_2 = 9T_1$ . 32. 150 кПа. 33. 207 кПа. 34. Уменьшилась на 20 %. 35. 0,6. 36. 10 см от дна сосуда. 37. 3,8 нм. 38. Поршень опустится на 19 см.

§ 28. 2. а)  $6 \cdot 10^{23}$ ; б)  $3 \cdot 10^{25} \frac{1}{\text{м}^3}$ ; в)  $5 \cdot 10^{-21}$  Дж; г) лишним данным является вид газа.

4.  $5,7 \cdot 10^{-21}$  Дж. Лишними данными являются названия газов (достаточно было указать, что газы одноатомные), а также давление. 7. 1900 м/с; 480 м/с; 180 м/с. 8.  $\bar{v} = \sqrt{\frac{3p}{\rho}}$ . 9. 224 м/с; лишними

данными являются вид газа и его температура. 10. За время, пока атомы серебра пролетали от щели в цилиндре *A* до поверхности цилиндра *B*, цилиндры поворачивались на некоторый угол. 11. Скорости атомов при одной и той же температуре *различны*. Более медленным атомам требуется большее время, чтобы пролететь расстояние между цилиндрами, поэтому времени пролёта этих атомов соответствует больший угол поворота цилиндров. 15. Давление газа на стенку сосуда уменьшилось бы в 2 раза. 16. а) Давление увеличится в 4 раза; б) давление увеличится в 16 раз; в) давление увеличится в 3 раза; г) давление увеличится в 2 раза; д) давление уменьшится в 8 раз. 17. 400 К. 18. 144 кПа. 19. 950 м/с. 20. Кинетическая энергия молекул увеличится в 3 раза, а их среднеквадратичная скорость увеличится в  $\sqrt{3}$  раз. 21.  $2 \cdot 10^{21}$ . 22.  $2,3 \cdot 10^{25} \frac{1}{\text{м}^3}$ . 23. а) 2. б) 0,63. 24. а) Не изменится; б) уменьшится в 1,25 раза; в) увеличится в 1,25 раза; г) увеличится в 1,1 раза. 25.  $p_2 = p_1 \sqrt{\frac{T_1}{T_2}}$ . 26. 341 К; надо нагреть ещё на 382 К. 27. а) Гелий и аргон; б) 1 г гелия и 5 г аргона.

§ 29. 2. а) 100 кПа. б) 11,6 г. 3. При давлении выше нормального атмосферного температура кипения жидкости выше 100 °С. Благодаря этому более эффективно уничтожаются болезнетворные бактерии. 4. При увеличении высоты над уровнем моря давление уменьшается. При давлении ниже нормального атмосферного температура кипения жидкости ниже 100 °С: например, на высоте 5 км вода закипает при температуре 83 °С. Поэтому высоко в горах мясо не варят, а жарят. 5. а) 60 °С. б) 120 °С. 6. 100 %. 7. 66 %. 8. Если показания сухого и влажного термометров *одинаковы*, значит, с влажного термометра жидкость не испаряется (поэтому он и не охлаждается). Следовательно, водяной пар в воздухе является *насыщенным*, то есть относительная влажность воздуха равна 100 %. 9. Выпадает роса — отсюда и название «точка росы». 10. В это время суток обычно самая низкая температура воздуха. 11. а) Прилежащий к холодным стёклам очков слой воздуха охладился, вследствие чего водяной пар в нём стал сначала насыщенным, а затем началась конденсация пара; б) согласно условию относительная влажность воздуха в комнате равна 60 %. Это означает, что давление водяного пара составляет 0,6 от давления насыщенного пара при той же температуре (20 °С). Используя данные из таблицы, получаем, что парциальное давление водяного пара в комнате равно 1,4 кПа; в) при 12 °С; г) ниже 12 °С. 12. Ненасыщенным. 13. 7,7 г/м<sup>3</sup>. 14. 80 °С. 15. а) 84 %; б) 71 %; в) 74 %. 16. 64 %. 17. 1,7 кПа. 18. 27 %. 19. Пар не является насыщенным. Точка росы равна 10 °С. 20. Не более 10 °С. 21. 0,58 г. 22.  $1,5 \cdot 10^{24}$ . 23. а) 47 кПа; б) 2,9 г; в) 1,23 кПа; г) 0,094 г; д) 2,8 г. 24. Давление насыщенного водяного пара, его плотность и концентрация молекул не изменятся. Масса воды в сосуде равна 1,3 г. 25. 623 г. 26. 0,12 г. 27. 232 кПа. 28. а) 3,9 %; б) 100 %. 29. а) 60 °С; б) 0,39 г; в) 0,26 г. 30. Воздух придётся увлажнять, испарив при этом 30 л воды.

§ 30. 1. Увеличивается вследствие того, что при повышении температуры перескоки молекул из одного положения равновесия в другое происходят чаще. 3. Молекулы воды сильнее притягиваются друг к другу, чем к молекулам жира. Вода не смачивает жир. 4. а) Нет; б) потому что при этом суммарная площадь их поверхности уменьшится, вследствие чего уменьшится и суммарная поверхностная энергия. 7. Относительное удлинение является просто числом. 9. В паскалях. 10. а) 70 МПа; б)  $\varepsilon = 10^{-3}$ ; в)  $\Delta l = 0,5$  мм. 11.  $d = 8$  см. 12. 2,3 см. 13. 111 Н. 14. 100 МПа;  $8,3 \cdot 10^{-4}$ .

## Глава VI

§ 31. 4. При адиабатном сжатии температура газа повышается, а при адиабатном расширении — понижается. 5. В воздухе всегда содержится некоторое количество водяного пара. Его плотность меньше, чем плотность воздуха, потому что молярная масса воды меньше, чем молярная масса газов, входящих в состав воздуха (азота и кислорода), поэтому водяной пар поднимается вверх. При этом он попадает в более разрежённые и более холодные слои атмосферы. В результате содержащийся в воздухе водяной пар может сконденсироваться, то есть превратиться в капельки воды или кристаллики льда, это и есть образование облаков. 6. Внутренняя энергия газа уменьшилась на 200 Дж. 7. Адиабатному расширению соответствует график 2. 8. В изотермическом процессе внутренняя энергия газа не изменяется. 9. При *любом* расширении работа газа положительна, а при *любом* сжатии — отрицательна. 10. При изотермическом расширении газ получает некоторое количество теплоты, а при изотермическом сжатии — отдаёт. 11.  $Q = A_r$ . 12. При изохорном нагревании внутренняя энергия газа увеличивается, а при изохорном охлаждении — уменьшается. 13. При изохорном процессе работа газа равна нулю, потому что газ не расширяется и не сжимается. 14. При изохорном нагревании газ получает некоторое количество теплоты, а при изохорном охлаждении — отдаёт. 15.  $Q = \Delta U$ . 16. При изобарном нагревании внутренняя энергия газа увеличивается, а при изобарном охлаждении — уменьшается. 17. При изобарном нагревании работа газа положительна, а при изобарном охлаждении — отрицательна. 18. При изобарном нагревании газ получает некоторое количество теплоты, а при изобарном охлаждении — отдаёт. 19. Не получает и не отдаёт. 20. При адиабатном сжатии внутренняя энергия газа увеличивается, а при адиабатном расширении — уменьшается. 21. При адиабатном расширении работа газа положительна, а при адиабатном сжатии — отрицательна.

22.  $\Delta U + A_r = 0$ . 23.  $c_1 = 500 \frac{\text{Дж}}{\text{кг} \cdot \text{К}}$ ;  $c_2 = 250 \frac{\text{Дж}}{\text{кг} \cdot \text{К}}$ . 24. 34 °С. 25. 23 °С.

26. Работа газа равна нулю. 27. Внутренняя энергия газа увеличилась на 100 Дж. 28. 150 Дж. 29. 1,6 кДж. 30. Изотермическим. 31. Изохорным.

32. 7 кДж. 33. 300 Дж; 100 Дж. 34.  $369 \frac{\text{Дж}}{\text{кг} \cdot \text{К}}$ . 35. 2,7 м/с.

§ 32. 2. Внутренняя энергия газа увеличилась на 5 кДж. 3. а) 0,4 моля; б) 8 г. 5.  $\Delta U = 3p_0V_0$ . 6. Внутренняя энергия газа уменьшилась на 600 Дж. 7. а)  $2 \cdot 10^5$  Па; б)  $4 \cdot 10^5$  Па; в)  $\Delta U = 4,5$  кДж. 8. 15 МДж; 1,5 км. Лишнее

данное — температура воздуха. 11. а) Изобразим график данного процесса в координатах  $(p, V)$  (рис. 3). Работа газа в изобарном процессе  $A_r = p_0(V_2 - V_1)$ , где  $p_0$  — постоянное давление газа,  $V_1$  и  $V_2$  — начальный и конечный объём газа. Из уравнения Менделеева — Клапейрона следует, что в изобарном процессе  $p_0 \Delta V = \nu R \Delta T$ . Следовательно,  $A_r = \nu R(T_2 - T_1)$ ;

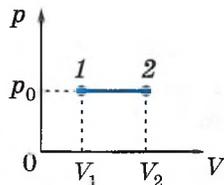


Рис. 3

б)  $\Delta U = \frac{3}{2} \nu R(T_2 - T_1)$ ; в)  $Q = \frac{5}{2} \nu R(T_2 - T_1)$ . 12. а) Ра-

бота газа при переходе способом *a* в 2 раза больше, чем при переходе способом *b*; б) изменение внутренней энергии при обоих способах перехода одинаково. 13. Переданное газу количество теплоты при переходе способом *a* в 3 раза больше, чем при переходе способом *b*. 14. а) Увеличивалась на этапах *a* и *b*, уменьшалась на этапах *c* и *d*; б) на этапе *b*; в) на этапе *d*; г) получал на этапах *a* и *b*, отдавал на этапах *c* и *d*; д)  $(p_2 - p_1)(V_2 - V_1)$ . 15. а) Процесс 2—3 представляет собой адиабатное расширение, а процесс 3—1 — изотермическое сжатие; б) газ совершает положительную работу на этапах 1—2 и 2—3; газ совершает отрицательную работу на этапе 3—1; в) газ получает некоторое количество теплоты на этапе 1—2 и отдаёт некоторое количество теплоты на этапе 3—1. 16. а)  $T_1 = T_3$ . б)  $A_{12} = \nu R(T_2 - T_1)$ . в)  $\Delta U_{12} = \frac{3}{2} \nu R(T_2 - T_1)$ ;

г)  $Q_{12} = A_{12} + \Delta U_{12} = \frac{5}{2} \nu R(T_2 - T_1)$ ; д)  $A_{23} = \frac{3}{2} \nu R(T_3 - T_2)$ ; е) количество

теплоты, отданное газом в изотермическом процессе, равно работе внешних сил над газом. 17. 250 кПа. 18. Внутренняя энергия увеличилась на 750 Дж. 19. а) 8 МДж; б) 2,4 кДж; в) 2,4 МДж. 20. 1,25 кДж. 21. Увеличилась на 80 К. 22. 7,5 кДж. 23. На 46,5 %. 24.  $9,6 \cdot 10^{24} \text{ м}^{-3}$ . 25. а) 8 кДж; б) 4 кДж; в) 3,6 кДж; г) 1,2 кДж; д) 400 Дж; е) 6 кДж. 26. 600 Дж. 27. Например, кислород. 28. Внутренняя энергия газа увеличилась на 11,2 Дж. 29. 200 кДж. 30. 12,5 кДж. 31. 46,5 кДж. 32. 4 кДж. 33. -163 Дж.

§ 33. 2. 4 кДж. 3. 77 %. 4. а) *a* — изохорное нагревание, *b* — изобарное расширение, *c* — изохорное охлаждение, *d* — изобарное сжатие; б) газ совершает положительную работу на этапе *b*.  $A_r = 2p_0V_0$ ; в) используя первый закон термодинамики, находим, что газ получает некоторое количество теплоты только на этапах *a* и *b*. Для нахождения изменения внутренней энергии газа на этих этапах воспользуемся формулой  $U = \frac{3}{2} pV$ .

Произведение  $pV$  на этапах *a* и *b* изменилось от  $p_0V_0$  до  $2p_0 \cdot 2V_0 = 4p_0V_0$ .

Следовательно,  $\Delta U = \frac{3}{2}(4p_0V_0 - p_0V_0) = \frac{9}{2} p_0V_0$ . Согласно первому закону

термодинамики  $Q_1 = \Delta U + A_r$ . Подставляя в эту формулу найденное выше

выражение для работы газа ( $A_r = 2p_0V_0$ ), получаем:  $Q_1 = \frac{13}{2} p_0V_0$ ;

- г)  $A_{\text{пол}} = p_0 V_0$ ; д)  $\eta = \frac{2}{13} \approx 15\%$ . 5. 29%. 6. В 3,3 раза. 7. 350 Дж; 35%.  
 8. 30%. 9. 300 К. 10. 429 К. 11. В 4 раза. 12. 23%. 13. Увеличился; 38%. 14. 8,9 т. 15. а) 400 Дж; б) 1,8 кДж; в) 22%. 16. 15%. 17. 24%.  
 18. 15%. 19.  $\eta = \left(1 - \frac{3\nu R|\Delta T|}{2A}\right) \cdot 100\% = 25\%$ . 20. 21 кДж.

\*§ 34. 2. Ртуть плавится при температуре  $-39^\circ\text{C}$ . 4. До  $78,6^\circ\text{C}$ .

5. а)  $2,1 \frac{\text{кДж}}{\text{кг} \cdot ^\circ\text{C}}$ . б)  $0^\circ\text{C}$ . в)  $330 \text{ кДж/кг}$ . г)  $4,2 \frac{\text{кДж}}{\text{кг} \cdot ^\circ\text{C}}$ . д) Вода. 8. В процессе испарения жидкость покидают наиболее «быстрые» молекулы, поэтому средняя кинетическая энергия оставшихся молекул уменьшается. 10. На 39-й этаж (при подъёме с *первого* этажа). 12. а) 1,44 км/с. б) 73%. 13. В конечном состоянии может быть: только лёд — тогда его температура не выше  $0^\circ\text{C}$ ; лёд и вода — тогда их температура равна  $0^\circ\text{C}$ ; только вода — тогда её температура не ниже  $0^\circ\text{C}$ . 14. а) Не менее 29,6 кг; б) не более 359 г; в) больше 359 г, но меньше 29,6 кг. 15.  $77^\circ\text{C}$ . 16.  $t \geq 123^\circ\text{C}$ . 17. 112 г. 18.  $-2,9^\circ\text{C}$ . 19. 41 мин. 20.  $21^\circ\text{C}$ . 21. а)  $-2,5^\circ\text{C}$ ; б)  $7,8^\circ\text{C}$ . 22.  $3,36 \cdot 10^5 \text{ Дж/кг}$ . 23.  $15,3^\circ\text{C}$ . 24. 3,6 г. 25. 50 г.

## Глава VII

§ 35. 1. а) Могут: если все шарики имеют заряд одного знака; б) не могут, потому что среди трёх заряженных шариков хотя бы два будут иметь заряды одного знака. 2. Тело 2. 3. Положительный. 4. Закон сохранения энергии и закон сохранения импульса. 5. Часть свободных электронов, притягиваясь к заряженной палочке, переместится с гильзы 2 на гильзу 1. 6. Свободные электроны гильзы притянутся к положительно заряженной палочке, поэтому на ближней к палочке части гильзы появится *отрицательный* электрический заряд, а на дальней её части из-за недостатка электронов возникнет *положительный* заряд. В результате гильза будет притягиваться к палочке: отрицательные заряды на гильзе находятся *ближе* к палочке, поэтому они будут взаимодействовать с палочкой сильнее, чем положительные. 7. Гильза В заряжена отрицательно или не заряжена. 8. а)  $6 \cdot 10^{23}$ ; б) 10; в)  $6 \cdot 10^{24}$ ; г)  $-10^6$  Кл (округлено). д)  $10^6$  Кл (округлено). 9. Силы электрического отталкивания электронов в  $4,2 \cdot 10^{42}$  раз больше сил их гравитационного притяжения. Расстояние между частицами не имеет значения, потому что зависимость сил от расстояния одинакова для закона Кулона и закона всемирного тяготения. 10. а) Силы взаимодействия шариков не изменятся; б) направление каждой силы, действующей на шарик, изменится на противоположное: если шарики притягивались, то они станут отталкиваться, а если шарики отталкивались, то они станут притягиваться. Модуль сил взаимодействия не изменится; в) силы взаимодействия шариков увеличатся в  $n^2$  раз; г) силы взаимодействия шариков увеличатся в  $n^2$  раз; д) силы взаимодействия шариков уменьшатся в  $n$  раз. 11.  $5,4 \cdot 10^8$ ; лишним данным является расстояние между шарами. 12. а) На расстоянии 5 см от шарика с зарядом  $q$ ; б) заряд третьего шарика

должен быть положительным. В таком случае, при смещении третьего шарика в сторону любого из заряженных шариков, на концах стержня будет «побеждать» сила отталкивания со стороны того шарика, к которому он приближается. В результате равнодействующая приложенных к третьему шарiku сил будет стремиться вернуть шарик в положение равновесия.

13. Третий шарик надо поместить на расстоянии 20 см от шарика с зарядом  $q$  и на расстоянии 40 см от шарика с зарядом  $-4q$  (при этом шарик с зарядом  $q$  будет находиться между третьим шариком и шариком с зарядом  $-4q$ ).

14. а) Этой точкой является середина отрезка, соединяющего данные заряды; б) искомые точки лежат на серединном перпендикуляре к отрезку, соединяющему данные заряды.

15. а) Изменятся на противоположные: до соприкосновения шарик притягивались, а после соприкосновения будут отталкиваться; б) уменьшится в 1,25 раза.

16. В первых трёх случаях достаточно делить заряд шарика пополам, приводя заряженный шарик в соприкосновение с незаряженным. Чтобы получить шарик с зарядом 3 нКл, можно привести в соприкосновение шарик с зарядами 2 нКл и 4 нКл.

17. Нити отклонены на *одинаковый* угол от вертикали.

20. а) Нет; б) на сфере образуется положительный заряд, а на стержне и стрелке — отрицательный; в) стрелка электромметра вернётся в первоначальное положение.

21. а) Да; б) сфера, стержень и стрелка приобретут отрицательный заряд; в) электромметр останется заряженным.

22. а) заряды палочки и электромметра имеют противоположные знаки; б) увеличился.

23. а)  $-5e$ ; б) 0. в)  $3e$ .

24. Заряд каждой из гильз стал равен  $-1$  нКл.

25. 3,6 мкН.

26.  $4,1 \cdot 10^{-7}$  Кл. 27. 17,3 см. 28. Нет. Шарик может быть и незаряженным.

30. Шарик станет совершать колебания, касаясь поочерёдно то одной пластины, то другой до тех пор, пока пластины не разрядятся.

31. 1,7 м. 32. Сила направлена вертикально вниз. 33. 1,44 мкН; вправо.

34. а) 5 мН; б) 35 мН. 36. Шар  $A$  останется заряженным положительно, а шар  $B$ , в зависимости от расстояния между ним и палочкой, может стать заряженным отрицательно, стать нейтральным или остаться положительно заряженным.

37. В 2 раза. 38. 5 мкКл и 3 мкКл или  $-5$  мкКл и  $-3$  мкКл. 39. 0,6 мкКл; 162 мН.

§ 36. 1. 2 мкН; вниз. 2. Направление напряжённости поля в данной точке пространства совпадает с направлением силы, действующей на *положительный* пробный заряд, помещённый в эту точку. Поскольку положительный пробный заряд будет отталкиваться от положительного точечного заряда, напряжённость поля положительного точечного заряда во всех точках пространства направлена от этого заряда. 4. Модуль напряжённости поля точечного заряда  $Q$  на расстоянии  $r$  от заряда выражается формулой

$$E = k \frac{Q}{r^2}. \quad 5. 10 \text{ Н/Кл}. \quad 6. \text{ а) } 4 \text{ нКл или } -4 \text{ нКл}; \text{ б) } 900 \text{ Н/Кл}; 400 \text{ Н/Кл};$$

$$36 \text{ Н/Кл}. \quad 7. \text{ в) Нулю}. \quad 8. \text{ а) } 100 \text{ Н/Кл}; \text{ б) } 200 \text{ Н/Кл}. \quad 9. \text{ б) } E_1 = \frac{kq}{h^2 + l^2}.$$

$$\text{в) } E = 2 \frac{kqh}{\sqrt{(h^2 + l^2)^3}}. \quad 10. \text{ б) } 2 \frac{kql}{\sqrt{(h^2 + l^2)^3}}. \quad 13. \text{ Линии напряжённости элек-}$$

трического поля не могут пересекаться. 14. Только направлением вектора напряжённости поля. 15. Только направлением вектора напряжённости поля. 16. б) 3 см. 18. На рисунке 36.7,  $a$  изображён результат опыта, в котором под стеклом находится небольшое заряженное тело, а на рисунке 36.7,  $b$  — результат опыта, в котором под стеклом находятся два

небольших заряженных тела с равными по модулю, но противоположными по знаку зарядами. 19. а) Нулю; б) 15 кН/Кл. 20. а)  $1,5 \cdot 10^4$  Н/Кл; б) 1,9 кН/Кл. 21. 10 кН/Кл; напряжённость поля направлена вверх. 22. 18 кВ/м; 90 мкН. 23. а) Вправо; б) влево; в) вниз; г) вверх. 24. В обоих случаях модуль напряжённости поля равен нулю. 25.  $4,75 \cdot 10^{14}$  м/с<sup>2</sup>. 26. а) Нулю; б) нулю; в) 3,2 кН/Кл; г) 2,2 кН/Кл. 27.  $a/6$ . 28. Векторы напряжённости полей, создаваемых каждым из зарядов, направлены влево, причём модуль вектора напряжённости поля, создаваемого зарядом  $2q$  в точке  $A$ , в 2 раза больше модуля вектора напряжённости поля, создаваемого зарядом  $-q$ . Вектор напряжённости результирующего поля направлен влево. Модуль напряжённости поля уменьшится в 3 раза. 29. а)  $-3q$ ; б)  $+q$  и  $-7q$ ; в)  $-2q$  и  $-4q$ . 30. 23 нКл. 31. 262 кН/Кл; вертикально вверх. 32. а) 1 см; б) 39 см. 33. 90 Н/Кл. 34. 11,5 кН/Кл. 35. Заряд  $q_A$  положительный, а заряд  $q_B$  — отрицательный. Модуль заряда  $q_A$  в 2 раза больше, чем модуль заряда  $q_B$ . 36. а) Углы

отклонения нитей одинаковы; б)  $E = \frac{4mg|q_1 - q_2|}{q_1q_2} \operatorname{tg}\alpha$ .

$$37. \Delta p = 2\sqrt{2mh(mg + qE)}.$$

§ 37. 1. Влево. 2. Концентрация молекул в газах во много раз меньше, чем в жидкостях и твёрдых телах. 3. 36 Н/Кл. 4.  $F = k \frac{|q_1||q_2|}{\epsilon r^2}$ . 5. Например, спирт. 6. а) Вследствие электрического отталкивания одноимённо заряженных шариков; б) да; г)  $\frac{F_g}{F_T} = \operatorname{tg}\alpha$ ; д)  $r = 2l \sin\alpha$ ; е) например,  $q_1q_2 = \frac{4l^2mg \sin^3\alpha}{k \cos\alpha}$ ; ж) можно выразить любую из величин  $m$ ,  $l$ ,  $q_1$  и  $q_2$  через остальные величины и угол  $\alpha$  (угол  $\alpha$  выразить через другие величины будет сложно). Например, если заданы все величины, кроме массы шариков  $m$ , её можно найти по формуле  $m = \frac{q_1q_2k \cos\alpha}{4l^2g \sin^3\alpha}$ . 7. а) Во-первых, на погружённые в жидкость шарики действует сила Архимеда. Во-вторых, сила взаимодействия между шариками уменьшилась; б)  $\epsilon = \frac{\rho_{ш}}{\rho_{ш} - \rho_{ж}}$ . 8. а) Часть  $A$  будет заряжена положительно, часть  $B$  — отрицательно; б) части  $A$  и  $B$  будут не заряжены. в) если тело изготовлено из проводника, то часть  $A$  будет заряжена отрицательно, часть  $B$  — положительно. Если тело изготовлено из диэлектрика, то части  $A$  и  $B$  будут не заряжены. 9. Шарики будут притягиваться независимо от материала, из которого они изготовлены. 10. Уменьшатся в 2,1 раза. 11. В областях  $A$  и  $B$  напряжённость электрического поля будет равна нулю независимо от знака заряда, сообщённого шару. 12. Расстояние между зарядами надо уменьшить в 9 раз. 13. 13,8 см. 14.  $\epsilon = 6$ . 15. 18 мН. 16. Например, в спирте. 18. 13 см. 19. 1800 Н/Кл; 450 Н/Кл.

§ 38. 1. Работа поля положительна, потому что в этом случае направленные силы совпадают с направлением перемещения. Если изменить знак заряда, то работа поля станет отрицательной, потому что направление силы будет противоположно направлению перемещения. 2. Нулю, потому что в этом случае сила перпендикулярна перемещению. 3. Три:  $qEa$ ,  $0$ ,  $-qEa$ . 4. Нулю. 5. Одинаковую. 6. Работа поля положительна. Потенциальная энергия заряда уменьшается. 7. Красным надо обвести три точки, находящиеся левее точки  $M$  на рисунке, синим — три точки правее точки  $M$ , а зелёным — две точки, находящиеся на одной вертикали с точкой  $M$ . 9. 100 В. 10. а) Поле совершает отрицательную работу; б)  $-10^{-5}$  Дж. 13. Около 220 В (напряжение в квартирной электрической сети!). Мы не ощущаем этого напряжения, потому что человеческое тело является проводником, в котором происходит перераспределение зарядов, в результате чего суммарная напряжённость поля внутри тела становится равной нулю. 14. Нулю, потому что при перемещении заряда вдоль линии, *перпендикулярной* напряжённости поля, работа поля равна нулю. 16. Да, является. 17. а) Уменьшается; б) Не изменяется; в) Потенциальная энергия электрона увеличилась на  $8 \cdot 10^{-17}$  Дж; г) Кинетическая энергия электрона уменьшилась на  $8 \cdot 10^{-17}$  Дж; д)  $1,3 \cdot 10^7$  м/с. 18. а) Через  $9,1 \cdot 10^{-9}$  с; б) 3,6 см. в)  $8 \cdot 10^6$  м/с. 19. а) По параболе; б)  $a = \frac{qE}{m}$ ;

в)  $v = \sqrt{v_0^2 + \left(\frac{qEt}{m}\right)^2}$ . 20. а) 2 мДж; б) 0. 21. Значения работы одинаковы.

22. 2 кВ. 23. 4 мДж. 24. а) 0,7 мДж; б) Уменьшилась на 0,7 мДж; в) Потенциал начальной точки выше, чем конечной, на 69,3 кВ. 25. 0,9 мДж. 26. Не могут. 27. 25 см. 28. 132 мН. 29. а) Кинетическая энергия протона увеличилась на  $2 \cdot 10^{-18}$  Дж; б) Напряжённость электрического поля равна 62,5 В/м; в) Потенциальная энергия протона увеличилась бы на  $2 \cdot 10^{-18}$  Дж, а его кинетическая энергия уменьшилась бы на  $2 \cdot 10^{-18}$  Дж. 30. 0,4 мкКл. 31. 500 кВ/м. 32.  $T = 3(mg + qE)$ .

§ 39. 2. 5 мкФ. 3. а) Не изменится; б) не изменится. 6. а) Увеличится в 4 раза; б) уменьшится в 2 раза; в) увеличится в 3 раза. 8. 5 нКл. 9. а) Напряжённость поля между пластинами не изменилась; б) напряжение между пластинами увеличилось в 4 раза. 10. Энергия конденсатора *увеличивается*, потому что при удалении обкладок друг от друга мы совершаем положительную работу: направление прикладываемой нами силы совпадает с направлением перемещения. 12. а) Не изменяется; б) уменьшается; в) увеличивается; г) увеличивается. 13. а) Не изменяется; б) увеличивается; в) уменьшается; г) уменьшается. 14. а) Не изменяется; б) увеличивается; в) увеличивается вследствие увеличения ёмкости при неизменном напряжении между обкладками; г) увеличивается за счёт энергии источника тока, потому что увеличивается заряд обкладок конденсатора; д) соответствует. 15. а) Не изменяется; б) уменьшается;

в) уменьшается; г) соответствует. 16. а)  $a_x = 0$ ;  $a_y = \frac{qU}{md}$ . б)  $v_x = v_0$ ;

$v_y = \frac{qUt}{md}$ ; в)  $x = v_0 t$ ;  $y = \frac{qUt^2}{2md}$ ; г) Начальная скорость частицы должна

удовлетворять неравенству  $v_0 > \frac{l}{d} \sqrt{\frac{qU}{m}}$ . 17. а)  $\operatorname{tg} \alpha = \frac{qUl}{mdv_0^2}$ ;

б)  $v = \sqrt{v_0^2 + \left(\frac{qUl}{dmv_0}\right)^2}$ . 18. а) По прямойлинейной; б)  $a_x = \frac{qU}{md}$ ;

в)  $a = \sqrt{\left(\frac{qU}{md}\right)^2 + g^2}$ ; г)  $t = d \sqrt{\frac{m}{qU}}$ . 19. На первый; в 3 раза. 20. На втором;

в 3 раза. 21. На 300 мкКл. 22. 2 кВ. 23. 0,4 мкКл. 24. 0,4 нФ. 25. 5 мДж. 26. 88,5 пФ. 27. Энергия электрического поля конденсатора увеличилась в 1,5 раза. 28. 6. 29. а) Больше 142 В; б) на положительно заряженную пластину; в) 1,5 мм; г) 0,07; д) потенциальная энергия уменьшится; е) кинетическая энергия увеличится. 30. а) 1,2 мН; б)  $3,8 \cdot 10^4$  В/м;

в) 1,9 кВ. 31. 4,5 мкДж. 32. В 4 раза. 33.  $U = \varphi_1 - \varphi_2 = \frac{mdv_0^2 \operatorname{tg} \alpha}{eL}$ .

## Глава VIII

§ 40. 1. Носителями заряда в металлах являются свободные электроны. Заряд электронов отрицательный, а за направление тока принимают направление движения *положительно* заряженных частиц. Поэтому направление движения свободных электронов противоположно направлению электрического тока. 3. В нагревании проводников, по которым идёт ток. 4. Вследствие прохождения электрического тока через электролит (например, раствор медного купороса) могут происходить химические реакции. 5. Проводник с током действует на магнитную стрелку; проводники с током взаимодействуют: притягиваются или отталкиваются. 7. а) Сопротивление проводника 2 больше; б)  $R_1 = 0,25$  Ом;  $R_2 = 1,5$  Ом. 9. Потому что у этих металлов малые удельные сопротивления (у серебра ещё меньше, но оно слишком дорого). 10. а) 1 мм<sup>2</sup>; б) 0,17 Ом. 11. Вольтамперной характеристике металлического провода соответствует график красного цвета. 16. Не может. 17.  $R = nr$ . 18. а)  $\frac{U_1}{U_2} = \frac{R_1}{R_2}$ ; б)  $U_1 = 10$  В;

$U_2 = 30$  В. 19. а) 8 В; б) 2 А; в)  $R_1 = 2$  Ом;  $R_2 = 4$  Ом. 23.  $R = \frac{R_1 R_2}{R_1 + R_2}$ .

25. Не может. 26.  $R = \frac{r}{n}$ . 27. а)  $\frac{I_1}{I_2} = \frac{R_2}{R_1}$ ; б)  $I_1 = 3$  А;  $I_2 = 1$  А. 28. а) Параллельно. б) 2 А; в)  $R_1 = 6$  Ом;  $R_2 = 3$  Ом. 29. Напряжение на проводниках будет одинаковым. 30.  $U_1 = 15$  В;  $U_2 = 5$  В. 31. Сила тока в амперметре должна быть равна силе тока в данном проводнике. 32. Напряжение на вольтметре должно быть равно напряжению на данном проводнике. 33. 0,15 А. 34. 13,1 м. 35. а) Увеличится в 4 раза; б) уменьшится в 2 раза; в) не изменится. 36. 4 А. 37. 0,9 В. 38. 0,1 А.

39. Из 20. 40. 4 А. 42. 10 В и 15 В. 43. 60 В; 60 В; 60 В; 120 В. 44. Резисторы могут быть соединены и параллельно: в таком случае их сопротивления равны. 45. Диаметр второго провода в 2 раза больше. 46. 336 м. 49. а) 0,5 А; б) 3 В; 7 В; в) 40 Ом. 50. 100 м. 53. 2 Ом и 8 Ом.

54. 1 Ом или 16 Ом. 55. 40 мВ/м. 56.  $\frac{R_1}{R_2} = 3$ . 57. 261 Ом.

§ 41. 5. а) Для сравнения количества теплоты, выделившегося в последовательно соединённых проводниках, удобнее использовать формулу  $Q = I^2 R t$ ; б)  $Q_2 = 2,4$  кДж. в)  $I_1 = I_2 = 1$  А. 6. Во втором проводнике выделится в 2 раза большее количество теплоты, чем в первом. 7. а) Для сравнения количества теплоты, выделившегося в параллельно соединённых проводниках,

удобнее использовать формулу  $Q = \frac{U^2}{R} t$ ; б)  $Q_2 = 150$  Дж; в)  $U_1 = U_2 = 1$  В.

8. В первом проводнике выделится в 2 раза большее количество теплоты, чем во втором. 9. а) Если проводники соединены параллельно,  $\frac{R_1}{R_2} = 4$ ;

б) Если проводники соединены последовательно,  $\frac{R_1}{R_2} = 0,25$ . 11. При

последовательном соединении лампа 2 горит ярче, потому что при последовательном соединении большее количество теплоты выделяется в проводнике, сопротивление которого больше. 12. Сопротивление проводов намного меньше, чем сопротивление нагревательного элемента. 14. а) Для сравнения значений мощности в последовательно соединённых проводниках удобнее использовать формулу  $P = I^2 R$ ; б)  $P_2 = 36$  Вт; в)  $I_1 = I_2 = 3$  А. 15. В первом проводнике мощность тока в 2 раза больше, чем во втором. 16. а) Для сравнения значений мощности в парал-

лельно соединённых проводниках удобнее использовать формулу  $P = \frac{U^2}{R}$ ;

б)  $P_2 = 16$  Вт. в)  $U_1 = U_2 = 8$  В. 17. В первом проводнике мощность тока в 3 раза больше, чем во втором. 19. а) 24,2 Ом; б) 9,1 А; в) за 2 мин 48 с. 20. Максимальная мощность выделяется при параллельном соединении

элементов, она выражается формулой  $P = \frac{U^2(R_1 + R_2)}{R_1 R_2}$ . Минимальная (не равная нулю) мощность выделяется при последовательном соединении

элементов, она выражается формулой  $P = \frac{U^2}{R_1 + R_2}$ . 21. 60 кДж. 22. 3 А.

23. 60 Кл. 24. 7 кДж. 25. 63 кДж. 26. 0,7 Вт. 27. 60 кДж. 28. а) 13,3 Ом; б) 480 Вт. 29. 80 Вт и 160 Вт. 30. а) 484 Вт; б) 242 Вт; в) 968 Вт. 31. 70 %.

32.  $5 \cdot 10^{20}$ . 33. а) Наибольшее напряжение на резисторе 4, наименьшее — на резисторах 1 и 2; б) Наибольшая сила тока в резисторе 4, наименьшая — в резисторах 1 и 2; в) Наибольшая мощность тока в резисторе 4, наименьшая — в резисторах 1 и 2; г)  $P_2$  станет равной нулю,  $P_3$  увеличится,  $P_4$  не изменится; д)  $P_2$  увеличится,  $P_3$  уменьшится,  $P_4$  не изменится.

34.  $\frac{Q_2}{Q_3} = 2,37$ . 35. Выделяемая в проводе мощность увеличится на 33 %.  
 36. 50 Ом и 200 Ом. 37. За 15 с. 38. 50 мин; 12 мин. 39. См. рисунок 4.

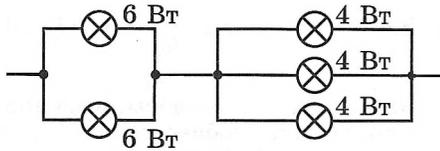


Рис. 4

§ 42. 4. Сила тока в цепи максимальна при сопротивлении внешней цепи, равном нулю:  $R = 0$ . Максимальное значение силы тока равно 6 А.

5. а) 
$$\begin{cases} I_1 = \frac{\mathcal{E}}{R_1 + r}; \\ I_2 = \frac{\mathcal{E}}{R_2 + r}; \end{cases} \quad \text{б) } r = \frac{I_1 R_1 - I_2 R_2}{I_2 - I_1}; \quad \text{в) } \mathcal{E} = \frac{I_1 I_2 (R_2 - R_1)}{I_1 - I_2}. \quad \text{6 а) } 2 \text{ Ом.}$$

б) 6 В. 8. Из формулы  $U = \mathcal{E} - Ir$  следует, что  $U = \mathcal{E}$  при  $I = 0$ . Из формулы закона Ома для полной цепи следует, что сила тока  $I$  стремится к нулю, когда сопротивление  $R$  внешней цепи стремится к бесконечности. А бесконечно большое сопротивление внешней цепи соответствует тому, что полюса источника разомкнуты. 9. а) 6 В; б) 2 Ом. 10.  $\mathcal{E} = 12$  В;  $r = 2$  Ом. 11. Закон Ома для участка цепи соответствует случаю, когда сила тока и напряжение изменяются при постоянном сопротивлении участка цепи. А изображённый на рисунке 42.3 график соответствует случаю, когда сила тока и напряжение изменяются вследствие того, что сопротивление внешней цепи *изменяется*. 13. а)  $R_1 = 0$ ;  $R_2 = 4$  Ом; б) Увеличилось в 2 раза; в) 4 Ом. 15. а) 2 Ом; 8 Ом; 198 Ом; б) 3 А; 1,2 А; 0,06 А; в) чем ближе КПД источника тока к 100 %, тем больше сопротивление внешней цепи и тем меньше сила тока в цепи. Когда КПД источника тока стремится к 100 %, сопротивление внешней цепи стремится к бесконечности, а сила тока в цепи стремится к нулю — это соответствует размыканию цепи. 16. 3 В. 17. 3 А; 15 В. 18. 2 Ом. 19. 12 кДж. 20. 90 Дж. 21. 4,5 В. 22. Сопротивление реостата при втором положении ползунка больше на 6 Ом. 23. 2 Ом. 24. 36 В; 0,5 Ом. 25. 4 лампы. 26. 2 А. 27. 2 Ом. 29. 4 Ом. 30. 20 А. 31. 90 %.

\*§ 43. 1. а) Параллельно соединённые резисторы 1 и 2 можно заменить одним резистором сопротивлением  $R_{12} = \frac{2}{3}$  Ом. Последовательно соединённые резисторы 4 и 5 можно заменить одним резистором сопротивлением  $R_{45} = 9$  Ом; б) последовательно соединённые резисторы  $R_{12}$  и  $R_3$  можно заменить одним резистором  $R_{123} = 3\frac{2}{3}$  Ом. После этого параллельно соединённые резисторы  $R_{123}$  и  $R_{45}$  можно заменить одним резистором, сопротивление которого равно сопротивлению данного участка цепи; в)  $R = \frac{99}{38}$  Ом. 2.  $R = \frac{19}{26}$  Ом. 3. а) Равны нулю разность потенциалов

между точками  $A$  и  $C$ , а также разность потенциалов между точками  $B$  и  $D$ , потому что точки каждой пары этих точек соединены проводом с пренебрежимо малым сопротивлением; б) см. рисунок 5. Точка  $AC$  представляет собой «объединение» точек  $A$  и  $C$ , а точка  $BD$  — «объединение» точек  $B$  и  $D$ . Обратите внимание: резисторы 1, 2, 3 на самом деле соединены *параллельно*, хотя при первом взгляде на схему можно было решить, что они соединены последовательно;

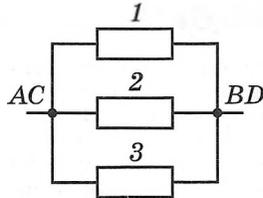


Рис. 5

в)  $R = \frac{6}{11}$  Ом. 4. а) Равна нулю разность потенциалов между точками  $B$  и  $D$ , потому что они соединены проводом. Обратите внимание: разность потенциалов между точками  $A$  и  $C$  в данном случае не равна нулю! б) См.

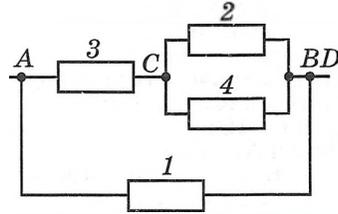


Рис. 6

рисунок 6. в)  $R = \frac{13}{16}$  Ом. 5.  $P = \frac{\mathcal{E}^2 R}{(R+r)^2}$ .

6.  $P = (\mathcal{E} - Ir)I$ . 7. а) Функция  $P(I)$  достигает

максимума при  $I = \frac{\mathcal{E}}{2r}$ . б) При  $R = r$ . 8. 50 %. 9. 80 %. 10. Через конденсатор не может течь *постоянный* электрический ток.

11. а) 12 В; б) напряжение между точками  $B$  и  $D$  равно нулю; в) 12 В; г)  $2,4 \cdot 10^{-5}$  Кл.

12. а)  $U = \frac{\mathcal{E}R}{R+r} = 20$  В; б)  $q = \frac{\mathcal{E}RC}{R+r} = 80$  нКл. 13. а) Ток будет течь через

источник тока и резисторы 1, 3. б)  $R = R_1 + R_3 = 11$  Ом. в) 12 Ом. г) 0,5 А. д) 4 В. е) 4 В. ж) 32 мкКл. з) Отрицательный. 14. 1 А. 15.  $R = 18$  Ом;  $I_1 = I_6 = 2$  А,  $I_3 = 1,2$  А,  $I_2 = I_4 = I_5 = 0,8$  А. 16. 12 В. 17. 4 А. 18. Нет; 2 А. 19. 2 Вт. 20. 6 В. 21. Заряд второго конденсатора в 5 раз больше, чем заряд первого. 22. 1,32 Ом. 23. 211 В. 24. 8 мкКл.

§ 44. 1. Ток, обусловленный движением ионов *любого* знака, направлен от положительного анода к отрицательному катоду. 5. С отрицательным. 6. Ток может течь только от холодного электрода к нагретому. Электроны будут двигаться от нагретого электрода к холодному. 7. Ионы *движутся* в *противоположных* направлениях, но обусловленный их движением ток направлен одинаково — от положительного полюса источника тока к отрицательному. 8. Напряжение уменьшится. 9. 15 мкм. 10. 333 К. 11. 37 кВт · ч.

§ 45. 1. Совпадает. 2. а) Сурьма, фосфор; б) индий, скандий, галлий. 3. а) 6 Ом; б) 16 Вт; 67 %; в) 18 Вт; 50 %. 5. а) С валентностью, большей чем 5, например мышьяк; б) с валентностью, меньшей чем 4, например галлий. 6. На рисунке 45.13, а — в прямом направлении, на рисунке 45.13, б — в обратном. 8. В  $9,1 \cdot 10^4$  раз. 9. 40 Ом; 25 Ом.

10. б)  $3r$ ; в)  $\frac{2\mathcal{E}^2}{9r}$ ; г) 67 %; д)  $4r$ ;  $\frac{3\mathcal{E}^2}{16r}$ ; 75 %. 11. 300 Ом; 100 Ом.

## ПРЕДМЕТНО-ИМЕННОЙ УКАЗАТЕЛЬ

- Абсолютная шкала температур 14  
Адиабатный процесс 57  
Аморфные тела 49  
Атомная единица массы 8  
Вольтамперная характеристика 137  
Второй закон термодинамики 73  
Глобальное потепление 74  
*Дальтон Дж.* 4  
Действия электрического тока 136  
*Джоуль Дж.* 149  
Диффузия 5  
Диэлектрики 88  
Диэлектрическая проницаемость 111  
Дуговой разряд 179  
Дырка 183  
Закон Авогадро 7  
— Бойля — Мариотта 17  
— Гей-Люссака 15  
— Дальтона 27  
— Джоуля — Ленца 149  
— Кулона 91  
— Ома для полной цепи 159  
— Ома для участка цепи 136  
— сохранения электрического заряда 88  
— Фарадея 175  
— Шарля 16  
Измерение влажности 41  
Изобарный процесс 13  
Изотермический процесс 17  
Изохорный процесс 16  
Ион 88, 138, 174, 177  
Испарение 10  
Источник тока 157  
*Карно С.* 56  
Кипение 39  
Количество теплоты 54  
Конденсатор 125  
Конденсация 37  
КПД источника тока 162  
— теплового двигателя 71  
Кристаллы 6, 48  
*Кулон Ш.* 91  
*Ленц Э. Х.* 149  
*Ломоносов М. В.* 4  
Макроскопические параметры 6  
*Максвелл Дж.* 4  
*Менделеев Д. И.* 26  
Микроскопические параметры 6  
Моль 7  
Молярная масса 10  
Мощность тока 152  
Напряжение 117  
Напряжённость  
электрического поля 98  
Насыщенный пар 37  
Ненасыщенный пар 37  
Необратимые процессы 73  
*Ом Г.* 136  
Основное уравнение  
молекулярно-кинетической  
теории 30  
Основные элементы теплового  
двигателя 70  
Относительная атомная  
и молекулярная масса 9  
— влажность воздуха 40  
Параллельное соединение  
проводников 142  
Первый закон  
термодинамики 56  
Полупроводники 185  
Полупроводниковый диод 186  
Поляризация диэлектриков 111  
Последовательное соединение  
проводников 140  
Постоянная Больцмана 25  
Потенциал 118  
Принцип действия теплового  
двигателя 70  
— суперпозиции полей 99  
Проводники 88  
Психрометр 41  
Работа поля 116  
— тока 148  
Разность потенциалов 117  
Свободные заряды 88  
Сила тока 135  
Температура абсолютная 14  
Термистор 184  
*Томсон У.* 14  
Точка росы 42  
Транзистор 187  
Удельное сопротивление 137  
Уравнение Клапейрона 23  
— Менделеева — Клапейрона 25  
— состояния идеального газа 25  
*Фарадей М.* 98  
Фоторезисторы 184  
Циклические процессы 65  
*Эйнштейн А.* 4  
Электрический ток в газах 176  
— — в жидкостях 173  
— — в полупроводниках 182  
Емкость 125  
Электролиты 88, 138, 173  
Электрон 87  
Энергия заряженного  
конденсатора 128  
— электрического поля 128

# Оглавление

## МОЛЕКУЛЯРНАЯ ФИЗИКА И ТЕРМОДИНАМИКА

### Глава V. МОЛЕКУЛЯРНАЯ ФИЗИКА

|                                                                                        |    |
|----------------------------------------------------------------------------------------|----|
| <b>§ 25. Строение вещества</b> .....                                                   | 4  |
| 1. Основные положения молекулярно-кинетической теории..                                | 4  |
| 2. Основная задача молекулярно-кинетической теории .....                               | 6  |
| 3. Агрегатные состояния вещества .....                                                 | 6  |
| 4. Количество вещества .....                                                           | 7  |
| 5. Молярная масса .....                                                                | 10 |
| *6. Решение более сложных задач .....                                                  | 10 |
| <b>§ 26. Изопроцессы</b> .....                                                         | 13 |
| 1. Изобарный процесс (при постоянном давлении).....                                    | 13 |
| 2. Изохорный процесс (при постоянном объёме).....                                      | 16 |
| 3. Изотермический процесс (при постоянной температуре)...                              | 17 |
| *4. Газовые процессы, не являющиеся изопроцессами.....                                 | 18 |
| <b>§ 27. Уравнение состояния идеального газа</b> .....                                 | 23 |
| 1. Уравнение Клапейрона.....                                                           | 23 |
| *2. Применение уравнения Клапейрона<br>в более сложных случаях .....                   | 24 |
| 3. Уравнение состояния идеального газа<br>(уравнение Менделеева — Клапейрона).....     | 25 |
| *4. Применение уравнения Менделеева — Клапейрона<br>в более сложных случаях .....      | 27 |
| 5. Закон Дальтона.....                                                                 | 27 |
| <b>§ 28. Абсолютная температура<br/>и средняя кинетическая энергия молекул</b> .....   | 30 |
| 1. Основное уравнение молекулярно-кинетической теории....                              | 30 |
| 2. Связь между температурой<br>и средней кинетической энергией молекул .....           | 31 |
| 3. Скорости молекул.....                                                               | 32 |
| *4. Вывод основного уравнения<br>молекулярно-кинетической теории идеального газа ..... | 33 |
| <b>§ 29. Насыщенный пар. Влажность</b> .....                                           | 37 |
| 1. Насыщенный и ненасыщенный пар.....                                                  | 37 |
| 2. Зависимость давления насыщенного пара<br>от температуры .....                       | 38 |
| 3. Кипение.....                                                                        | 39 |
| 4. Влажность воздуха .....                                                             | 40 |
| <b>§ 30. Свойства жидкостей и твёрдых тел</b> .....                                    | 46 |
| 1. Модель строения жидкостей.....                                                      | 46 |
| 2. Поверхностное натяжение .....                                                       | 46 |
| *3. Модель строения твёрдых тел .....                                                  | 48 |
| *4. Механические свойства твёрдых тел .....                                            | 50 |
| <b>Главное в главе V</b> .....                                                         | 53 |

### Глава VI. ТЕРМОДИНАМИКА

|                                                                        |    |
|------------------------------------------------------------------------|----|
| <b>§ 31. Первый закон термодинамики</b> .....                          | 54 |
| 1. Внутренняя энергия и способы её изменения.....                      | 54 |
| 2. Как внутреннюю энергию частично превратить<br>в механическую? ..... | 55 |
| 3. Первый закон термодинамики.....                                     | 56 |

|                                                                                   |           |
|-----------------------------------------------------------------------------------|-----------|
| 4. Адиабатный процесс.....                                                        | 57        |
| 5. Следствия первого закона термодинамики<br>для изопроцессов.....                | 58        |
| <b>§ 32. Применение первого закона термодинамики<br/>к газовым процессам.....</b> | <b>61</b> |
| 1. Изменение внутренней энергии газа .....                                        | 61        |
| 2. Работа газа .....                                                              | 63        |
| *3. Циклические процессы .....                                                    | 65        |
| <b>§ 33. Тепловые двигатели. Второй закон термодинамики.....</b>                  | <b>70</b> |
| 1. Принцип действия и основные элементы<br>теплового двигателя.....               | 70        |
| 2. Коэффициент полезного действия (КПД)<br>теплового двигателя.....               | 71        |
| *3. Пример расчёта КПД цикла.....                                                 | 72        |
| 4. Второй закон термодинамики.....                                                | 73        |
| 5. Энергетический и экологический кризисы .....                                   | 73        |
| <b>*§ 34. Фазовые переходы.....</b>                                               | <b>76</b> |
| 1. Плавление и кристаллизация.....                                                | 76        |
| 2. Парообразование и конденсация .....                                            | 79        |
| 3. Уравнение теплового баланса<br>при наличии фазовых переходов .....             | 80        |
| <b>Главное в главе VI .....</b>                                                   | <b>84</b> |

## ЭЛЕКТРОСТАТИКА И ПОСТОЯННЫЙ ЭЛЕКТРИЧЕСКИЙ ТОК

### Глава VII. ЭЛЕКТРОСТАТИКА

|                                                                                                 |            |
|-------------------------------------------------------------------------------------------------|------------|
| <b>§ 35. Электрические взаимодействия .....</b>                                                 | <b>86</b>  |
| 1. Два знака электрических зарядов .....                                                        | 86         |
| 2. Носители электрического заряда.<br>Закон сохранения электрического заряда.....               | 87         |
| 3. Электризация через влияние.<br>Перераспределение зарядов .....                               | 89         |
| 4. Единица электрического заряда.<br>Элементарный электрический заряд.....                      | 90         |
| 5. Закон Кулона.....                                                                            | 91         |
| *6. Более сложные задачи .....                                                                  | 92         |
| <b>§ 36. Напряжённость электрического поля.<br/>Линии напряжённости.....</b>                    | <b>98</b>  |
| 1. Напряжённость электрического поля .....                                                      | 98         |
| 2. Линии напряжённости.....                                                                     | 101        |
| *3. Поле равномерно заряженной сферы .....                                                      | 104        |
| <b>§ 37. Проводники и диэлектрики в электрическом поле.....</b>                                 | <b>108</b> |
| 1. Проводники в электрическом поле .....                                                        | 108        |
| 2. Диэлектрики в электрическом поле.....                                                        | 110        |
| *3. Равновесие подвешенных на нитях заряженных шариков<br>в воздухе и в жидком диэлектрике..... | 112        |
| <b>§ 38. Работа электрического поля.<br/>Разность потенциалов (напряжение) .....</b>            | <b>116</b> |
| 1. Работа поля при перемещении заряда .....                                                     | 116        |
| 2. Разность потенциалов (напряжение) .....                                                      | 117        |
| 3. Соотношение между напряжением<br>и напряжённостью для однородного поля .....                 | 119        |

|                                                                                                      |            |
|------------------------------------------------------------------------------------------------------|------------|
| 4. Эквипотенциальные поверхности .....                                                               | 120        |
| *5. Движение заряженной частицы<br>в однородном электрическом поле .....                             | 121        |
| <b>§ 39. Электроёмкость. Энергия электрического поля .....</b>                                       | <b>125</b> |
| 1. Электроёмкость .....                                                                              | 125        |
| 2. Энергия электрического поля .....                                                                 | 128        |
| *3. Движение заряженной частицы в конденсаторе .....                                                 | 130        |
| <b>Главное в главе VII .....</b>                                                                     | <b>134</b> |
| <b>Глава VIII. ПОСТОЯННЫЙ ЭЛЕКТРИЧЕСКИЙ ТОК</b>                                                      |            |
| <b>§ 40. Закон Ома для участка цепи .....</b>                                                        | <b>135</b> |
| 1. Сила тока .....                                                                                   | 135        |
| 2. Закон Ома для участка цепи .....                                                                  | 136        |
| 3. Природа электрического сопротивления.<br>Зависимость сопротивления от температуры .....           | 138        |
| 4. Последовательное и параллельное<br>соединение проводников .....                                   | 140        |
| 5. Измерение силы тока и напряжения .....                                                            | 143        |
| <b>§ 41. Работа и мощность тока .....</b>                                                            | <b>148</b> |
| 1. Работа тока. Закон Джоуля — Ленца .....                                                           | 148        |
| 2. Применение закона Джоуля — Ленца к последовательно<br>и параллельно соединённым проводникам ..... | 150        |
| 3. Мощность тока .....                                                                               | 152        |
| <b>§ 42. Закон Ома для полной цепи .....</b>                                                         | <b>157</b> |
| 1. Источник тока .....                                                                               | 157        |
| 2. Закон Ома для полной цепи .....                                                                   | 159        |
| 3. КПД источника тока .....                                                                          | 162        |
| <b>*§ 43. Дополнительные примеры<br/>расчёта электрических цепей .....</b>                           | <b>165</b> |
| 1. Метод эквивалентных электрических схем .....                                                      | 165        |
| 2. Использование точек с равным потенциалом .....                                                    | 166        |
| 3. Максимальная мощность во внешней цепи .....                                                       | 167        |
| 4. Конденсаторы в цепи постоянного тока .....                                                        | 168        |
| <b>§ 44. Электрический ток в жидкостях и газах .....</b>                                             | <b>173</b> |
| 1. Электрический ток в электролитах .....                                                            | 173        |
| 2. Закон электролиза (закон Фарадея) .....                                                           | 175        |
| 3. Применения электролиза .....                                                                      | 175        |
| 4. Электрический ток в газах и вакууме .....                                                         | 176        |
| 5. Плазма .....                                                                                      | 180        |
| <b>§ 45. Электрический ток в полупроводниках .....</b>                                               | <b>182</b> |
| 1. Полупроводники .....                                                                              | 182        |
| 2. Примесная проводимость полупроводников .....                                                      | 184        |
| 3. Полупроводниковый диод .....                                                                      | 186        |
| *4. Транзистор .....                                                                                 | 187        |
| <b>Главное в главе VIII .....</b>                                                                    | <b>192</b> |
| <b>ЛАБОРАТОРНЫЕ РАБОТЫ .....</b>                                                                     | <b>193</b> |
| <b>ЗАДАНИЯ ДЛЯ ПРОЕКТНО-ИССЛЕДОВАТЕЛЬСКОЙ<br/>ДЕЯТЕЛЬНОСТИ .....</b>                                 | <b>204</b> |
| <b>ПОЛЕЗНЫЕ СОВЕТЫ .....</b>                                                                         | <b>208</b> |
| <b>ОТВЕТЫ И РЕШЕНИЯ .....</b>                                                                        | <b>222</b> |
| <b>Предметно-именной указатель .....</b>                                                             | <b>236</b> |

**ПЛОТНОСТЬ  
НЕКОТОРЫХ ВЕЩЕСТВ**

| Вещество | Плотность, кг/м <sup>3</sup> |
|----------|------------------------------|
| Алюминий | 2 700                        |
| Вода     | 1 000                        |
| Железо   | 7 800                        |
| Золото   | 19 300                       |
| Керосин  | 800                          |
| Лёд      | 900                          |
| Медь     | 8 900                        |
| Нефть    | 800                          |
| Ртуть    | 13 600                       |
| Свинец   | 11 300                       |
| Сталь    | 7 800                        |
| Чугун    | 7 000                        |

**ЗАВИСИМОСТЬ ДАВЛЕНИЯ  
НАСЫЩЕННОГО ВОДЯНОГО  
ПАРА ОТ ТЕМПЕРАТУРЫ**

| Температура<br>$t, ^\circ\text{C}$ | Давление<br>$p_n, \text{кПа}$ |
|------------------------------------|-------------------------------|
| 0                                  | 0,61                          |
| 3                                  | 0,76                          |
| 6                                  | 0,93                          |
| 10                                 | 1,23                          |
| 15                                 | 1,71                          |
| 17                                 | 1,93                          |
| 18                                 | 2,07                          |
| 19                                 | 2,20                          |
| 20                                 | 2,33                          |
| 25                                 | 3,17                          |
| 30                                 | 4,24                          |
| 50                                 | 12,34                         |
| 80                                 | 47,3                          |
| 90                                 | 70,11                         |
| 100                                | 100,0                         |

**УДЕЛЬНАЯ ТЕПЛОЁМКОСТЬ  
НЕКОТОРЫХ ВЕЩЕСТВ**

| Вещество      | $\frac{\text{Дж}}{\text{кг} \cdot \text{К}}$ |
|---------------|----------------------------------------------|
| Алюминий      | 900                                          |
| Вода          | 4 200                                        |
| Железо, сталь | 460                                          |
| Лёд           | 2 100                                        |
| Медь          | 400                                          |
| Свинец        | 130                                          |

Удельная теплота парообразования воды 2,3 МДж/кг.

Удельная теплота плавления льда  $3,3 \cdot 10^5$  Дж/кг.

Температура плавления свинца 327 °С.

**ДИЭЛЕКТРИЧЕСКАЯ  
ПРОНИЦАЕМОСТЬ  
НЕКОТОРЫХ ВЕЩЕСТВ**

| <b>Вещество</b> | <b>Диэлектрическая<br/>проницаемость</b> |
|-----------------|------------------------------------------|
| Вода            | 81                                       |
| Воздух          | 1                                        |
| Керамика        | 20                                       |
| Керосин         | 2,1                                      |
| Парафин         | 2                                        |
| Слюда           | 7,5                                      |
| Спирт           | 26                                       |
| Эбонит          | 3                                        |

**УДЕЛЬНОЕ СОПРОТИВЛЕНИЕ  
НЕКОТОРЫХ МЕТАЛЛОВ И СПЛАВОВ**

| <b>Вещество</b> | <b><math>10^{-8}</math> Ом · м</b> |
|-----------------|------------------------------------|
| Никелин         | 0,42                               |
| Алюминий        | 0,028                              |
| Медь            | 0,017                              |
| Сталь           | 0,12                               |
| Нихром          | 1,1                                |
| Латунь          | 0,071                              |

# ОСНОВНЫЕ ФОРМУЛЫ КУРСА ФИЗИКИ 10 КЛАССА

## Кинематика

$$x = x_0 + v_{0x}t + \frac{a_x t^2}{2} \qquad v_x = v_{0x} + a_x t \qquad (\S 3)$$

$$s_x = v_{0x}t + \frac{a_x t^2}{2} \qquad l = \frac{|v^2 - v_0^2|}{2a} \qquad (\S 3)$$

$$a = \frac{v^2}{r} \qquad v = \frac{2\pi r}{T} \qquad \nu = \frac{1}{T} \qquad \omega = 2\pi\nu \qquad (\S 5)$$

## Динамика

$$\vec{F} = m\vec{a} \qquad \vec{F}_T = m\vec{g} \qquad \vec{F}_1 = -\vec{F}_2 \qquad (\S 6)$$

$$F = G \frac{m_1 m_2}{R^2} \qquad G = 6,67 \cdot 10^{-11} \text{ Н}\cdot\text{м}^2/\text{кг}^2 \qquad (\S 7)$$

$$g = G \frac{M_{\text{Зем}}}{R_{\text{Зем}}^2} \qquad v_1 = \sqrt{R_{\text{Зем}} g} \qquad (\S 7)$$

$$F = k|x| \qquad x = l - l_0 \qquad (\S 8)$$

$$F_{\text{тр. сж}} = \mu N \qquad F_{\text{тр. пок}} \leq \mu N \qquad (\S 9)$$

## Законы сохранения в механике

$$\vec{p} = m\vec{v} \qquad \Delta\vec{p} = \vec{F}\Delta t \qquad \vec{p}_1 + \vec{p}_2 + \dots = \text{const} \qquad (\S 13)$$

$$A = F s \cos\alpha \qquad A_T = mg(h_{\text{н}} - h_{\text{к}}) \qquad (\S 16)$$

$$A_{\text{упр}} = \frac{k(x_{\text{н}}^2 - x_{\text{к}}^2)}{2} \qquad P = \frac{A}{t} = Fv \qquad (\S 16)$$

$$E_p = mgh \qquad E_p = \frac{kx^2}{2} \qquad E_k = \frac{mv^2}{2} \qquad (\S 17)$$

$$E_{\text{мех}} = E_p + E_k \qquad E_p + E_k = \text{const} \qquad \Delta E_{\text{мех}} = A_{\text{тр}} \qquad (\S 18)$$

## Статика

$$\vec{F}_1 + \vec{F}_2 + \dots = 0 \qquad M_1 + M_2 + \dots = 0 \qquad M = Fl \qquad (\S 22)$$

$$p = \frac{F}{S} \qquad p = \rho gh \qquad F_{\Lambda} = \rho g V_{\text{погр}} \qquad (\S 24)$$

# ОСНОВНЫЕ ФОРМУЛЫ КУРСА ФИЗИКИ 10 КЛАССА

## Молекулярная физика

$$N = \nu N_A \qquad m = \nu M \qquad (\S 25)$$

$$\frac{pV}{T} = \text{const} \quad \text{при } m = \text{const} \qquad pV = \frac{m}{M} RT = \nu RT \qquad (\S 27)$$

$$p = \frac{1}{3} n m_0 \overline{v^2} \qquad p = \frac{2}{3} n \overline{E} \qquad \overline{E} = \frac{3}{2} kT \qquad (\S 28)$$

$$\overline{v^2} = \frac{3kT}{m_0} = \frac{3RT}{M} \qquad (\S 28) \qquad \varphi = \frac{p}{p_H} \cdot 100\% \qquad (\S 29)$$

## Термодинамика

$$Q = cm(t_x - t_n) \qquad Q = qm \qquad Q = \Delta U + A_r \qquad (\S 31)$$

$$U = \frac{3}{2} \nu RT \qquad U = \frac{3}{2} pV \qquad A_r = p\Delta V \qquad (\S 32)$$

$$\eta = \frac{A_{\text{пол}}}{Q_1} \cdot 100\% \qquad \eta = \frac{Q_1 - Q_2}{Q_1} \cdot 100\% \qquad \eta_{\text{max}} = \frac{T_1 - T_2}{T_1} \cdot 100\% \qquad (\S 33)$$

$$Q = \lambda m \qquad Q = Lm \qquad (\S 34)$$

## Электростатика

$$F = k \frac{|q_1| \cdot |q_2|}{\epsilon r^2} \qquad k = 9 \cdot 10^9 \frac{\text{Н} \cdot \text{м}^2}{\text{Кл}^2} \qquad (\S 35) \qquad \vec{E} = \frac{\vec{F}}{q} \qquad (\S 36)$$

$$A = qU \quad (\S 38) \qquad C = \frac{q}{U} \qquad C = \frac{\epsilon \epsilon_0 S}{d} \qquad W_p = \frac{qU}{2} = \frac{CU^2}{2} = \frac{q^2}{2C} \qquad (\S 39)$$

## Постоянный электрический ток

### Последовательное соединение

$$I = I_2 = I_3$$

$$U = U_1 + U_2$$

$$R = R_1 + R_2$$

### Параллельное соединение

$$I = I_1 + I_2$$

$$U = U_1 = U_2$$

$$\frac{1}{R} = \frac{1}{R_1} + \frac{1}{R_2}$$

$$Q = I^2 R t \qquad A = IUt \qquad P = IU \qquad (\S 41)$$

$$\mathcal{E} = \frac{A_{\text{ст}}}{q} \qquad I = \frac{\mathcal{E}}{R + r} \qquad U = \mathcal{E} - Ir \qquad I_{\text{кз}} = \frac{\mathcal{E}}{r} \quad (\S 42) \qquad m = \frac{m_0 q}{en} \quad (\S 44)$$