

Р.А. Тиадкова, Ф.С. Цодиков

# Задачи и вопросы по физике



УДК 53(075.3)

ББК 22.3

Г 52

Гладкова Р. А., Цодиков Ф. С. **Задачи и вопросы по физике:** Учеб. пособ.: Для ссузов / Под ред. Р. А. Гладковой. — 9-е изд., испр. и доп. — М.: ФИЗМАТЛИТ, 2006. — 384 с. — ISBN 5-9221-0637-6.

Учебное пособие составлено в соответствии с программой по физике для средних специальных учебных заведений и согласовано с учебником Л. С. Жданова «Физика для средних специальных учебных заведений»; содержит 2125 задач и вопросов разной степени сложности и 104 примера, в которых даны не только подробные решения, но и различные методы решений. Ко всем задачам и вопросам даны ответы, к наиболее трудным — решения или указания к ним. В приложении приведены основные формулы и справочный табличный материал.

Для средних специальных учебных заведений, учащихся средних школ, слушателей подготовительных отделений вузов и лиц, занимающихся самообразованием.

Табл. 24. Ил. 228.

Рецензент:

преподаватель Московского экономико-энергетического колледжа  
Р. А. Дондукова

© ФИЗМАТЛИТ, 1996, 2006

© Р. А. Гладкова, Ф. С. Цодиков, 1996,  
2006

ISBN 5-9221-0637-6

## ОГЛАВЛЕНИЕ

|                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                          |          |
|----------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|----------|
| Предисловие к девятому изданию . . . . .                                                                                                                                                                                                                                                                                                                 | 6        |
| Из предисловия к первому изданию . . . . .                                                                                                                                                                                                                                                                                                               | 6        |
| <b>Глава I. Основы молекулярной физики и термодинамики. . . . .</b>                                                                                                                                                                                                                                                                                      | <b>7</b> |
| 1. Основы молекулярно-кинетической теории . . . . .                                                                                                                                                                                                                                                                                                      | 7        |
| Количество вещества. Масса и размеры молекул и атомов (11).<br>Движение молекул. Диффузия. Броуновское движение (13).<br>Скорости молекул. Опыт Штерна (14). Силы молекулярного<br>взаимодействия. Внутренняя энергия тела (15). Длина свободного<br>пробега молекул (16).                                                                               |          |
| 2. Законы идеальных газов . . . . .                                                                                                                                                                                                                                                                                                                      | 17       |
| Идеальный газ. Давление (23). Основное уравнение молекулярно-кинетической теории газа (25). Уравнение состояния идеального газа. Уравнение Клапейрона—Менделеева (26). Изохорный процесс (30). Изобарный процесс (32). Изотермический процесс (34).                                                                                                      |          |
| 3. Основы термодинамики. . . . .                                                                                                                                                                                                                                                                                                                         | 37       |
| Изменение внутренней энергии тела при теплообмене. Теплота сгорания топлива (44). Изменение внутренней энергии тела при совершении механической работы (46). Внутренняя энергия идеального газа. Работа газа при изменении его объема (48). Первый закон термодинамики. Применение первого закона термодинамики к изопроцессам. Адиабатный процесс (50). |          |
| 4. Свойства паров. Кипение. Водяной пар в атмосфере . . . . .                                                                                                                                                                                                                                                                                            | 54       |
| Парообразование и конденсация. Свойства паров (58). Кипение. Критическое состояние вещества (60). Водяной пар в атмосфере (63).                                                                                                                                                                                                                          |          |
| 5. Свойства жидкостей. . . . .                                                                                                                                                                                                                                                                                                                           | 65       |
| Поверхностное натяжение. Свободная энергия поверхностного слоя жидкости (68). Смачивание. Давление, обусловленное кривизной поверхности. Капиллярные явления (69). Осмотическое давление. Вязкость (72).                                                                                                                                                 |          |
| 6. Свойства твердых тел. Плавление и кристаллизация. Деформации . . . . .                                                                                                                                                                                                                                                                                | 73       |
| Пространственная решетка кристалла (76). Плавление и кристаллизация (77). Фазовые переходы (80). Механическое напряжение. Деформации (82).                                                                                                                                                                                                               |          |
| 7. Тепловое расширение тел . . . . .                                                                                                                                                                                                                                                                                                                     | 85       |
| Линейное и поверхностное тепловое расширение (87). Объемное тепловое расширение (90).                                                                                                                                                                                                                                                                    |          |

|                                                                                                                                                                                                            |            |
|------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|------------|
| <b>Глава II. Основы электродинамики</b> . . . . .                                                                                                                                                          | <b>92</b>  |
| 8. Взаимодействие электрических зарядов. Закон сохранения заряда. Закон Кулона . . . . .                                                                                                                   | 92         |
| 9. Электрическое поле . . . . .                                                                                                                                                                            | 96         |
| Напряженность электрического поля (104). Работа по перемещению заряда в электрическом поле. Электрический потенциал. Разность потенциалов (108).                                                           |            |
| 10. Электрическая емкость проводника. Конденсаторы. Энергия электрического поля конденсатора . . . . .                                                                                                     | 112        |
| 11. Постоянный электрический ток. Электрический ток в металлах. Законы постоянного электрического тока . . . . .                                                                                           | 122        |
| 12. Работа, мощность, тепловое действие электрического тока . . . . .                                                                                                                                      | 143        |
| 13. Электрический ток в электролитах. Гальванические элементы и аккумуляторы . . . . .                                                                                                                     | 156        |
| Электролитическая диссоциация. Электролиз. Законы Фарадея (158). Гальванические элементы и аккумуляторы (163).                                                                                             |            |
| 14. Электрический ток в газах и вакууме . . . . .                                                                                                                                                          | 164        |
| 15. Электрический ток в полупроводниках . . . . .                                                                                                                                                          | 171        |
| 16. Электромагнетизм . . . . .                                                                                                                                                                             | 174        |
| Магнитное поле тока. Магнитная индукция. Напряженность. Магнитный момент контура с током (179). Поток магнитной индукции. Потокосцепление и индуктивность. Работа магнитных сил (185). Сила Лоренца (187). |            |
| 17. Электромагнитная индукция . . . . .                                                                                                                                                                    | 189        |
| ЭДС индукции. Индукционный ток. Закон Ленца (191). Самоиндукция. Энергия магнитного поля (200).                                                                                                            |            |
| <b>Глава III. Колебания и волны</b> . . . . .                                                                                                                                                              | <b>203</b> |
| 18. Механические колебания и волны. Звук . . . . .                                                                                                                                                         | 203        |
| Колебания (208). Волны (215). Звук (217).                                                                                                                                                                  |            |
| 19. Переменный электрический ток . . . . .                                                                                                                                                                 | 219        |
| Зависимость ЭДС индукции от времени. Максимальное и действующее значения ЭДС и силы тока (222). Трансформатор (228).                                                                                       |            |
| 20. Электромагнитные колебания и волны. . . . .                                                                                                                                                            | 230        |
| <b>Глава IV. Оптика. Основы специальной теории относительности</b> . . . . .                                                                                                                               | <b>238</b> |
| 21. Скорость света. Природа света. . . . .                                                                                                                                                                 | 238        |
| 22. Отражение света. Плоские и сферические зеркала. . . . .                                                                                                                                                | 240        |
| 23. Преломление света. Линзы. Угол зрения и оптические приборы. . . . .                                                                                                                                    | 248        |
| Преломление света (251). Линзы собирающие и рассеивающие (255). Угол зрения. Оптические приборы (260).                                                                                                     |            |
| 24. Фотометрия . . . . .                                                                                                                                                                                   | 261        |

---

|                                                                                     |     |
|-------------------------------------------------------------------------------------|-----|
| 25. Явления, объясняемые волновыми свойствами света . . . . .                       | 265 |
| Интерференция света (269). Дифракция и поляризация света (272).                     |     |
| 26. Излучение и спектры. Рентгеновское излучение . . . . .                          | 273 |
| 27. Явления, объясняемые квантовыми свойствами электромагнитного излучения. . . . . | 276 |
| 28. Основы специальной теории относительности . . . . .                             | 280 |
| <br>Глава V. <b>Физика атома и атомного ядра.</b> . . . .                           | 289 |
| 29. Строение атома . . . . .                                                        | 289 |
| 30. Ядерная физика. . . . .                                                         | 293 |
| <br>Глава VI. <b>Некоторые сведения по астрономии.</b> . . . .                      | 299 |
| 31. Некоторые сведения по астрономии. . . . .                                       | 299 |
| Ответы. . . . .                                                                     | 308 |
| Приложения . . . . .                                                                | 360 |

## Предисловие к девятому изданию

Настоящее издание книги является первым, выходящим без моего соавтора — Фридриха Семеновича Цодикова.

Переиздание книги вызвано тем, что, несмотря на большой тираж предыдущего издания, книга давно разошлась и стала труднодоступной.

Материал этого издания несколько расширен, уточнены формулировки некоторых задач, унифицированы термины и устранены всякого рода неточности и замеченные опечатки предыдущего издания.

*Р.А. Гладкова*

## Из предисловия к первому изданию

Сборник «Задачи и вопросы по физике для средних общеобразовательных и средних специальных учебных заведений» составлен в соответствии с действующей учебной программой с учетом современной физической терминологии и СИ.

Книга содержит 2125 задач и вопросов по всем разделам программы.

В начале каждого параграфа Сборника приведены типичные задачи с подробными решениями, что облегчает самостоятельную работу с книгой и позволяет не прибегать к дополнительной литературе. В отдельных случаях приводятся различные приемы решения задач. Всего в сборнике 103 примера.

Число задач, различная степень их сложности, разобранные примеры рассчитаны на прочное закрепление изучаемого программного материала, на формирование навыков и культуры решения задач. Качественные задачи подбирались так, чтобы было возможно уяснить сущность физических законов, уточнить область их применения, понять и объяснить смысл происходящих явлений.

На все вопросы и задачи даны ответы. В большинстве случаев ответы на качественные задачи дают лишь направление мышления и требуют дополнительных рассуждений.

Авторы считают полезным включение в Сборник некоторых вопросов, относящихся к астрономии, что поможет читателю познакомиться с методами определения больших расстояний до небесных тел с использованием горизонтального и годичного параллакса и законов Кеплера.

Используя эффект Доплера в астрофизике, определяют скорость движения звезд, а по измерению доплеровского смещения линий в спектрах излучения удаленных галактик, приходят к выводу о расширяющейся Вселенной.

Для удобства работы с книгой в приложениях приведены фундаментальные физические константы, таблицы физических величин, периодическая система элементов Д. И. Менделеева, подвижная карта звездного неба, единицы физических величин, их обозначения и определяющие уравнения, а также некоторые математические формулы.

*Авторы*

## Глава I

# ОСНОВЫ МОЛЕКУЛЯРНОЙ ФИЗИКИ И ТЕРМОДИНАМИКИ

### § 1. Основы молекулярно-кинетической теории

**Пример 1.** Найти число молекул и атомов, содержащихся в 150 г окиси углерода CO. Вычислить для нормальных условий число молекул в 1 м<sup>3</sup> газа, его плотность и среднее расстояние между молекулами.

*Дано:*  $m = 150 \text{ г} = 0,150 \text{ кг}$  — масса газа. Из таблиц:  $M = 28 \times 10^{-3} \text{ кг/моль}$  — молярная масса окиси углерода,  $N_A = 6,022 \times 10^{23} \text{ моль}^{-1}$  — постоянная Авогадро,  $V_m = 22,4 \cdot 10^{-3} \text{ м}^3/\text{моль}$  — объем 1 моля газа при нормальных условиях.

*Найти:*  $N_m$  и  $N_a$  — число молекул и атомов в 150 г окиси углерода;  $n_0$  — число молекул в единице объема при нормальных условиях;  $\rho_0$  и  $\bar{d}_0$  — плотность газа и среднее расстояние между молекулами при тех же условиях.

**Решение.**  $N_m = m/m_m$ , где  $m_m$  — масса молекулы. Но  $m_m = M/N_A$ ; следовательно,

$$N_m = \frac{mN_A}{M} = \frac{0,150 \cdot 6,022 \cdot 10^{23}}{28 \cdot 10^{-3}} \frac{\text{кг} \cdot \text{моль}^{-1}}{\text{кг/моль}} = 3,2 \cdot 10^{24}.$$

Так как окись углерода является двухатомным газом, то

$$N_a = 2N_m = 6,4 \cdot 10^{24}.$$

Число молекул газа в 1 м<sup>3</sup> найдем из соотношения

$$n_0 = \frac{N_A}{V_m} = \frac{6,022 \cdot 10^{23}}{22,4 \cdot 10^{-3}} \frac{\text{моль}^{-1}}{\text{м}^3/\text{моль}} \approx 2,7 \cdot 10^{25} \text{ м}^{-3}.$$

Число  $n_0$ , одинаковое для всех газов при нормальных условиях, называют числом Лошмидта и обозначают символом  $N_L$ . Зная  $N_L$  и  $m_m$ , можно определить  $\rho_0$ :

$$\rho_0 = N_L m_m = N_L \frac{M}{N_A} = \frac{2,7 \cdot 10^{25} \cdot 28 \cdot 10^{-3}}{6,022 \cdot 10^{23}} \frac{\text{м}^{-3} \cdot \text{кг/моль}}{\text{моль}^{-1}} \approx 1,3 \text{ кг/м}^3.$$

Для определения среднего расстояния  $\bar{d}_0$  между молекулами определим объем  $V_1$ , приходящийся на одну молекулу:  $V_1 = V_m/V_A$ . Рас-

смаатривая этот объем как элементарный кубик, в центре которого находится молекула, определим его ребро (иначе говоря, среднее расстояние между молекулами  $\bar{d}_0$ ):

$$\bar{d}_0 = \sqrt[3]{\frac{V_m}{N_A}} = \sqrt[3]{\frac{22,4 \cdot 10^{-3} \text{ м}^3/\text{моль}}{6,022 \cdot 10^{23} \text{ моль}^{-1}}} \approx 3,33 \cdot 10^{-9} \text{ м.}$$

*Примечание.* При нормальных условиях средние расстояния между молекулами любого газообразного вещества для всех газов одинаковы.

*Ответ:*  $N_m = 3,2 \cdot 10^{24}$ ;  $N_a = 6,4 \cdot 10^{24}$ ;  $n_0 = N_{\text{Л}} \approx 2,7 \cdot 10^{25} \text{ м}^{-3}$ ;  $\rho_0 \approx 1,3 \text{ кг/м}^3$ ;  $\bar{d}_0 \approx 3,33 \cdot 10^{-9} \text{ м}$ .

**Пример 2.** Определить количество вещества, содержащегося в 9,0 г воды. Найти массу одной молекулы. Принимая условно молекулы воды за плотно упакованные соприкасающиеся шарики, оценить объем, приходящийся на одну молекулу, и среднее расстояние между их центрами. Во сколько раз оно меньше среднего расстояния между молекулами водяного пара при нормальных условиях?

*Дано:*  $m = 9,0 \text{ г} = 9,0 \cdot 10^{-3} \text{ кг}$  — масса воды. Из таблиц:  $\rho_0 = 1,00 \times 10^3 \text{ кг/м}^3$  — плотность воды;  $M = 18 \cdot 10^{-3} \text{ кг/моль}$  — молярная масса воды;  $N_A = 6,022 \cdot 10^{23} \text{ моль}^{-1}$  — постоянная Авогадро;  $V_m = 22,4 \times 10^{-3} \text{ м}^3/\text{моль}$  — молярный объем водяного пара.

*Найти:*  $\nu$  — количество вещества;  $m_m$  — массу одной молекулы воды;  $V_1$  — объем, приходящийся на одну молекулу;  $\bar{d}$  — среднее расстояние между центрами молекул;  $\bar{d}/\bar{l}$  — отношение среднего расстояния между центрами молекул воды к среднему расстоянию между молекулами водяного пара.

*Решение.* Число молей  $\nu$  определим из соотношения

$$\nu = \frac{m}{M} = \frac{9,0 \cdot 10^{-3} \text{ кг}}{18 \cdot 10^{-3} \text{ кг/моль}} = 0,50 \text{ моль.}$$

Массу одной молекулы воды  $m_m$  выразим через молярную массу и постоянную Авогадро:

$$m_m = \frac{M}{N_A} = \frac{18 \cdot 10^{-3} \text{ кг/моль}}{6,022 \cdot 10^{23} \text{ моль}^{-1}} \approx 3,0 \cdot 10^{-26} \text{ кг.}$$

Учитывая, что 1 моль любого вещества содержит  $N_A$  молекул, определим элементарный объем  $V_1$  (объем кубика), приходящийся на одну молекулу воды:  $V_1 = V_m/N_A$ , где  $V_m$  — молярный объем при заданных условиях ( $V_m = M/\rho_0$ ), следовательно,

$$\begin{aligned} V_1 &= \frac{M}{\rho_0 N_A} = \frac{18 \cdot 10^{-3}}{1,00 \cdot 10^3 \cdot 6,022 \cdot 10^{23}} \frac{\text{кг/моль}}{\text{кг/м}^3 \cdot \text{моль}^{-1}} = \\ &= 2,99 \cdot 10^{-29} \text{ м}^3 \approx 3,0 \cdot 10^{-29} \text{ м}^3. \end{aligned}$$

По условию задачи молекулы воды соприкасаются; следовательно, ребро элементарного кубика можно принять за диаметр молекулы. Тогда



среднее расстояние между центрами молекул

$$\bar{d} = \sqrt[3]{V_1} = \sqrt[3]{30,0 \cdot 10^{-30} \text{ м}^3} \approx 3,11 \cdot 10^{-10} \text{ м.}$$

Для ответа на вопрос, во сколько раз диаметр молекулы воды  $\bar{d}$  меньше среднего расстояния  $\bar{l}$  между молекулами водяного пара, вспомним, что при нормальных условиях молярные объемы всех газов одинаковы и равны  $V_m = 22,4 \cdot 10^{-3} \text{ м}^3/\text{моль}$ . Отсюда

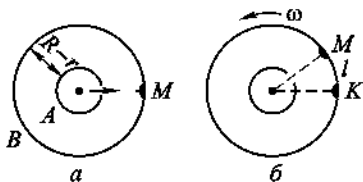
$$\bar{l} = \sqrt[3]{\frac{V_m}{N_A}} = \sqrt[3]{\frac{22,4 \cdot 10^{-3} \text{ м}^3/\text{моль}}{6,02 \cdot 10^{23} \text{ моль}^{-1}}} \approx 3,33 \cdot 10^{-9} \text{ м.}$$

Окончательно будем иметь

$$\frac{\bar{d}}{\bar{l}} = \frac{3,11 \cdot 10^{-10} \text{ м}}{3,33 \cdot 10^{-9} \text{ м}} \approx 0,093.$$

*Ответ:*  $\nu = 0,50$  моль;  $m_m \approx 3,0 \cdot 10^{-26}$  кг;  $V_1 \approx 3,0 \cdot 10^{-29} \text{ м}^3$ ;  $\bar{d} \approx 3,11 \cdot 10^{-10} \text{ м}$ ;  $\bar{d}/\bar{l} \approx 0,093$ .

**Пример 3.** Для определения скорости теплового движения молекул О. Штерн использовал прибор, сечение которого показано на рисунке. Покрытая серебром платиновая проволока, натянутая вдоль общей оси цилиндров  $A$  и  $B$  с радиусами 6,0 и 120 мм, накаливалась электрическим током. Испаряющиеся с ее поверхности атомы серебра пролетали в вакууме сквозь щель в цилиндре  $A$  и создавали на внутренней поверхности цилиндра  $B$  налет — полоску серебра в области  $M$  (см. рисунок  $a$ ). Когда оба цилиндра приводились во вращательное движение с одинаковой частотой  $\nu$ , за время  $t$ , в течение которого атомы серебра летели от щели до внутренней поверхности цилиндра  $B$ , последний поворачивался так, что атомы попадали в область  $K$  (см. рисунок  $b$ ). Вычислить среднюю скорость атомов серебра, если расстояние  $l$  между областями  $M$  и  $K$  равно 7,6 мм, а частота вращения цилиндров равна  $47 \text{ с}^{-1}$ .



К примеру 3

оба цилиндра приводились во вращательное движение с одинаковой частотой  $\nu$ , за время  $t$ , в течение которого атомы серебра летели от щели до внутренней поверхности цилиндра  $B$ , последний поворачивался так, что атомы попадали в область  $K$  (см. рисунок  $b$ ). Вычислить среднюю скорость атомов серебра, если расстояние  $l$  между областями  $M$  и  $K$  равно 7,6 мм, а частота вращения цилиндров равна  $47 \text{ с}^{-1}$ .

*Дано:*  $r = 6,0 \text{ мм} = 6,0 \cdot 10^{-3} \text{ м}$ ;  $R = 120 \text{ мм} = 0,12 \text{ м}$  — радиусы внутреннего и внешнего цилиндров;  $l = 7,6 \text{ мм} = 7,6 \cdot 10^{-3} \text{ м}$  — смещение полоски серебра;  $\nu = 47 \text{ с}^{-1}$  — частота вращения цилиндров.

*Найти:*  $\bar{v}$  — среднюю скорость атомов серебра.

*Решение.*  $\bar{v} = (R - r)/t$ , где  $t = l/(\omega R)$ . Круговая частота  $\omega = 2\pi\nu$ ; следовательно,

$$\bar{v} = (R - r) \frac{2\pi\nu R}{l} = (0,12 - 0,006) \cdot \frac{2 \cdot 3,14 \cdot 47 \cdot 0,12 \text{ м} \cdot \text{с}^{-1} \cdot \text{м}}{7,6 \cdot 10^{-3} \text{ м}} \approx 530 \text{ м/с.}$$

*Ответ:*  $\bar{v} \approx 530 \text{ м/с}$ .

**Пример 4.** Определить молярную массу и записать химическую формулу некоторого газообразного вещества, представляющего собой соединение углерода и водорода, если  $3,0 \cdot 10^{26}$  его молекул имеют массу 13 кг. Каковы массы углерода и водорода в этом соединении?

*Дано:*  $N = 3,0 \cdot 10^{26}$  — число молекул;  $m = 13$  кг — масса газа. Из таблиц:  $M_C = 12 \cdot 10^{-3}$  кг/моль и  $M_{H_2} = 2,0 \cdot 10^{-3}$  кг/моль — молярные массы соответственно углерода и водорода,  $N_A = 6,022 \cdot 10^{23}$  моль $^{-1}$  — постоянная Авогадро.

*Найти:*  $C_xH_y$  — формулу соединения газообразного вещества;  $m_C$  и  $m_H$  — массы углерода и водорода, образующих соединение.

**Решение.** Определим молярную массу неизвестного газа:

$$M = \frac{m}{N} N_A = \frac{13 \cdot 6,022 \cdot 10^{23}}{3,0 \cdot 10^{26}} \frac{\text{кг}}{\text{моль}} \approx 26 \cdot 10^{-3} \text{ кг/моль}.$$

Предполагаемая формула соединения имеет вид  $C_xH_y$ ; следовательно, его молярная масса  $M = M_C x + M_{H_2} y$ . Подставляя значения молярных масс и производя сокращение, получаем

$$M = 12x + 2,0y = 26.$$

Подбором значений  $x$  и  $y$  находим:  $12 \cdot 2 + 2,0 \cdot 1 = 26$ . Полученное химическое соединение имеет формулу  $C_2H_2$  и является ацетиленом.

Из 13 кг ацетилена на долю углерода приходится

$$m_C = \frac{24}{26} \cdot 13 \text{ кг} = 12 \text{ кг};$$

на долю водорода

$$m_H = \frac{2}{26} \cdot 13 \text{ кг} = 1 \text{ кг}.$$

**Ответ:** В данной массе ацетилена, имеющего формулу  $C_2H_2$ , содержится 12 кг углерода и 1 кг водорода.

**Пример 5.** Молекулярный азот находится при нормальных условиях. Считая, что за 1 с каждая молекула в среднем испытывает  $7,55 \cdot 10^9$  столкновений с другими молекулами, найти значения средней арифметической скорости молекул азота, средней длины свободного пробега молекул и их средний эффективный диаметр. По найденному значению средней арифметической скорости молекулы определить среднюю квадратичную и наиболее вероятную скорости молекул.

*Дано:*  $\bar{z} = 7,55 \cdot 10^9 \text{ с}^{-1}$  — среднее число столкновений за 1 с. Из таблиц:  $T_0 = 273 \text{ К}$  и  $n = N_L = 2,7 \cdot 10^{25} \text{ м}^{-3}$  — температура и концентрация молекул газа для нормальных условий,  $M = 28 \cdot 10^{-3} \text{ кг/моль}$  — молярная масса азота,  $R = 8,31 \text{ Дж/(моль} \cdot \text{К)}$  — молярная газовая постоянная.

*Найти:*  $\bar{v}$  — среднюю арифметическую скорость молекул азота;  $\bar{\lambda}$  — среднюю длину свободного пробега;  $\bar{d}_{эф}$  — средний эффективный диаметр молекул азота;  $\bar{v}_{кр}$  и  $v_a$  — среднюю квадратичную и наиболее вероятную скорости молекул азота.

Решение. Найдем  $\bar{v}$ :

$$\bar{v} = \sqrt{\frac{8RT}{\pi M}} = \sqrt{\frac{8 \cdot 8,31 \cdot 273}{3,14 \cdot 28 \cdot 10^{-3}} \frac{\text{Дж}/(\text{моль} \cdot \text{К}) \cdot \text{К}}{\text{кг}/\text{моль}}} \approx 454 \text{ м/с}.$$

Средняя длина свободного пробега  $\bar{\lambda}$  определяется из соотношения

$$\bar{\lambda} = \frac{\bar{v}}{z} = \frac{454}{7,55 \cdot 10^9} \frac{\text{м/с}}{\text{с}^{-1}} \approx 6,0 \cdot 10^{-8} \text{ м}.$$

Средняя длина свободного пробега  $\bar{\lambda}$  и эффективный диаметр  $\bar{d}_{\text{эф}}$  связаны соотношением

$$\bar{\lambda} = \frac{1}{\sqrt{2} \pi \bar{d}_{\text{эф}}^2 n}, \quad \text{где } n = N_{\text{Л}}.$$

Отсюда получаем

$$\bar{d}_{\text{эф}} = \frac{1}{\sqrt{2} \pi \bar{\lambda} N_{\text{Л}}} = \frac{1}{\sqrt{2} \cdot 3,14 \cdot 6,0 \cdot 10^{-8} \cdot 2,7 \cdot 10^{25} \text{ м} \cdot \text{м}^{-3}} \approx 3,7 \cdot 10^{-10} \text{ м}.$$

Средняя квадратичная скорость  $\bar{v}_{\text{кв}}$  и наиболее вероятная скорость  $v_{\text{в}}$  определяются из формул

$$\bar{v}_{\text{кв}} = \sqrt{\frac{3RT}{M}} \approx 1,73 \sqrt{\frac{RT}{M}} \quad \text{и} \quad v_{\text{в}} = \sqrt{\frac{2RT}{M}} = 1,41 \sqrt{\frac{RT}{M}}:$$

$$\bar{v}_{\text{кв}} = 1,73 \sqrt{\frac{8,31 \cdot 273}{28 \cdot 10^{-3}} \frac{\text{Дж}/(\text{моль} \cdot \text{К}) \cdot \text{К}}{\text{кг}/\text{моль}}} \approx 492 \text{ м/с};$$

$$v_{\text{в}} = 1,41 \sqrt{\frac{8,31 \cdot 273}{28 \cdot 10^{-3}} \frac{\text{Дж}/(\text{моль} \cdot \text{К}) \cdot \text{К}}{\text{кг}/\text{моль}}} \approx 401 \text{ м/с}.$$

Ответ:  $\bar{v} \approx 454 \text{ м/с}$ ;  $\bar{\lambda} \approx 6,0 \cdot 10^{-8} \text{ м}$ ;  $\bar{d}_{\text{эф}} \approx 3,7 \cdot 10^{-10} \text{ м}$ ;  $\bar{v}_{\text{кв}} \approx 492 \text{ м/с}$ ;  $v_{\text{в}} \approx 401 \text{ м/с}$ .

### Количество вещества. Масса и размеры молекул и атомов

**1.1.** Определить количество вещества, содержащегося в медной отливке массой 96 кг.

**1.2.** Определить площадь цинкового листа толщиной 2 мм, если он содержит 200 моль цинка. Найти массу цинка.

**1.3.** Сколько молей содержится в 32 кг метана  $\text{CH}_4$ ?

**1.4.** Определить количество вещества, содержащегося в  $50 \text{ см}^3$  кислорода, азота, гелия при нормальных условиях.

**1.5.** Определить молярную массу воздуха, если его плотность при нормальных условиях равна  $1,29 \text{ кг/м}^3$ .

**1.6.** Одинаковое ли количество вещества содержится в равных массах различных веществ?

**1.7.** Найти массу молекул кислорода, углекислого газа, водяного пара, аммиака.

**1.8.** Найти массу молекулы окиси углерода. Определить число молекул в  $1,2 \text{ м}^3$  окиси углерода при нормальных условиях.

**1.9.** Определить число молекул в 1 г азота; в 1 г углекислого газа; в  $1 \text{ м}^3$  кислорода при нормальных условиях.

**1.10.** Определить число атомов в 1 г гелия; в 1 г полностью диссоциированного азота; в  $1 \text{ м}^3$  аргона при нормальных условиях.

**1.11.** Сколько частиц находится в 1 г наполовину диссоциированного кислорода?

**1.12.** Определить число молекул, содержащихся в 1 г воды; в 1 г серной кислоты; в  $1 \text{ см}^3$  серной кислоты ( $\rho = 1800 \text{ кг/м}^3$ ); в капельке воды диаметром 0,1 мм при  $4^\circ\text{C}$ .

**1.13.** Сколько времени потребуется для испарения 60 г воды, если с  $1 \text{ см}^2$  поверхности воды каждую секунду испаряется  $1,54 \cdot 10^{17}$  молекул, а площадь свободной поверхности воды составляет  $100 \text{ см}^2$ ?

**1.14.** В комнате размером  $4 \times 5 \times 2,7 \text{ м}$  испарился кристаллик иода массой 20 мг. Сколько молекул иода оказалось в  $1 \text{ см}^3$  воздуха комнаты при условии их равномерного распределения?

**1.15.** Капля масла объемом  $0,050 \text{ мм}^3$  растеклась по поверхности воды, образовав пленку площадью  $600 \text{ см}^2$ . Предполагая, что в толщине пленки укладывается два слоя молекул, вычислить поперечник молекул масла.

**1.16.** Для измерения размеров «длинных» молекул жирных кислот на поверхность воды в ванне наносят пять капель раствора пальмитиновой кислоты в бензоле. Раствор растекается, образуя пленку площадью  $0,23 \cdot 0,14 \text{ м}$ ; при этом бензол быстро испаряется, а молекулы кислоты располагаются в один слой перпендикулярно поверхности воды, сцепляясь своими «кислыми» концами. Вычислить длину молекулы кислоты, если масса 1000 капель раствора равна 0,0033 кг, кислоты взято 4 г на 996 г растворителя. Плотность кислоты  $850 \text{ кг/м}^3$ .

**1.17.** Чтобы составить представление о размерах молекул, воспользовались 0,15%-ным раствором олеиновой кислоты в спирте. Капля такого раствора на поверхности воды образовала мономолекулярную пленку в виде круга, молекулы в которой расположились перпендикулярно поверхности воды. Вычислить длину молекулы олеиновой кислоты, если масса одной капли 13,5 мг, площадь образовавшейся пленки  $105 \text{ см}^2$  и плотность кислоты  $895 \text{ кг/м}^3$ . Оценить площадь поперечного сечения молекулы, принимая его за круг.

**1.18.** Вычислить объем, приходящийся на одну молекулу ртути, и ее диаметр. Считать, что молекулы плотно упакованы и соприкасаются друг с другом,  $\rho = 1,36 \cdot 10^4 \text{ кг/м}^3$ .

**1.19.** Сколько атомных слоев имеет золотая фольга толщиной 10 мкм?

**1.20.** Определить число молекул, содержащихся в железном стержне длиной 1,6 м и площадью поперечного сечения  $12 \text{ мм}^2$  при температуре  $20^\circ\text{C}$ .

**1.21.** Молярная масса азота  $28 \cdot 10^{-3}$  кг/моль. Определить молярную массу неизвестного газа и назвать его, если при нормальных условиях плотности этого газа и азота соответственно равны 0,72 и 1,25 кг/м<sup>3</sup>.

### Движение молекул. Диффузия. Броуновское движение

**1.22.** Какие явления подтверждают движения молекул?

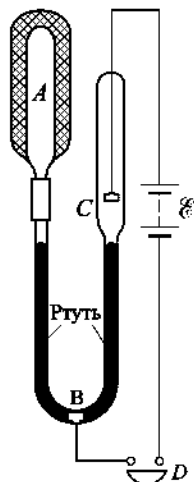
**1.23.** Какие факторы оказывают влияние на процесс диффузии?

**1.24.** Может ли происходить диффузия в одном и том же веществе? Если может, то при каких условиях?

**1.25.** Почему диффузия в атмосфере не приводит к выравниванию плотности воздуха на разных высотах?

**1.26.** Цилиндр с газом, плотно закрытый, нагревается с одного конца. Одинакова ли концентрация газа в цилиндре?

**1.27.** На рисунке изображен один из аппаратов для обнаружения присутствия в окружающем воздухе светильного газа, метана и других газов легче воздуха. Пористый цилиндр *A*, заполненный воздухом, соединен с U-образной трубкой *B*, содержащей ртуть. Ртутный контакт *C* замыкает цепь электрического звонка *D* в определенных случаях. Объяснить действие аппарата.



К задаче 1.27

**1.28.** В условиях невесомости отсутствует конвекция потоков воздуха — необходимое условие для поддержания горения. Однако и в этом случае свеча или спичка будет некоторое время гореть слабым, неярым пламенем шарообразной формы. Объяснить явление.

**1.29.** Какое явление имеет место при первичной обработке сырья в сахарной промышленности?

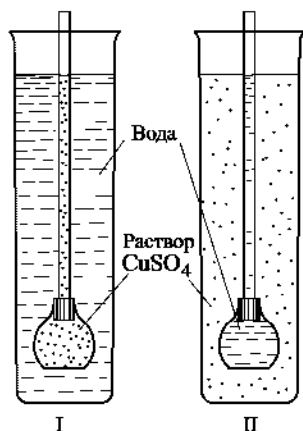
**1.30.** На каком физическом явлении основан процесс цементации стали — получение твердой закаленной корки на поверхности изделий из мягкой стали.

**1.31.** При пайке по методу Лучихина стальные или железные поверхности зачищают, затем кладут между ними тонкую медную фольгу и нагревают в электрической печи до температуры 1080 °С. Объяснить, почему такой спай значительно прочнее обычной медной пайки.

**1.32.** Чтобы приварить один кусок железа к другому, их нагревают в пламени горна до белого каления, затем накладывают один на другой на наковальне и подвергают сильным ударам кузнечного молота. Объяснить, почему в этом случае получается прочное соединение.

**1.33.** Приварить одну железную деталь к другой можно, накладывая их одну на другую в холодном состоянии и подвергая сильному сжатию. Объяснить, почему в данном случае получается прочное соединение.

**1.34.** На рисунке изображена установка, с помощью которой демонстрируют осмос — медленное проникновение растворителя (воды)



К задаче 1.34

в раствор какого-либо вещества через разделяющую их полупроницаемую мембрану (пленку). Как изменится в случаях I и II уровень жидкости в узкой трубке? Как будет вести себя в этих случаях пористая перепонка — «дно» внутреннего сосуда?

**1.35.** Почему броуновское движение в жидкости и газе является хаотическим и почему оно происходит тем заметнее, чем мельче размеры частиц? При любых ли размерах частиц его можно наблюдать?

**1.36.** Скорости молекул газообразных веществ велики и измеряются сотнями метров в секунду. Почему же запахи, например, от пролитых духов распространяются во много раз медленнее?

**1.37.** Обычно броуновское движение изображается в виде ломаной линии. Можно ли ее назвать траекторией движения броуновской частицы?

### Скорости молекул. Опыт Штерна

**1.38.** На рисунке к примеру 3 показано сечение прибора, служащего для непосредственного измерения скоростей теплового движения молекул. Покрытая серебром платиновая проволочка, натянутая вдоль общей оси цилиндров *A* и *B* с радиусами 6,0 и 120 мм, накаливалась электрическим током. Испаряющиеся с ее поверхности атомы серебра пролетали в вакууме сквозь щель в цилиндре *A* и создавали на внутренней поверхности цилиндра *B* налет — полоску серебра. Когда прибор приводился в быстрое вращение вокруг оси цилиндров, происходило такое смещение полоски, что средняя ее часть *M* оказывалась в положении *K* на расстоянии по дуге  $MK = l$ . Вычислить среднюю скорость атомов серебра, если *l* при температуре проволоки 1173 К достигло 7,6 мм, а частота вращения цилиндров равнялась  $47 \text{ с}^{-1}$ .

**1.39.** При постановке опыта Штерна прибор, описанный в условии предыдущей задачи, вращался с частотой  $50 \text{ с}^{-1}$ , а смещение середины полоски серебра равнялось 9,5 мм. Каковы средняя арифметическая, средняя квадратичная и наиболее вероятная скорости атомов?

**1.40.** В опыте Штерна (см. задачу 1.38) смещение середины полоски серебра равно 7,6 мм. Определить, на сколько сместился максимум утолщения полоски.

**1.41.** При проведении опыта Штерна полоска серебра получается несколько размытой, так как при данной температуре скорости атомов различны. По данным определения толщины налета слоя серебра в раз-

личных местах полоски можно рассчитать доли атомов со скоростями, лежащими в том или ином интервале скоростей, от общего их числа. В результате измерений получены следующие данные:

| Интервалы скоростей, м/с | Доля атомов, % | Интервалы скоростей, м/с | Доля атомов, % |
|--------------------------|----------------|--------------------------|----------------|
| 0–100                    | 1,4            | 600–700                  | 9,2            |
| 100–200                  | 8,1            | 700–800                  | 4,8            |
| 200–300                  | 16,7           | 800–900                  | 2,0            |
| 300–400                  | 21,5           | 900–1000                 | 0,6            |
| 400–500                  | 20,3           | Более 1000               | 0,3            |
| 500–600                  | 15,1           |                          |                |

На основании этой таблицы построить диаграмму распределения атомов серебра по скоростям при температуре 1173 К. Как изменится вид диаграммы при уменьшении ширины интервалов скоростей? Что произойдет с ломаной линией, ограничивающей сверху прямоугольники диаграммы?

**1.42.** На что указывает размытость налета серебра в опыте Штерна?

**1.43.** При демонстрации опыта Штерна серебряная проволочка была нагрета до 827 °С. С какой частотой необходимо вращать цилиндры, чтобы получить смещение середины полоски серебра на 9,5 мм? Радиусы цилиндров 6,0 и 120 мм (см. рисунок к примеру 3).

**1.44.** До какой температуры была нагрета медная проволочка при демонстрации опыта Штерна, если цилиндры диаметром 19 и 285 мм были приведены во вращение с частотой  $50\text{ с}^{-1}$ , а смещение середины полоски меди получилось равным 8,4 мм (см. рисунок к примеру 3)?

**1.45.** Определить среднюю квадратичную скорость молекул азота при температуре 27 °С.

**1.46.** Гелий и кислород находятся при одинаковой температуре. Определить среднюю квадратичную скорость атомов гелия, если для молекул кислорода она составляет 500 м/с.

### **Силы молекулярного взаимодействия.**

#### **Внутренняя энергия тела**

**1.47.** Почему твердые тела обладают собственной формой и объемом?

**1.48.** Одновременно или поочередно действуют силы притяжения и отталкивания между молекулами?

**1.49.** В отличие от твердых тел и жидкостей газы не имеют постоянного объема. Почему?

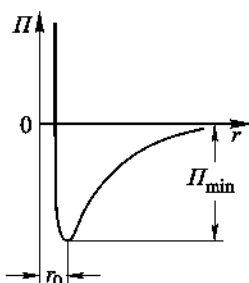
**1.50.** Жидкости и твердые тела обладают малой сжимаемостью. Чем это можно объяснить?

**1.51.** Мерные плитки, сложенные тщательно отполированными торцами, прочно соединяются; разбитую чашку невозможно собрать из кусков. Почему?

**1.52.** При каком соотношении молекулярных сил притяжения и отталкивания молекулы твердых тел колеблются относительно положения равновесия?

**1.53.** Используя из учебника график зависимости равнодействующей сил притяжения и отталкивания двух молекул от расстояния между их центрами, укажите, на каком участке графика выполняется закон Гука?

**1.54.** Одинаковы ли силы молекулярного взаимодействия для железа в твердом и жидком состоянии при температуре плавления?



К задаче 1.56

**1.55.** Почему в термодинамике внутреннюю энергию определяют как сумму потенциальной энергии взаимодействия частиц и кинетической энергии их движения без учета химической, ядерной и других компонент? Нет ли здесь противоречия?

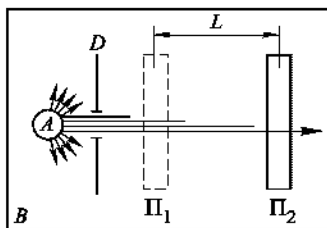
**1.56.** Определить (см. рисунок), как по мере увеличения температуры изменяется уровень, на котором находится молекула, относительно дна потенциальной ямы и среднее расстояние между молекулами.

**1.57.** В комнате с открытой форточкой включили электрокамин, после чего температура воздуха повысилась от  $T_1$  до  $T_2$ . Изменилась ли внутренняя энергия воздуха в комнате?

### Длина свободного пробега молекул

**1.58.** Определить среднюю длину свободного пробега молекул углекислого газа  $\text{CO}_2$  при нормальных условиях, если каждая молекула за 1 с испытывает в среднем  $9,05 \cdot 10^9$  столкновений.

**1.59.** На рисунке схематически изображен прибор, предназначенный для непосредственного измерения длины свободного пробега  $\lambda$  молекул газа или пара методом молекулярного пучка. Часть молекул, испаряющихся с поверхности раскаленного серебряного шара  $A$ , помещенного в баллон  $B$ , проходит в виде узкого пучка через диафрагму  $D$ .



К задаче 1.59

Сталкиваясь с молекулами находящегося в баллоне разреженного газа, молекулы серебра рассеиваются. На пластинке (экране)  $\Pi_1$  оседает  $n_1$  молекул, на  $\Pi_2$  за то же время при убранном экране  $\Pi_1$  оседает



$n_2$  молекул. Отношение  $n_1/n_2$  можно вычислить, взвешивая пластинки до и после опыта или измеряя толщину образовавшегося на них налета серебра. Для определения длины свободного пробега пользуются соотношением

$$\lambda = \frac{L}{M \ln(n_1/n_2)} \frac{p_2}{p},$$

где  $M = 2,302$  — модуль перехода от десятичных логарифмов к натуральным;  $n_1$  и  $n_2$  — число молекул серебра на соответствующих экранах;  $p_2$  — давление газа, при котором производился эксперимент;  $p$  — заданное давление газа. Найти  $\lambda$  для молекул серебра при нормальных условиях, если эксперимент производился при давлении 0,80 Па; расстояние  $L = 3,0$  мм,  $n_1/n_2 = 1,2$ .

**1.60.** Средняя длина свободного пробега молекул водорода при нормальных условиях равна  $1,12 \cdot 10^{-7}$  м; для азота при тех же условиях она составляет  $6,0 \cdot 10^{-8}$  м. Определить число столкновений каждой молекулы с другими за 1 с для водорода и азота. Найти их эффективные диаметры.

**1.61.** Средняя длина свободного пробега молекул кислорода при нормальных условиях  $6,50 \cdot 10^{-8}$  м, а средняя скорость их движения 425,1 м/с. Определить среднее число столкновений молекулы за 1 с.

**1.62.** Средняя длина свободного пробега молекул азота при нормальных условиях  $6,00 \cdot 10^{-8}$  м, а среднее число столкновений молекулы за 1 с равно  $7,55 \cdot 10^9$  с $^{-1}$ . Определить средний импульс молекулы.

**1.63.** Молекула азота при нормальных условиях испытывает за 1 с  $7,55 \cdot 10^9$  столкновений. Определить ее эффективный диаметр.

**1.64.** Длина свободного пробега молекулы водорода при нормальных условиях  $1,12 \cdot 10^{-7}$  м. Определить ее эффективный диаметр.

**1.65.** Длины свободного пробега молекул кислорода и углекислого газа при одинаковых условиях соответственно равны  $6,5 \cdot 10^{-8}$  и  $4,2 \times 10^{-8}$  м. Как относятся их эффективные диаметры?

## § 2. Законы идеальных газов

**Пример 6.** Кислород при давлении 124 кПа имеет плотность  $1,6$  кг/м $^3$ . Найти число молекул в единице объема (концентрацию), среднюю кинетическую энергию поступательного движения молекул, среднюю квадратичную скорость молекул и температуру кислорода.

*Дано:*  $p = 124$  кПа =  $1,24 \cdot 10^5$  Па — давление кислорода;  $\rho = 1,6$  кг/м $^3$  — плотность кислорода. Из таблиц:  $N_A = 6,022 \times 10^{23}$  моль $^{-1}$  — постоянная Авогадро;  $M = 32 \cdot 10^{-3}$  кг/моль — молярная масса кислорода;  $k = 1,38 \cdot 10^{-23}$  Дж/К — постоянная Больцмана.

*Найти:*  $n$  — концентрацию молекул;  $\bar{\epsilon}$  — среднюю кинетическую энергию поступательного движения одной молекулы;  $\bar{v}_{\text{кв}}$  — среднюю квадратичную скорость молекул;  $T$  — температуру газа при заданных условиях.

Решение. Концентрацию молекул определим из формулы

$$n = \frac{N_A \rho}{M} = \frac{6,022 \cdot 10^{23} \cdot 1,6}{32 \cdot 10^{-3}} \frac{\text{моль}^{-1} \cdot \text{кг/м}^3}{\text{кг/моль}} = 3,01 \cdot 10^{25} \text{ м}^{-3}.$$

Для определения средней кинетической энергии поступательного движения молекулы воспользуемся уравнением молекулярно-кинетической теории газов:

$$p = \frac{2}{3} n \bar{\varepsilon},$$

где  $p$  — давление газа. Отсюда

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

Используя числовые значения величин, входящих в формулу, получаем

$$\bar{\varepsilon} = \frac{3 \cdot 1,24 \cdot 10^5}{2 \cdot 3,01 \cdot 10^{25}} \frac{\text{Па}}{\text{м}^{-3}} = 6,18 \cdot 10^{-21} \text{ Дж}.$$

Средняя кинетическая энергия поступательного движения молекул и их средняя квадратичная скорость связаны соотношением  $\bar{\varepsilon} = m_m \bar{v}_{\text{кв}}^2 / 2$ , где  $m_m$  — масса молекулы — может быть найдена через отношение молярной массы к постоянной Авогадро:  $m_m = M/N_A$ ; следовательно,

$$\bar{\varepsilon} = \frac{M \bar{v}_{\text{кв}}^2}{2 N_A},$$

отсюда

$$\bar{v}_{\text{кв}} = \sqrt{\frac{2 \bar{\varepsilon} N_A}{M}} = \sqrt{\frac{2 \cdot 6,18 \cdot 10^{-21} \cdot 6,022 \cdot 10^{23}}{32 \cdot 10^{-3}} \frac{\text{Дж} \cdot \text{моль}^{-1}}{\text{кг/моль}}} = 482 \text{ м/с}.$$

Известно, что среднее значение кинетической энергии поступательного движения молекул связано с температурой зависимостью  $\bar{\varepsilon} = \frac{3}{2} kT$ , где  $k$  — постоянная Больцмана; отсюда

$$T = \frac{2}{3} \frac{\bar{\varepsilon}}{k} = \frac{2 \cdot 6,18 \cdot 10^{-21}}{3 \cdot 1,38 \cdot 10^{-23}} \frac{\text{Дж}}{\text{Дж/К}} = 299 \text{ К}.$$

Температуру газа можно найти иначе, используя формулу

$$\bar{v}_{\text{кв}} = \sqrt{\frac{3RT}{M}}, \quad \bar{v}_{\text{кв}}^2 = \frac{3RT}{M}, \quad T = \frac{M \bar{v}_{\text{кв}}^2}{3R}.$$

Ответ:  $n \approx 3,0 \cdot 10^{25} \text{ м}^{-3}$ ;  $\bar{\varepsilon} \approx 6,2 \cdot 10^{-21} \text{ Дж}$ ;  $v_{\text{кв}} \approx 480 \text{ м/с}$ ;  $T \approx 300 \text{ К}$ .

**Пример 7.** Найти плотность кислорода при температуре 300 К и давлении 160 кПа. Вычислить массу кислорода объемом 200 м<sup>3</sup> при этих условиях.

Дано:  $T = 300 \text{ К}$  — температура газа;  $p = 160 \text{ кПа} = 1,6 \cdot 10^5 \text{ Па}$  — давление газа;  $V = 200 \text{ м}^3$  — объем газа. Из таблиц:  $\rho_0 = 1,43 \text{ кг/м}^3$  — плотность кислорода при нормальных условиях;  $p_0 = 1,013 \cdot 10^5 \text{ Па}$  —

нормальное атмосферное давление;  $M = 32 \cdot 10^{-3}$  кг/моль — молярная масса кислорода;  $R = 8,31$  Дж/(моль · К) — универсальная газовая постоянная;  $T_0 = 273$  К — температура для нормальных условий.

*Найти:*  $\rho$  — плотность кислорода;  $m$  — массу кислорода при заданных условиях.

**Решение.** Задача решается с помощью уравнения состояния идеального газа и формулы для плотности вещества:

$$\frac{pV}{T} = \frac{p_0 V_0}{T_0}, \quad \rho = \frac{m}{V}, \quad \rho_0 = \frac{m}{V_0}.$$

Сделав подстановки и алгебраические преобразования, получим

$$\rho = \frac{T_0 \rho_0}{p_0} \frac{p}{T}, \quad m = \rho V.$$

Подставляя числовые значения, вычисляем плотность кислорода при заданных условиях:

$$\rho = \frac{273 \cdot 1,43 \cdot 1,6 \cdot 10^5}{1,013 \cdot 10^5 \cdot 300} \frac{\text{К} \cdot \text{кг/м}^3 \cdot \text{Па}}{\text{Па} \cdot \text{К}} \approx 2,05 \text{ кг/м}^3.$$

Масса кислорода объемом  $200 \text{ м}^3$  при тех же условиях равна

$$m = 2,05 \text{ кг/м}^3 \cdot 200 \text{ м}^3 = 410 \text{ кг}.$$

Задачу можно решить проще, применяя уравнение Клапейрона–Менделеева  $pV = \frac{m}{M} RT$ , откуда  $m = \frac{M}{R} \frac{pV}{T}$ ,  $\rho = \frac{M}{R} \frac{p}{T}$ . Подставляя числовые значения, получаем те же результаты.

*Ответ:*  $\rho \approx 2,05 \text{ кг/м}^3$ ;  $m = 410 \text{ кг}$ .

*Примечание 1.* Из уравнения состояния идеального газа

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

получаем

при  $V_1 = V_2$   $p_1/p_2 = T_1/T_2$  — изохорный процесс,

при  $p_1 = p_2$   $V_1/V_2 = T_1/T_2$  — изобарный процесс,

при  $T_1 = T_2$   $p_1 V_1 = p_2 V_2$  — изотермический процесс.

*Примечание 2.* Уравнение состояния газа может описывать и состояние раствора какого-либо кристаллического вещества. В этом случае давлению газа  $p$  соответствует осмотическое давление в растворе (см. задачи 5.51–5.53).

*Примечание 3.* Если часть  $\alpha$  всех молекул данной массы  $m$  диссоциирована, то общее число всех частиц будет равно  $(1 - \alpha) + 2\alpha = 1 + \alpha$ . Отсюда  $pV = (1 + \alpha) \frac{m}{M} RT$ , что справедливо также и для раствора неорганического вещества (см. задачи 2.68–2.70).

**Пример 8.** Воздух, занимавший при температуре  $27^\circ\text{C}$  и давлении  $203 \text{ кПа}$  объем  $120 \text{ л}$ , подвергся нагреванию. Найти температуру газа, если нагревание было: 1) изохорным, причем давление возросло

до 259 кПа; 2) изобарным, причем объем увеличился до 150 л. Определить массу газа.

*Дано:*  $T_1 = 300$  К — начальная температура;  $p_1 = 203$  кПа =  $2,03 \times 10^5$  Па и  $p_2 = 259$  кПа =  $2,59 \cdot 10^5$  Па — начальное и конечное давление газа;  $V_1 = 120$  л =  $0,12$  м<sup>3</sup> и  $V_2 = 150$  л =  $0,15$  м<sup>3</sup> — объемы газа в начале и конце процесса. Из таблиц:  $M = 29 \cdot 10^{-3}$  кг/моль — молярная масса воздуха,  $R = 8,31$  Дж/(моль · К) — универсальная газовая постоянная.

*Найти:*  $T_2$  — конечную температуру газа для обоих случаев;  $m$  — массу газа.

**Решение.** Конечная температура  $T_2$  находится из уравнений для изохорного и изобарного процессов, в каждое из которых входят лишь два термодинамических параметра:

$$1) \frac{p_1}{p_2} = \frac{T_1}{T_2}, \quad 2) \frac{V_1}{V_2} = \frac{T_1}{T_2},$$

здесь  $T_2'$  — конечная температура газа при изобарном нагревании.

Подставляя в уравнения числовые значения и решая их, находим

$$1) T_2 = \frac{2,59 \cdot 10^5 \cdot 300}{2,03 \cdot 10^5} \frac{\text{Па} \cdot \text{К}}{\text{Па}} \approx 383 \text{ К};$$

$$2) T_2' = \frac{0,15 \cdot 300}{0,12} \frac{\text{м}^3 \cdot \text{К}}{\text{м}^3} = 375 \text{ К}$$

Масса газа определяется из уравнения Клапейрона–Менделеева  $p_1 V_1 = (m/M) RT_1$ :

$$m = \frac{p_1 V_1 M}{RT_1} = \frac{2,03 \cdot 10^5 \cdot 120 \cdot 10^{-3} \cdot 29 \cdot 10^{-3}}{8,31 \cdot 300} \frac{\text{Па} \cdot \text{м}^3 \cdot \text{кг/моль}}{\text{Дж/(моль} \cdot \text{К)} \cdot \text{К}} \approx 0,283 \text{ кг}.$$

*Ответ:*  $T_2 \approx 383$  К;  $T_2' = 375$  К;  $m \approx 0,283$  кг.

**Пример 9.** Рабочий объем цилиндра поршневого насоса 0,50 л. Насос соединен с баллоном вместимостью 3,0 л, содержащим воздух при нормальном атмосферном давлении. Найти давление воздуха в баллоне после пяти рабочих ходов поршня в случаях режима работы: 1) нагнетательного; 2) разрежающего.

*Дано:*  $V_1 = 0,50$  л =  $0,50 \cdot 10^{-3}$  м<sup>3</sup> — рабочий объем цилиндра насоса,  $V_2 = 3,0$  л =  $3,0 \cdot 10^{-3}$  м<sup>3</sup> — вместимость баллона,  $n = 5$  — число рабочих ходов поршня. Из таблиц:  $p_0 = 1,013 \cdot 10^5$  Па — нормальное атмосферное давление (первоначальное давление воздуха в баллоне).

*Найти:*  $p_n$  и  $p_p$  — давления воздуха после  $n$  ходов поршня при нагнетательном и разрежающем режимах работы.

**Решение.** 1. После  $n$  рабочих ходов поршня в нагнетательном режиме насос заберет из атмосферы объем воздуха  $V_n = nV_1$  при давлении  $p_0$ ; эта масса воздуха будет введена в баллон, создав в нем парциальное давление  $p_n$ ; так как изменение температуры не учитывается, то по закону Бойля–Мариотта

$$p_n V_2 = p_0 n V_1,$$

откуда

$$p_n = p_0 \frac{V_1}{V_2} n.$$

Искомое давление воздуха в баллоне будет равно

$$p_n = p_n + p_0 = p_0 \left( \frac{V_1}{V_2} n + 1 \right).$$

Подставляя числовые значения, получаем

$$p_n = (1,013 \cdot 10^5 \text{ Па}) \cdot \left( \frac{0,50 \cdot 10^{-3} \cdot 5 \text{ м}^3}{3,0 \cdot 10^{-3} \text{ м}^3} + 1 \right) \approx 1,86 \cdot 10^5 \text{ Па} \approx 190 \text{ кПа}.$$

2. Если в начале первого рабочего хода поршня воздух в баллоне занимал объем  $V_2$  при давлении  $p_0$ , то в разрежающем режиме к концу первого хода поршня та же масса воздуха займет объем  $V_2 + V_1$  при давлении  $p_1$ . Так как изменение температуры не учитывается, то по закону Бойля–Мариотта

$$p_1(V_2 + V_1) = p_0 V_2,$$

откуда

$$p_1 = \frac{V_2}{V_2 + V_1} p_0.$$

В начале второго хода поршня объем и давление газа в баллоне равны соответственно  $V_2$  и  $p_1$ , в конце хода они равны  $V_2 + V_1$  и  $p_2$ , откуда

$$p_2 = \frac{V_2}{V_2 + V_1} p_1, \quad \text{или} \quad p_2 = \left( \frac{V_2}{V_2 + V_1} \right)^2 p_0.$$

Продолжая те же рассуждения, находим, что к концу  $n$ -го рабочего хода

$$p_n = \left( \frac{V_2}{V_2 + V_1} \right)^n p_0.$$

Подставляя числовые значения, получаем

$$p_p = \left( \frac{3,0 \cdot 10^{-3}}{3,0 \cdot 10^{-3} + 0,50 \cdot 10^{-3}} \right)^5 p_0 = \left( \frac{6}{7} \right)^5 \cdot 1,013 \cdot 10^5 [\text{Па}] = 48 \text{ кПа}.$$

*Ответ:*  $p_n \approx 190 \text{ кПа}$ ;  $p_p = 48 \text{ кПа}$ .

*Примечание.* Легко видеть, что зная числовые значения  $V_1$  и  $V_2$  не обязательно, достаточно знать их отношение  $V_2/V_1 = k$ . В самом деле, в первом случае

$$\frac{V_1}{V_2} = \frac{1}{k},$$

во втором

$$\frac{V_2}{V_2 + V_1} = \frac{V_2/V_1}{V_2/V_1 + 1} = \frac{k}{k + 1}.$$

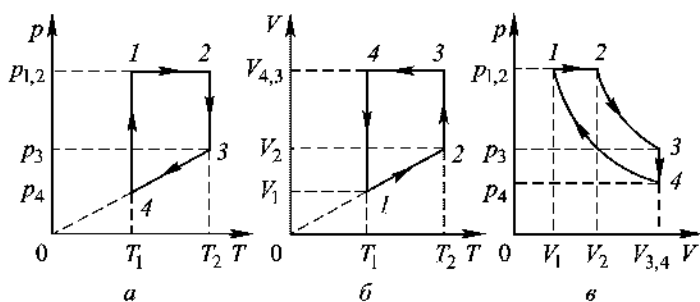
**Пример 10.** В цилиндре под поршнем находится 1 моль газа, изменение состояния которого представляет замкнутый цикл и проис-

ходит следующим образом: участок 1–2 — при повышении температуры от  $T_1$  до  $T_2$  увеличивается объем газа при постоянном давлении  $p_2$ ; участок 2–3 — при постоянной температуре увеличивается объем при изменении давления до  $p_3$ ; участок 3–4 — уменьшается давление при постоянном объеме; участок 4–1 — уменьшается объем газа при постоянной температуре и газ возвращается в первоначальное состояние. По заданным значениям  $p_1$ ,  $p_3$ ,  $T_1$  и  $T_2$  построить график замкнутого цикла в координатах  $pT$  и по нему определить, каким точкам соответствуют минимальные и максимальные значения объема газа. Используя график процесса в координатах  $pT$ , построить графики в координатах  $VT$  и  $pV$ . Всегда ли изобара в координатах  $VT$  проходит через их начало?

**Дано:**  $\nu = 1$  моль — количество вещества,  $p_1$  и  $p_3$  — начальное и промежуточное давления газа,  $T_1$  и  $T_2$  — наименьшее и наибольшее значения температуры.

**Найти:** Построить графики цикла в координатах  $pT$ . Каким точкам на графике соответствуют максимальные и минимальные значения объема? Построить графики процесса в координатах  $VT$  и  $pV$ . Всегда ли изобара в координатах  $VT$  проходит через их начало?

**Решение.** На участке 1–2 газ изобарически нагревается от температуры  $T_1$  до  $T_2$  при давлении  $p_1$ . В координатах  $pT$  этот процесс на рисунке *а* изобразится отрезком прямой, параллельной оси температур. На совершение этого процесса затрачивается теплота. Участку 2–3 соответствует изотермическое расширение газа, протекающее с поглощением теплоты: при этом давление изменяется от  $p_1$  до  $p_3$ . На



К примеру 10

участке 3–4 протекает изохорный процесс, в котором с понижением температуры давление уменьшается. Так как на последнем участке 4–1 температура остается постоянной (по условию), в точке 4 температура газа будет равна  $T_1$ . Незвестное давление в этой точке можно найти из соотношения  $p_3/p_4 = T_2/T_1$ , откуда  $p_4 = p_3 T_1/T_2$ . На участке 4–1 происходит изотермическое сжатие и газ приходит в первоначальное состояние.

Для построения графика замкнутого цикла в координатах  $VT$  найдем объемы газа, соответствующие точкам 1, 2, 3 и 4, показанным на рисунке а.

Для точки 1  $V_1 = RT_1/p_1$ . Так как точки 1 и 2 лежат на изобаре, проходящей через начало координат, точка 2 будет находиться на ее пересечении с изотермой, соответствующей температуре  $T_2$ . Объем газа  $V_2$  определится из формулы  $V_2 = RT_2/p_1$ . На участке 2–3 (процесс изотермический) для определения  $V_3$  воспользуемся законом Бойля–Мариотта  $p_1V_2 = p_3V_3$ , откуда  $V_3 = p_1V_2/p_3$ . Объем  $V_3$  можно найти иначе, используя уравнение Клапейрона–Менделеева. На графике б изотермический процесс изобразится участком 2–3.

На участке 3–4 (изохорный процесс) газ охлаждается от температуры  $T_2$  до  $T_1$ , при этом давление понижается от  $p_3$  до  $p_4$ . Графически этот процесс изобразится участком 3–4. На участке 4–1 газ изотермически сжимается от объема  $V_4$  до  $V_1$ , возвращаясь в первоначальное состояние (график б).

Для построения графика в координатах  $pV$  используем значения объемов и давлений для точек 1, 2, 3 и 4, известные из условия и найденные в процессе решения. Из уравнений  $V_1p_1 = V_4p_4 = \text{const}$  и  $V_2p_2 = V_3p_3 = \text{const}$  найдем координаты промежуточных точек и построим график (график в).

**Ответ:** Изобара пройдет через начало координат  $VT$  лишь в случае, когда масса газа будет постоянной. Точке 1 соответствует минимальный объем; точкам 3 и 4 — максимальный.

### Идеальный газ. Давление

**2.1.** При каких условиях в газе можно пренебречь силами взаимодействия молекул?

**2.2.** Всегда ли можно пренебрегать суммой объемов молекул газа?

**2.3.** Какие газы наиболее близки к идеальным?

**2.4.** Определить давление, обусловленное весом поршня на газ, заключенный в цилиндр. Масса поршня 0,48 кг, а его диаметр 12 см.

**2.5 \*).** Какое давление создает вертикальный столбик ртути высотой 760 мм в трубке Торричелли?  $p_0 = \text{const}$ .

**2.6 \*).** Как изменится длина столбика ртути (см. задачу 2.5), если трубку наклонить под углом  $60^\circ$  к горизонту? Изменится ли давление ртутного столбика?

**2.7.** Определить давление в пресной воде на глубине 15 м. Атмосферное давление нормальное.

**2.8.** На какой глубине в море давление в три раза больше нормального атмосферного давления?

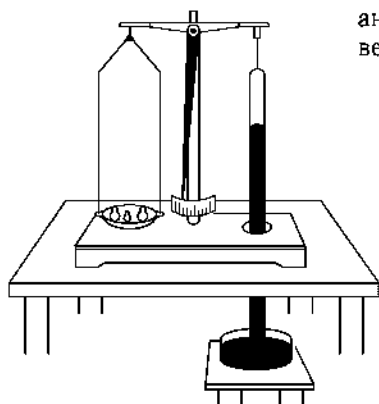
**2.9.** Верхний конец трубки чашечного барометра прикреплен к одному плечу коромысла весов (см. рисунок), а на чашку, подвешенную

\*) Стеклоанная трубка со ртутью длиной 1 м, запаянная с одного конца.

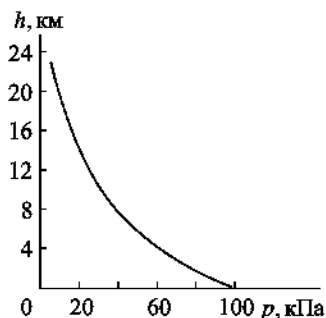
к другому плечу, положены для равновесия гири. Что именно они уравновешивают? Нарушится ли равновесие весов, если изменится атмосферное давление?

**2.10.** В кабине летящего по орбите космического корабля поддерживается нормальное атмосферное давление, хотя воздух в кабине невесом, как и все находящиеся в ней тела. Объясните это.

**2.11.** Как ведут себя в условиях невесомости ртутный барометр и барометр-анероид? Можно ли в этих условиях доверять отсчетам по водомерному стеклу?



К задаче 2.9



К задаче 2.13

**2.12.** На сколько следует переместиться по вертикали от поверхности Земли, чтобы атмосферное давление уменьшилось на 133,3 Па? На сколько уменьшится оно при подъеме на 150 м? Изменение температуры и плотности воздуха с высотой не учитывать.

**2.13.** Атмосферное давление на заданной высоте можно найти по графику (см. рисунок) или вычислить по формуле  $p = p_0 \cdot 10^{-0,06h}$ , где  $p_0$  — атмосферное давление на уровне моря,  $h$  — высота (в километрах) над уровнем моря. Определить давление на высотах 1, 2, 10 и 22 км, считая  $p_0 = 101,3$  кПа. Изменение температуры воздуха с высотой не учитывать.

**2.14.** Вычислить силу, с которой атмосфера при нормальном давлении давит на магдебургские полушария, если их диаметр равен 100 мм. Давление воздуха, оставшегося в полушариях после откачки, принять равным 2,67 кПа.

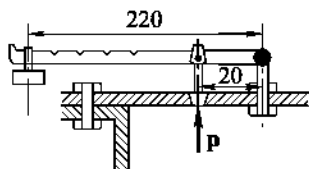
**2.15** \*). Манометр, установленный на баллоне с газом, показывает 480 кПа. Атмосферное давление нормальное. Определить давление газа.

\*) Давление на шкале технического манометра обычно наносится так, чтобы стрелка показывала, на сколько давление газа или пара в котле больше атмосферного давления.



**2.16.** Давление пара в паровом котле по манометру равно 1,1 МПа, площадь отверстия, прикрываемого предохранительным клапаном, равна 400 мм<sup>2</sup>. Определить силу, с которой пар давит на клапан.

**2.17.** Определить давление пара в паровом котле, если к рычагу предохранительного клапана (см. рисунок) подвешена гири массой 2 кг. Площадь отверстия, прикрываемого клапаном, равна 2,5 см<sup>2</sup>; расстояния от оси рычага до центра отверстия и до точки подвеса гири равны соответственно 20 и 220 мм.



К задаче 2.17

### Основное уравнение молекулярно-кинетической теории газа

**2.18.** Определить давление водорода, если средняя квадратичная скорость его молекул равна 2550 м/с, концентрация молекул  $3,6 \times 10^{25} \text{ м}^{-3}$ .

**2.19.** Какова средняя кинетическая энергия поступательного движения молекул газа, если при концентрации молекул  $2,65 \cdot 10^{25} \text{ м}^{-3}$  давление равно 98,8 кПа?

**2.20.** Определить плотность кислорода, если его давление равно 152 кПа, а средняя квадратичная скорость его молекул — 545 м/с.

**2.21.** Найти среднюю квадратичную скорость молекул газа, имеющего плотность 1,8 кг/м<sup>3</sup> при давлении 152 кПа.

**2.22.** Средняя квадратичная скорость молекул ацетилена, находящегося в закрытом баллоне, равна 500 м/с; плотность газа 18 кг/м<sup>3</sup>. Вычислить энергию поступательного движения для одной молекулы и суммарную энергию для всех молекул. Найти давление газа, если его масса 7,2 кг.

**2.23.** В баллоне вместимостью 1 л находится азот под давлением 200 кПа, причем известно, что 1 см<sup>3</sup> газа содержит  $4,3 \cdot 10^{19}$  молекул. Вычислить энергию поступательного движения одной молекулы, суммарную энергию всех молекул и плотность газа.

**2.24.** Некоторая масса газа при температуре 330 К создает давление 132 кПа, а при температуре 240 К — давление 96 кПа, причем объем газа остается неизменным. Вычислить давление газа при температурах 273, 373 и 180 К. Найти температуру, при которой давление той же массы газа равно 80 кПа.

**2.25.** Определить давление, при котором 1 м<sup>3</sup> газа, имеющего температуру 60 °С, содержит  $2,4 \cdot 10^{26}$  молекул.

**2.26.** При какой температуре 1 см<sup>3</sup> газа содержит  $1,0 \cdot 10^{19}$  молекул, если давление газа равно 10 кПа? Как изменится давление, если при неизменных объеме и температуре половину молекул заменить молекулами более тяжелого газа?

**2.27.** В лабораторных условиях создан высокий вакуум, т.е. очень малое давление, равное  $1,33 \cdot 10^{-9}$  Па. Сколько молекул остается при этом в  $1 \text{ м}^3$  и  $1 \text{ см}^3$  газа? Температуру принять равной 293 К.

**2.28.** Для наблюдения броуновского движения взят раствор туши (плотность  $1,2 \cdot 10^3 \text{ кг/м}^3$ ) в спирте. Найти скорость частиц диаметром 0,5 и 1 мкм. Каков диаметр частиц, движущихся со скоростью 0,5 м/с? Температура во всех случаях равна 18 °С.

**2.29.** Поверхность металлического зеркала покрывают слоем серебра, пользуясь способом напыления. С какой скоростью  $z/t$  растет толщина этого слоя, если давление атомов серебра равно 0,105 Па, а средняя кинетическая энергия каждого атома составляет  $2,25 \cdot 10^{-20}$  Дж?

**2.30.** Сколько времени потребуется для того, чтобы на металлической поверхности образовался слой золота толщиной 0,5 мкм, если при средней квадратичной скорости 580 м/с молекулы золота создают давление 0,102 Па?

**2.31.** Два одинаковых теплоизолированных сосуда разделены между собой краном и оба заполнены кислородом так, что в первом сосуде концентрация молекул в три раза больше, чем во втором; средняя квадратичная скорость молекул в первом сосуде 400 м/с, а во втором 600 м/с. Какой станет средняя квадратичная скорость молекул, после открытия крана? Какая температура установится в сосудах?

**2.32.** Как изменится давление идеального газа в закрытом сосуде, если средняя квадратичная скорость молекул возрастет на 50%?

**2.33.** Какое максимальное число молекул газа должно находиться в сферическом сосуде, чтобы они не испытывали соударений? Диаметр сосуда 10 см, а эффективный диаметр молекул газа  $2,5 \cdot 10^{-10}$  м.

### **Уравнение состояния идеального газа.**

#### **Уравнение Клапейрона–Менделеева**

**2.34.** Газ при давлении 972 кПа и температуре 47 °С занимает объем 800 л. Каким будет давление, если при той же массе и температуре 285 К газ займет объем 855 л?

**2.35.** Газ при давлении 610 кПа и температуре 300 К занимает объем 546 л. Найти объем, занимаемый той же массой газа при давлении 453 кПа и температуре –23 °С.

**2.36.** Объем газа при давлении 720 кПа и температуре 288 К равен  $0,60 \text{ м}^3$ . При какой температуре та же масса газа займет объем  $1,6 \text{ м}^3$ , если давление станет равным 225 кПа?

**2.37.** Некоторая масса газа при давлении 126 кПа и температуре 295 К занимает объем 500 л. Найти объем газа при нормальных условиях.

**2.38.** Газ при давлении 32 кПа и температуре 290 К занимает объем 87 л. Найти объем той же массы газа при нормальных условиях.

**2.39.** Какое давление создают 40 л кислорода при температуре  $103^{\circ}\text{C}$ , если при нормальных условиях эта же масса газа занимает объем 13,65 л? Чему равна масса газа?

**2.40.** При нормальных условиях газ занимает объем 380 л. При какой температуре этот газ, занимая объем 210 л, создаст давление 150 кПа? Определить массу газа, если его плотность при нормальных условиях равна  $0,09 \text{ кг/м}^3$ .

**2.41.** Перед подъемом метеорологического шара-зонда давление газа в нем было равно 116 кПа при температуре  $17^{\circ}\text{C}$ . На какую часть изменится объем шара на высоте, для которой измеренные температура и давление атмосферного воздуха соответственно равны  $-30^{\circ}\text{C}$  и 85 кПа? Давление, создаваемое упругостью оболочки шара, считать неизменным и равным 5 кПа, а температуру газа — равной температуре окружающей среды.

**2.42.** Сколько весит воздух, занимающий объем 150 л при температуре 288 К и давлении 150 кПа?

**2.43.** С помощью насоса, забирающего за один рабочий ход  $35 \text{ см}^3$  атмосферного воздуха, наполняют сосуд вместимостью 0,45 л, в котором имеется воздух при температуре 286 К и атмосферном давлении. Какое давление устанавливается в сосуде после 20 рабочих ходов насоса, если температура воздуха в нем поднимается до 325 К? Температура окружающего воздуха равна 286 К, атмосферное давление — 101,3 кПа.

**2.44.** Нагнетательный насос засасывает с каждым ходом поршня 2 л воздуха при нормальном атмосферном давлении и температуре  $22^{\circ}\text{C}$ . Затем насос подает этот воздух в резервуар вместимостью  $0,15 \text{ м}^3$ , вначале сообщавшийся с атмосферой. Сколько рабочих ходов должен сделать поршень, чтобы давление в резервуаре стало равным 405,2 кПа при температуре 300 К?

**2.45.** Резиновая камера содержит воздух при температуре 300 К и нормальном атмосферном давлении. На какую глубину надо опустить камеру в воду с температурой 277 К, чтобы ее объем уменьшился в два раза?

**2.46.** Определить плотность воздуха на высоте 8,7 км над уровнем моря при температуре  $-47^{\circ}\text{C}$  и давлении 30,4 кПа.

**2.47.** Найти плотность углекислого газа при давлении 93,3 кПа и температуре 250 К и плотность водорода при давлении 0,6 МПа и температуре 293 К.

**2.48 \*)** Светильный газ подают по газопроводу при давлении 405,2 кПа и температуре 300 К, причем через поперечное сечение трубы

---

\*) Светильный газ — смесь горючих газов, главным образом водорода, метана, окиси углерода и др. Получается при термической обработке твердых топлив, например при коксовании каменного угля. Применяется как топливо в быту и в промышленности; используется для наполнения воздушных шаров. Молярная масса газа равна  $1,6 \cdot 10^{-2} \text{ кг/моль}$ .

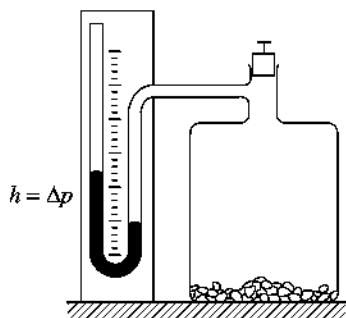
площадью  $8,0 \text{ см}^2$  за 20 мин проходит  $8,4 \text{ кг}$  газа. Определить скорость протекания газа по трубе.

**2.49.** Запаянный шар, из которого удален воздух, содержит  $9,0 \text{ г}$  воды. До какой температуры следует нагреть шар, чтобы он разорвался, если известно, что стенки шара выдерживают давление не более  $4,06 \text{ МПа}$ , а вместимость шара составляет  $1,2 \text{ л}^3$ ?

**2.50.** Найти массу углекислого газа в баллоне вместимостью  $40 \text{ л}$  при температуре  $288 \text{ К}$  и давлении  $5,07 \text{ МПа}$ .

**2.51.** В баллоне, вместимость которого  $25,6 \text{ л}$ , находится  $1,04 \text{ кг}$  азота при давлении  $3,55 \text{ МПа}$ . Определить температуру газа.

**2.52.** При экспериментальном определении универсальной газовой постоянной в сосуд вместимостью  $5 \text{ л}$  (см. рисунок) было введено  $0,88 \text{ г}$  «сухого льда», после чего сосуд был герметически закрыт. Разность уровней ртути в манометрической трубке при этом составила  $73,6 \text{ мм}$  (парциальное давление углекислого газа), а температура —  $295 \text{ К}$ . Определить на основании результатов опыта значение универсальной газовой постоянной.



К задаче 2.52

**2.53.** В цилиндре двигателя внутреннего сгорания до сжатия давление горючей смеси  $75,98 \text{ кПа}$ , ее температура  $315 \text{ К}$ ; в конце сжатия давление  $851 \text{ кПа}$ ; степень сжатия  $6,3^*)$ . Определить по этим данным температуру горючей смеси в конце такта сжатия.

**2.54.** Давление воздуха в цилиндре дизеля в начале такта сжатия  $86,1 \text{ кПа}$ , в конце такта сжатия  $3,44 \text{ МПа}$ , а температура соответственно  $323$  и  $923 \text{ К}$ . Определить степень сжатия (см. сноску к задаче 2.53). Сравнить полученный результат с числом, данным в условии предыдущей задачи, и объяснить причину столь значительного различия.

**2.55.** В баллоне находится идеальный газ при давлении  $40 \text{ МПа}$  и температуре  $300 \text{ К}$ . После того, как  $3/5$  массы содержащегося в баллоне газа выпустили, температура в нем понизилась до  $240 \text{ К}$ . Определить давление оставшегося в баллоне газа.

**2.56.** В баллоне вместимостью  $30 \text{ л}$  находится кислород при давлении  $7,29 \text{ МПа}$  и температуре  $264 \text{ К}$ . Спустя некоторое время после того, как часть газа из баллона выпустили, давление в нем упало до  $2,94 \text{ МПа}$ , а температура газа стала  $290 \text{ К}$ . Сколько кислорода было выпущено?

\*) Степень сжатия — отношение объемов, занимаемых газом в цилиндре двигателя при крайних положениях поршня.

**2.57.** На сколько изменится число молекул воздуха в помещении при повышении температуры от 17 до 25 °С? Атмосферное давление остается постоянным и равным 100 кПа; объем помещения 60 м<sup>3</sup>.

**2.58.** Стеклянная трубка, запаянная с одного конца, погружается открытым концом в воду вертикально на глубину  $h$ . До какой температуры  $T_1$  необходимо нагреть воздух в трубке, чтобы он полностью вытеснил из нее воду? Атмосферное давление  $p_a$ . Температура воздуха в трубке до погружения равна  $T$ ; плотность воды —  $\rho$ .

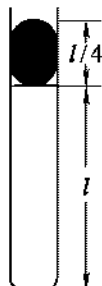
**2.59.** В вертикально расположенном цилиндре, площадь основания которого  $S$ , находится воздух при температуре  $T_1$ . На высоте  $h_1$  от основания цилиндра расположен поршень массой  $m_1$ . На сколько переместится поршень, если на него поставить груз массой  $m_2$ , а температуру воздуха в цилиндре повысить до  $T_2$ ? Атмосферное давление нормальное и равно  $p_0$ . Трением поршня пренебречь.

**2.60.** Воздушный шар вместимостью 500 м<sup>3</sup>, сообщающийся с атмосферой, заполнен горячим воздухом при температуре 250 °С. Температура окружающего воздуха 7 °С. Масса оболочки 80 кг. Определить подъемную силу воздушного шара при нормальном атмосферном давлении.

**2.61.** Воздушный шар, заполненный гелием, сообщается с атмосферой. Сколько гелия потребуется для заполнения воздушного шара, чтобы он смог поднять груз весом 2,45 кН? Каков объем воздушного шара? Температура гелия и воздуха равна 293 К. Атмосферное давление нормальное. Массой оболочки пренебречь.

**2.62.** Чтобы заставить всплыть подводную лодку, заполненные водой цистерны лодки продувают сжатым воздухом. Продувание проводится на глубине 25 м, причем воздух принимает температуру окружающей воды, равной 277 К. Какой объем воды можно выгнать из цистерн, впустив в них воздух из баллона вместимостью 30 л, если давление воздуха в нем при 285 К равно 14,7 МПа, а плотность морской воды — 1030 кг/м<sup>3</sup>?  $p_0 = 101,3$  кПа.

**2.63.** В стеклянной, запаянной с одного конца трубке находится водород, «запертый» столбиком ртути (см. рисунок) длиной 10 см. Первоначально трубка была расположена вертикально открытым концом вверх и газ в ней имел температуру 16 °С. Какова была при данных условиях длина столбика водорода, если после переворачивания трубки открытым концом вниз и нагревания газа до 39 °С ртутный столбик опустился на 7 см? Атмосферное давление считать равным 100 кПа.



**2.64 \*).** В вертикально расположенной трубке находится воздух, запертый столбиком ртути (см. рисунок к задаче 2.63). Воздух в трубке имеет температуру  $T_1$ . Атмосферное давление  $p_0$  равно давлению, которое создал бы вертикаль-

К задаче  
2.64

\*) Для решения задачи необходимо использовать понятие производной.

ный столбик ртути высотой  $l$ . До какой минимальной температуры  $T_{2\min}$  надо нагреть воздух в трубке, чтобы вся ртуть вылилась? Какой будет температура воздуха  $T_2$  в этот момент?

**2.65.** Влажный и сухой воздух — оба объемом  $1 \text{ м}^3$  — находятся при одинаковой температуре  $T$  и давлении  $p$ . В каком случае масса воздуха будет большей? Во сколько раз? Парциальное давление пара  $p_n = p/2$ .

**2.66.** В резервуар вместимостью 285 л, содержащий 14,5 г водорода при температуре 279 К, проник атмосферный воздух. Найти массу этого воздуха, если при той же температуре в резервуаре установилось давление 92,7 кПа.

**2.67.** Баллон содержит смесь двух газов при температуре  $T$  и давлении  $p$ . Массы и молярные массы газов соответственно равны  $m_1$ ,  $M_1$  и  $m_2$ ,  $M_2$ . Определить плотность и среднюю молярную массу смеси газов.

**2.68.** Какое давление создают 28,0 г кислорода, степень диссоциации которого 65%? Газ занимает объем 450 л при температуре 47,0 °С.

**2.69.** В закрытом сосуде, вместимость которого 0,5 дм<sup>3</sup>, находится 1,2 г парообразного иода  $I_2$ . При температуре 927 °С давление в сосуде было 98 кПа. Определить при данных условиях степень диссоциации молекул иода.

**2.70.** Используя данные условия задачи 2.68, определить давление углекислого газа ( $2\text{CO}_2 \rightleftharpoons 2\text{CO} + \text{O}_2$ ).

### Изохорный процесс

**2.71.** Баллоны электрических ламп заполняют азотом при пониженном до 50 кПа давлении. Почему?

**2.72.** Объяснить, для чего перед использованием медицинской банки внутрь ее вносят горящий, смоченный спиртом, ватный тампон.

**2.73.** В закрытом баллоне находится газ при температуре 295 К и давлении 105 кПа. Каким станет давление, если газ будет нагрет на 110 К? Расширение баллона пренебрежимо мало.

**2.74.** Газ находится в закрытом баллоне при температуре 294 К и давлении 810 кПа. При какой температуре давление газа станет равным 1,12 МПа?

**2.75.** Баллоны электрических ламп заполняют азотом при давлении 50,7 кПа и температуре 17,0 °С. Каким станет давление в горячей лампе в момент, когда температура газа достигнет 630 К?

**2.76 \*)** При температуре 33 °С манометр на баллоне с газом показывает 243 кПа. При какой температуре он покажет 202,6 кПа? Сколько покажет манометр при температуре -66 °С?  $p_0 = 101,3 \text{ кПа}$ .

**2.77 \*)** Манометр на баллоне с газом, показывавший 283,6 кПа, при понижении температуры газа на 85 К, уменьшил свои показания

\*) См. сноску к задаче 2.15.

на 101,3 кПа. Найти значения температуры газа в обоих случаях.  $p_0 = 101,3$  кПа.

**2.78.** Газ, находившийся в закрытом баллоне, нагрели от 300 до 360 К, причем давление возросло на 810,4 кПа. Определить первоначальное давление газа в баллоне. Расширением баллона пренебречь.

**2.79.** Давление в откачанной рентгеновской трубке при 15 °С равно  $1,2 \cdot 10^{-3}$  Па. Какое будет давление в работающей трубке при температурах 80 и 150 °С?

**2.80.** При изохорном нагревании газа на 1 К давление возрастает на  $1/n$  часть своего первоначального значения. Определить начальную температуру газа. Чему равен при этом температурный коэффициент давления? Как он связан с начальной температурой?

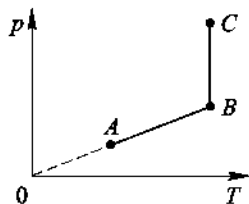
**2.81.** Двухатомный газ изохорно нагревают, увеличивая термодинамическую температуру в два раза. Считая массу постоянной, определить, во сколько раз возрастет при этом давление газа.

**2.82.** Начертить графики изохорного процесса в координатах  $pT$ ;  $VT$  и  $pV$ . Как изменятся графики, если, не изменяя объема, увеличить массу газа в два раза?

**2.83.** Начертить график изохорного процесса для случая  $p = 2,5T$ . Пользуясь графиком, определить, какое значение имел бы температурный коэффициент давления идеального газа, если принимать за начало отсчета не температуру 273 К, а другую температуру  $T_0$  (например, точку кипения воды).

**2.84.** По графику зависимости  $p = f(T)$  (см. рисунок) для данной массы  $m$  газа определить, как изменялось состояние газа при переходе от  $A$  к  $B$  и от  $B$  к  $C$ . Какой из точек соответствует больший объем? большая плотность?

**2.85.** Манометр на закрытом баллоне с газом показывает давление 507 кПа. При понижении температуры газа на 42 К показание манометра уменьшается на 55 кПа. Найти значения температуры в обоих случаях. Атмосферное давление нормальное.



К задаче 2.84

**2.86.** Манометр на баллоне с пропаном  $C_3H_8$  показывает 608 кПа при температуре 22 °С. При понижении температуры до 253 К показание манометра уменьшается до 81 кПа. Вместимость баллона 25 л. Не произошла ли утечка газа за время между снятиями показаний манометра? Если да, то на сколько изменилась масса газа в баллоне?  $p_0 = 101,3$  кПа.

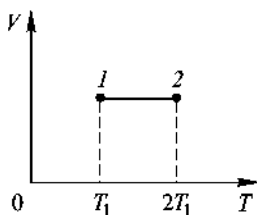
**2.87.** Баллон, содержащий газ при температуре 25 °С и давлении 810 кПа, может выдержать максимальное давление 5,1 МПа. На сколько кельвин можно нагреть баллон с газом, чтобы оставался пятикратный запас прочности?

**2.88.** Кислород, заключенный в баллон вместимостью 330 л, находится при температуре 294 К и давлении 0,3 МПа. Когда из баллона

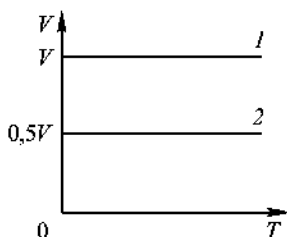
откачали 296 г газа, температура снизилась до 288 К. На сколько при этом уменьшилось давление газа?

**2.89.** Построить графики изохорного процесса для объема газа (см. задачу 2.84), если  $m_1 = 2m$ ,  $p_1 = p/2$ .

**2.90.** Газ данной массы переведен из состояния 1 в состояние 2 (см. рисунок). Как изменились плотность, давление, средняя кинетическая энергия молекул и внутренняя энергия газа?



К задаче 2.90

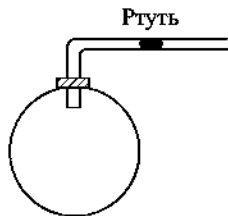


К задаче 2.91

**2.91.** Дан график  $V(T)$ , изображенный на рисунке. Считая массу газа одинаковой, построить графики этих процессов в координатах  $pT$ .

### Изобарный процесс

**2.92.** Какой процесс изменения состояния газа, находящегося в колбе (см. рисунок), будет происходить при нагревании или охлаждении колбы, если атмосферное давление не будет изменяться?



К задаче 2.92

**2.93.** При температуре 294 К объем газа равен  $0,35 \text{ дм}^3$ . При какой температуре объем той же массы газа увеличится до  $0,40 \text{ дм}^3$ ?

**2.94.** Газ, имеющий температуру 306 К, охлаждаю на 32 К, при этом объем газа уменьшается на  $2,4 \text{ дм}^3$ . Каков первоначальный объем данной массы газа?

**2.95.** На сколько переместится капля ртути в трубке (см. рисунок к задаче 2.92) площадью поперечного сечения  $12 \text{ мм}^2$  при нагревании колбы на 1 К? Объем газа в колбе с трубкой при температуре 290 К равен  $0,50 \text{ дм}^3$ .

**2.96.** В ванночку, наполненную водой при температуре 312 К, опускают перевернутый цилиндрический стакан, причем уровень воды внутри стакана и в ванночке одинаков. Расстояние от уровня воды в стакане до его дна равно 160 мм. На сколько поднимется уровень воды в стакане, если температура воды в ванночке понизится до 273 К? Изменение давления воздуха в стакане не учитывать.



**2.97.** Стекланный баллончик вместимостью  $8,5 \text{ см}^3$ , нагретый до  $320^\circ \text{C}$ , приводят в соприкосновение со ртутью (см. рисунок). Сколько ртути войдет в баллончик при понижении температуры до  $20^\circ \text{C}$ ?



К задаче 2.97

**2.98.** В ванночку, наполненную теплой водой, опрокинут стакан. Расстояние от уровня воды до дна стакана равно  $h$ , а уровень воды внутри и вне стакана одинаков. При понижении температуры воды и стакана до  $288 \text{ K}$ , уровень воды в стакане повышается на  $(1/20)h$ . Определить начальную температуру воды в ванночке.

**2.99.** Топочные газы при выходе из трубы в атмосферу имеют температуру  $400 \text{ K}$ , причем первоначальный объем их при этом уменьшается в  $3,5$  раза. Считая давление неизменным, определить первоначальную температуру газов.

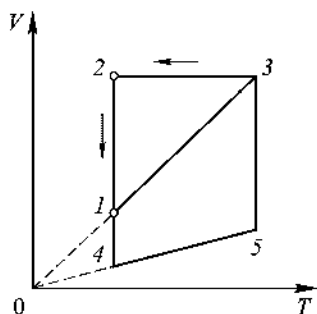
**2.100.** По цилиндрической дымовой трубе поднимаются топочные газы. В нижней части трубы их температура  $1073 \text{ K}$  и скорость  $6,0 \text{ м/с}$ . С какой скоростью они движутся в верхней части трубы, где их температура равна  $423 \text{ K}$ ? Изменением давления в трубе пренебречь.

**2.101.** На сколько изменится масса воздуха в помещении размером  $4 \times 5 \times 3 \text{ м}$  при изменении температуры от  $15$  до  $28^\circ \text{C}$ ? Атмосферное давление нормальное.

**2.102.** При изобарном нагревании газа на  $1 \text{ K}$  его объем увеличивается на  $0,002$  от первоначального объема. Определить начальную температуру газа. Определить значение температурного коэффициента объемного расширения, если найденную температуру принять за начало отсчета.

**2.103.** Начертить график изобарного процесса в координатах  $V, T; p, V; p, T$ .

**2.104.** Два различных состояния одной и той же массы газа отмечены на  $VT$ -диаграмме точками  $1$  и  $2$  (см. рисунок). Какая из этих точек соответствует большему давлению? Указать на рисунке графики изохорного и двух изобарных процессов. Какой из двух последних проходит при большем давлении?



К задаче 2.104

**2.105.** На сколько кельвин надо нагреть воздух при постоянном давлении, чтобы его объем увеличился в два раза? Начальная температура воздуха  $17^\circ \text{C}$ .

**2.106.** По графику, изображенному на рисунке к задаче 2.84 (участок  $AB$ ), построить графики изобарного процесса для той же массы газа, но при давлении  $p_1 = 2p$  и  $p_2 = \frac{1}{2}p$ .

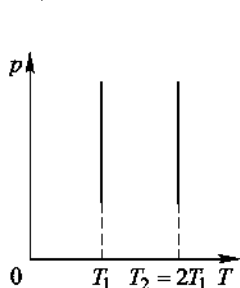
### Изотермический процесс

**2.107.** Каким образом можно осуществить изотермический процесс?

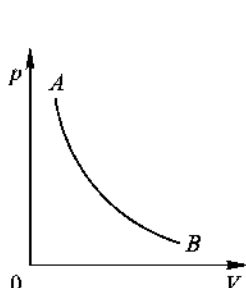
**2.108.** По графикам, изображенным на рисунке, построить графики в координатах  $p$ ,  $V$  и  $V$ ,  $T$ .

**2.109.** При каких условиях изотерма, изображенная на рисунке, будет удовлетворять изотермическим процессам, протекающим при различных температурах?

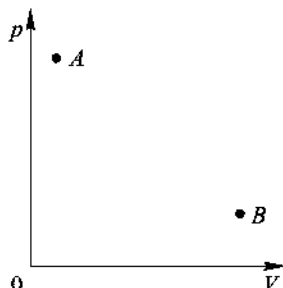
**2.110.** По изотерме, изображенной на рисунке к задаче 2.109, построить график изотермического процесса для той же температуры, но для вдвое большей массы того же газа.



К задаче 2.108



К задаче 2.109

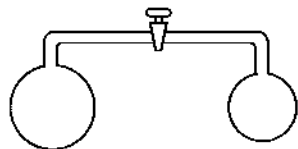


К задаче 2.111

**2.111.** На рисунке точками  $A$  и  $B$  зафиксированы два состояния одной и той же массы газа. Какой из этих точек будет соответствовать большая энергия газа и во сколько раз?

**2.112.** Аэростат, наполненный газом при нормальном атмосферном давлении, поднялся на высоту, где объем его увеличился в 1,3 раза. Каким стало давление газа? Влиянием упругости оболочки аэростата и изменением температуры пренебречь.

**2.113.** Резиновая камера содержит воздух при давлении 104 кПа. Камеру сжимают так, что объем ее уменьшается на  $2/5$  прежней величины. Каким будет теперь давление? Температуру и массу газа считать неизменными.



К задаче 2.115

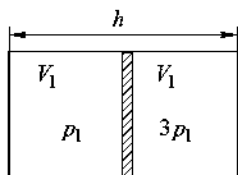
**2.114.** Давление данной массы газа при постоянной температуре увеличилось на  $1/n$  часть первоначального. На сколько при этом уменьшился объем газа?

**2.115.** Два сосуда вместимостью 6,0 и 4,0 дм<sup>3</sup> соединены трубкой с краном, как показано на рисунке. Давление газа в большем сосуде 300 кПа; в меньшем газ отсутствует. Какое установится давление после того, как кран будет открыт? Процесс считать изотермическим. Вместимостью соединительной трубки пренебречь.

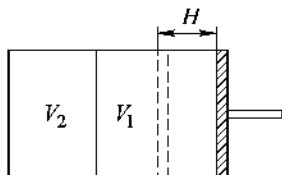
**2.116.** По условию задачи 2.115 определить, каким будет давление в сосудах после их соединения, если в меньшем сосуде находился газ при давлении 45 кПа.

**2.117.** Цилиндр длиной  $h = 60$  см разделен на две равные части подвижным поршнем, который может ходить без трения (см. рисунок). При закрепленном поршне обе половины цилиндра заполняют газом так, что давление в одной из них в три раза больше, чем в другой. На сколько переместится поршень, если ему предоставить возможность двигаться?

**2.118.** Горизонтальный, закрытый с обоих концов цилиндр разделен двумя закрепленными поршнями на три секции. Вместимость и давление в каждой секции равны  $V_1, p_1, V_2, p_2$  и  $V_3, p_3$ . Определить давление и объем газа в каждой секции после освобождения поршней. Изменением температуры газа и трением поршней пренебречь.



К задаче 2.117



К задаче 2.119

**2.119.** Горизонтально расположенный цилиндр с поршнем разделен подвижной перегородкой на две части, вместимости которых  $V_1$  и  $V_2$  (см. рисунок). Давление газа во всем цилиндре одинаково и равно  $p$ . На какое расстояние  $h$  переместится перегородка, если поршень переместить на расстояние  $H$ ? Процесс изотермический; трением перегородки пренебречь.

**2.120.** В трубке, служащей для проверки закона Бойля–Мариотта, находится столбик ртути длиной 75 мм. Когда трубка расположена вертикально закрытым концом вниз, длина воздушного столбика равна 120 мм; при горизонтальном расположении трубки длина воздушного столбика стала равной 132 мм. Определить атмосферное давление. Вычислить длину воздушного столбика, когда трубка расположена закрытым концом вверх.

**2.121.** Какой будет длина воздушного столбика (см. задачу 2.120), если трубку наклонить под углом  $30^\circ$  к горизонту открытым концом вверх?

**2.122.** В трубке, запаянной с одного конца, находится воздух, запертый столбиком ртути длиной 100 мм. Когда трубка расположена горизонтально, длина этого воздушного столбика 90,5 мм; если трубку расположить вертикально открытым концом вверх, запертый столбик воздуха имеет длину 80 мм. Определить атмосферное давление.

**2.123.** В воде всплывает пузырек воздуха. На какой глубине его объем в два раза меньше, чем у поверхности воды? Каков будет объем

пузырька у поверхности воды, если на глубине 3,0 м он равен  $5,0 \text{ мм}^3$ ? Атмосферное давление нормальное, изменение температуры воды с глубиной не учитывать.

**2.124.** Тонкостенный химический стакан вместимостью  $300 \text{ см}^3$  и массой 100 г погружают в воду, держа вверх дном. На какой минимальной глубине он перестанет всплывать и начнет погружаться? Атмосферное давление нормальное, изменение температуры воды с глубиной не учитывать.

**2.125.** В камеру футбольного мяча вместимостью  $2,5 \text{ дм}^3$  накачивают воздух насосом, забирающим при каждом качании  $150 \text{ см}^3$  атмосферного воздуха при нормальном давлении. Каким будет давление в камере мяча после 50 качаний, если вначале она была пустой?

**2.126.** Баллон вместимостью 45 л соединен с компрессором, который каждую секунду подает 2,5 л воздуха из атмосферы. Через сколько времени давление в баллоне повысится в шесть раз, если вначале оно было равно атмосферному?

**2.127.** Автомобильную камеру вместимостью  $12 \text{ дм}^3$  необходимо накачать до давления 355 кПа. Определить число качаний, которое следует сделать насосом, забирающим при каждом качании  $500 \text{ см}^3$  воздуха при нормальном давлении, если камера вначале была пустой; затем заполненной воздухом наполовину; полностью заполненной воздухом при нормальном атмосферном давлении.

**2.128.** Какое давление установится в резервуаре пневматического тормоза трамвайного вагона после 250 качаний насоса? Вместимость резервуара равна  $30 \text{ дм}^3$ , а насос за одно качание подает  $600 \text{ см}^3$  воздуха при нормальном давлении. Изменением температуры пренебречь.

**2.129.** Давление воздуха в резервуаре компрессора равно атмосферному. Объем цилиндра нагнетающего насоса в 40 раз меньше вместимости резервуара. Сколько рабочих ходов должен сделать поршень компрессора, чтобы давление в резервуаре стало 405 кПа? Изменением температуры пренебречь.

**2.130.** Давление воздуха в сосуде равно 102,4 кПа. Вместимость цилиндра разрежающего насоса в три раза меньше вместимости сосуда. Какое давление установится в сосуде после трех рабочих ходов поршня? После четырех ходов? Изменением температуры пренебречь.

**2.131.** Вместимость сосуда  $3,0 \text{ дм}^3$ , а цилиндра разрежающего насоса  $200 \text{ см}^3$ . После 48 рабочих ходов поршня в сосуде установилось давление 4,53 кПа. Каково было первоначальное давление газа в сосуде? Изменением температуры пренебречь.

**2.132.** В вертикально поставленном цилиндре под поршнем находится  $300,0 \text{ см}^3$  газа. Масса поршня 6,75 кг, его площадь  $25 \text{ см}^2$ . На поршень поставили гири, и он опустился, сжав газ до объема  $212 \text{ см}^3$ . Найти массу гирь. Процесс изотермический, атмосферное давление нормальное.

**2.133.** В вертикально поставленном цилиндре под поршнем находится газ. Масса поршня равна 3,0 кг, его площадь  $20 \text{ см}^2$ . На поршень

нажали с силой 490 Н, и он опустился до высоты 13 см, считая от дна цилиндра. Каков первоначальный объем газа? Атмосферное давление нормальное, температура постоянная.

**2.134.** Какие отступления от закона Бойля–Мариотта можно предсказать, если учитывать силы притяжения и отталкивания между молекулами газа?

### § 3. Основы термодинамики

**Пример 11.** В алюминиевый калориметр массой 60 г, содержащий 150 г воды при 18 °С, погрузили латунный цилиндр массой 150 г, нагретый до температуры 100 °С. Считая, что потери теплоты в окружающую среду составили 15 %, найти установившуюся температуру. Изобразить графически в координатах  $t, Q$  процессы, происходящие при теплообмене.

**Дано:**  $m_a = 60 \text{ г} = 0,06 \text{ кг}$  — масса калориметра;  $m_b = 150 \text{ г} = 0,15 \text{ кг}$  — масса воды;  $t_1 = 18 \text{ °С}$  — температура воды и калориметра;  $m_d = 150 \text{ г} = 0,15 \text{ кг}$  — масса латунного цилиндра;  $t_2 = 100 \text{ °С}$  — его температура;  $\eta = 85 \% = 0,85$  — КПД системы. Из таблиц:  $c_a = 880 \text{ Дж}/(\text{кг} \cdot \text{К})$ ,  $c_b = 4190 \text{ Дж}/(\text{кг} \cdot \text{К})$ ,  $c_d = 380 \text{ Дж}/(\text{кг} \cdot \text{К})$  — удельные теплоемкости тел.

**Найти:**  $\Theta$  — установившуюся температуру.

**Решение.** Представим графически процесс теплообмена (см. рисунок).

Калориметр и вода при нагревании на  $\Theta - t_1$  получают количество теплоты  $Q_1 = (c_a m_a + c_b m_b) \times (\Theta - t_1)$ . Как показано на графике, латунный цилиндр, остывая от  $t_2$  до  $\Theta$ , отдает количество теплоты  $Q_2 = c_d m_d (t_2 - \Theta)$ . На основании закона сохранения энергии и с учетом потерь можно написать

$$Q_1 = \eta Q_2$$

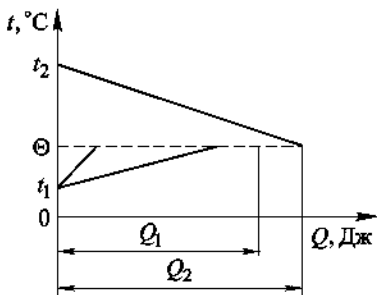
или

$$(c_a m_a + c_b m_b)(\Theta - t_1) = \eta c_d m_d (t_2 - \Theta).$$

В окончательном виде для  $\Theta$  получим

$$\begin{aligned} \Theta &= \frac{\eta c_d m_d t_2 + (c_a m_a + c_b m_b) t_1}{c_a m_a + c_b m_b + \eta c_d m_d} = \\ &= \frac{0,85 \cdot 380 \cdot 0,15 \cdot 100 + (880 \cdot 0,06 + 4190 \cdot 0,15) \cdot 18}{880 \cdot 0,06 + 4190 \cdot 0,15 + 0,85 \cdot 380 \cdot 0,15} \frac{\text{Дж}/(\text{кг} \cdot \text{К}) \cdot \text{кг} \cdot \text{°С}}{\text{Дж}/(\text{кг} \cdot \text{К}) \cdot \text{кг}} \approx \\ &\approx 23,4 \text{ °С}. \end{aligned}$$

**Ответ:**  $\Theta = 23,4 \text{ °С}$ .



К примеру 11

**Пример 12.** Из орудия, расположенного на возвышенности, вылетает стальной снаряд со скоростью 850 м/с. Точка падения снаряда находится ниже орудия на 150 м. Считая, что в момент удара о землю 60 % энергии снаряда расходуется на его нагревание, определить, на сколько кельвин повысится температура снаряда.

*Дано:*  $v_0 = 850$  м/с — начальная скорость снаряда;  $h = 150$  м — разность уровней;  $k = 60\% = 0,6$  — доля энергии снаряда, пошедшая на его нагревание. Из таблиц:  $c = 460$  Дж/(кг·К) — удельная теплоемкость стали,  $g = 9,8$  м/с<sup>2</sup> — ускорение свободного падения.

*Найти:*  $\Delta t$  — изменение температуры снаряда.

**Решение.** Для решения задачи используется закон сохранения энергии:  $\Delta E_{\text{мех}} = \Delta U$ , где  $\Delta E_{\text{мех}} = k(mgh + mv_0^2/2)$  — механическая энергия, пошедшая на нагревание снаряда;  $\Delta U = cm\Delta t$  — увеличение внутренней энергии снаряда. Следовательно,

$$km(gh + 0,5v_0^2) = cm\Delta t,$$

откуда

$$\Delta t = \frac{k(gh + 0,5v_0^2)}{c}.$$

Подставляя числовые значения, получаем

$$\Delta t = \frac{0,6(9,8 \cdot 150 + 0,5 \cdot 850^2)}{460} \frac{\text{м}^2/\text{с}^2}{\text{Дж}/(\text{кг} \cdot \text{К})} = 473,11 \text{ К} \approx 473 \text{ К}.$$

*Ответ:*  $\Delta t \approx 473 \text{ К}$ .

**Пример 13.** Вычислить шаг сверла, если при сверлении в медном цилиндре осевого отверстия диаметром 25 мм цилиндр нагрелся на 43 К. Вращающий момент, приложенный к сверлу, равен 16,2 Н·м; 70 % затрачиваемой энергии превращается во внутреннюю энергию цилиндра.

*Дано:*  $d = 2,5 \cdot 10^{-2}$  м — диаметр осевого отверстия;  $\Delta T = 43 \text{ К}$  — повышение температуры медного цилиндра;  $M = 16,2 \text{ Н} \cdot \text{м}$  — вращающий момент, развиваемый при сверлении;  $k = 70\% = 0,70$  — часть энергии, расходуемой на нагревание цилиндра. Из таблиц:  $\rho = 8900 \text{ кг}/\text{м}^3$  — плотность меди,  $c = 380 \text{ Дж}/(\text{кг} \cdot \text{К})$  — удельная теплоемкость меди.

*Найти:*  $p$  — шаг сверла.

**Решение.** Искомый шаг  $p$  можно найти, разделив высоту цилиндра  $h$  на число оборотов сверла  $n$ , которое необходимо сделать, чтобы просверлить цилиндр насквозь:  $p = h/n$ .

При сверлении выделяется количество теплоты

$$Q = cm\Delta T = cSh\rho\Delta T,$$

где  $S = \pi d^2/4$ . Отсюда  $h = Q/(cS\rho\Delta T)$ .

Величина  $n$  определяется из выражения для работы  $A$ , совершенной при сверлении цилиндра:

$$A = M \cdot 2\pi n, \quad \text{откуда} \quad n = \frac{A}{2\pi M}.$$

Подставив значения  $h$  и  $n$  в выражение для  $p$  и приняв во внимание, что по условию  $Q/A = k$ , получим

$$p = \frac{2\pi M}{\rho S c \Delta T} \frac{Q}{A} = \frac{2\pi M k}{\rho S c \Delta T}.$$

В окончательном виде

$$p = \frac{2\pi M k}{\rho(\pi d^2/4)c\Delta T} = \frac{8Mk}{\rho d^2 c \Delta T}.$$

Подставляя числовые значения, получаем

$$p = \frac{8 \cdot 16,2 \cdot 0,70}{380 \cdot 625 \cdot 10^{-6} \cdot 8900 \cdot 43} \frac{\text{Н} \cdot \text{м}}{\text{Дж}/(\text{кг} \cdot \text{К}) \cdot \text{м}^2 \cdot \text{кг}/\text{м}^3 \cdot \text{К}} \approx 1,0 \text{ мм}.$$

Ответ:  $p \approx 1,0 \text{ мм}$ .

**Пример 14.** Определить массу бензина, необходимого для двигателя автомобиля, чтобы проехать 300 км, если КПД двигателя 24%. Вес машины с грузом 49 кН, а сопротивление движению составляет 0,050 веса машины. Найти мощность, развиваемую автомобилем при скорости 90 км/ч по горизонтальной дороге.

Дано:  $s = 300 \text{ км} = 3,0 \cdot 10^5 \text{ м}$  — пройденное расстояние;  $\eta = 24 \% = 0,24$  — КПД двигателя;  $G = 49 \text{ кН} = 4,9 \cdot 10^4 \text{ Н}$  — вес автомобиля с грузом;  $F = 0,050 G$  — сила сопротивления;  $v = 90 \text{ км/ч} = 25 \text{ м/с}$  — скорость автомобиля. Из таблиц:  $q = 4,6 \cdot 10^7 \text{ Дж/кг}$  — удельная теплота сгорания бензина.

Найти:  $m$  — массу израсходованного бензина;  $P$  — мощность, развиваемую двигателем автомобиля.

Решение. Для нахождения  $m$  запишем формулу для КПД:

$$\eta = \frac{F_{\tau} s}{qm},$$

где  $F_{\tau}$  — сила тяги, которая при равномерном движении автомобиля по горизонтальной дороге равна силе сопротивления  $F$ :  $F_{\tau} = F = 0,050 G$ ;  $\eta = 0,050 G s / (qm)$ . Отсюда  $m = 0,050 G s / (\eta q)$ .

Подставив числовые значения, найдем  $m$ :

$$m = \frac{0,050 \cdot 4,9 \cdot 10^4 \cdot 3,0 \cdot 10^5}{0,24 \cdot 4,6 \cdot 10^7} \frac{\text{Н} \cdot \text{м}}{\text{Дж/кг}} \approx 67 \text{ кг}.$$

Найдем теперь мощность  $P$ , развиваемую двигателем автомобиля:

$$P = F_{\tau} v,$$

где  $F_{\tau} = 0,050 G$ , что справедливо при равномерном движении по горизонтальной дороге. Получаем  $P = 0,050 \cdot 4,9 \cdot 10^4 \cdot 25 \text{ Н} \cdot \text{м/с} \approx 61,3 \text{ кВт}$ .

Ответ:  $m \approx 67 \text{ кг}$ ;  $P \approx 61,3 \text{ кВт}$ .

**Пример 15.** Используя условие примера 8 и ответ к нему, найти количество теплоты, поглощенной газом (воздухом), и изменение его внутренней энергии; вычислить работу газа при изобарном процессе.

*Дано:*  $T_1 = 300$  К — начальная температура;  $p_1 = 2,03 \cdot 10^5$  Па — начальное давление;  $V_1 = 120 \cdot 10^{-3}$  м<sup>3</sup> и  $V_2 = 150 \cdot 10^{-3}$  м<sup>3</sup> — начальный и конечный объемы газа;  $T_2 = 383$  К и  $T'_2 = 375$  К — конечные температуры газа при изохорном и изобарном процессах;  $m \approx 0,283$  кг — масса газа. Из таблиц:  $M = 29 \cdot 10^{-3}$  кг/моль — молярная масса воздуха,  $c_p = 1,0 \cdot 10^3$  Дж/(кг · К) — удельная теплоемкость воздуха при постоянном давлении,  $R = 8,31$  Дж/(моль · К) — универсальная газовая постоянная.

*Найти:*  $Q_V$  и  $Q_p$  — количества теплоты, поглощенные газом при изохорном и изобарном процессах;  $A$  — совершенную газом работу;  $\Delta U_V$  и  $\Delta U_p$  — изменение внутренней энергии в обоих случаях.

**Решение.** При изохорном процессе

$$Q_V = c_V m \Delta T_1,$$

при изобарном

$$Q_p = c_p m \Delta T_2.$$

Здесь  $c_V$  и  $c_p$  — удельные теплоемкости газа при постоянных объеме и давлении; для воздуха  $c_p/c_V = 1,4$ ;  $\Delta T_1 = T_2 - T_1$ ;  $\Delta T_2 = T'_2 - T_1$ . Работа, совершенная газом при изобарном процессе, находится по формуле

$$A_p = p_1 \Delta V = \frac{m}{M} R \Delta T_1.$$

Работа газа при изохорном процессе  $A_V = 0$ . Согласно первому началу термодинамики  $\Delta U_p = Q_p - A_p$  и  $\Delta U_V = Q_V$ . Подставляя числовые значения и производя вычисления, получаем для изохорного процесса

$$Q_V = \Delta U_V = \frac{10^3}{1,4} \cdot 0,283 \cdot 83 \frac{\text{Дж} \cdot \text{кг} \cdot \text{К}}{\text{кг} \cdot \text{К}} = 16,8 \cdot 10^3 \text{ Дж} = 16,8 \text{ кДж};$$

для изобарного процесса:

$$Q_p = \Delta U_p = 10^3 \cdot 0,283 \cdot 75 \frac{\text{Дж} \cdot \text{кг} \cdot \text{К}}{\text{кг} \cdot \text{К}} = 21,2 \cdot 10^3 \text{ Дж} = 21,2 \text{ кДж};$$

$$A_p = 2,03 \cdot 10^5 \cdot 30 \cdot 10^{-3} \text{ Па} \cdot \text{м}^3 = 6,09 \cdot 10^3 \text{ Дж} \approx 6,1 \text{ кДж};$$

$$\Delta U_p = 21,2 \text{ кДж} - 6,1 \text{ кДж} = 15,1 \text{ кДж}.$$

**Ответ:**  $Q_V = \Delta U_V = 16,8$  кДж;  $Q_p = 21,2$  кДж;  $A_p \approx 6,1$  кДж;  $\Delta U_p = 15,1$  кДж;  $A_V = 0$ .

**Пример 16.** Углекислому газу сообщили 16 кДж теплоты. Определить работу, совершенную газом, и изменение его внутренней энергии при изотермическом, изохорном и изобарном процессах. Определить молярную теплоемкость газа при изохорном и изобарном процессах.



Дано:  $Q = 16 \text{ кДж} = 1,6 \cdot 10^4 \text{ Дж}$  — количество теплоты, переданной газу;  $i = 6$  — число степеней свободы (газ трехатомный). Из таблиц:  $R = 8,31 \text{ Дж}/(\text{моль} \cdot \text{К})$  — универсальная газовая постоянная.

Найти:  $A_1$ ,  $A_2$  и  $A_3$  — работу газа при изопроцессах;  $\Delta U_1$ ,  $\Delta U_2$  и  $\Delta U_3$  — изменение внутренней энергии газа для тех же процессов;  $C_V$  и  $C_p$  — молярные теплоемкости газа при постоянном объеме и постоянном давлении.

Решение. Для решения задачи воспользуемся первым началом термодинамики и применим его к заданным изопроцессам.

1. *Изотермический процесс.* Так как  $T = \text{const}$ , т.е.  $\Delta T = 0$ , то  $\Delta U_1 = 0$ . Отсюда  $A_1 = Q = 16 \text{ кДж}$ .

2. *Изохорный процесс.* Так как процесс протекает при постоянном объеме, т.е.  $\Delta V = 0$ , то  $A_2 = p\Delta V = 0$ . Поэтому все количество теплоты, переданное газу, идет на увеличение его внутренней энергии  $\Delta U_2 = Q = 16 \text{ кДж}$ .

3. *Изобарный процесс.*

$$A_3 = p\Delta V = \frac{m}{M} R\Delta T, \quad \Delta U_3 = \frac{i}{2} \frac{m}{M} R\Delta T = \frac{i}{2} A_3.$$

Тогда

$$Q = A_3 + \Delta U_3 = A_3 + \frac{i}{2} A_3 = \left(1 + \frac{i}{2}\right) A_3;$$

отсюда

$$A_3 = \frac{Q}{1 + i/2} = \frac{16 \text{ кДж}}{1 + 6/2} = 4 \text{ кДж};$$

$$\Delta U_3 = Q - A_3 = 16 \text{ кДж} - 4 \text{ кДж} = 12 \text{ кДж}.$$

*Примечание.* Изменение внутренней энергии можно найти иначе:

$$\Delta U_3 = \frac{i}{2} A_3 = \frac{6}{2} \cdot 4 \text{ кДж} = 12 \text{ кДж}.$$

Найдем молярную теплоемкость при изохорном процессе:

$$\left. \begin{aligned} Q &= C_V \frac{m}{M} \Delta T, \\ Q &= \frac{i}{2} \frac{m}{M} R\Delta T \end{aligned} \right\} \Rightarrow C_V = \frac{i}{2} R.$$

Для трехатомного газа

$$C_V = \frac{6}{2} \cdot 8,31 \text{ Дж}/(\text{моль} \cdot \text{К}) \approx 25 \text{ Дж}/(\text{моль} \cdot \text{К}).$$

При изобарном процессе

$$Q = C_p \frac{m}{M} \Delta T,$$

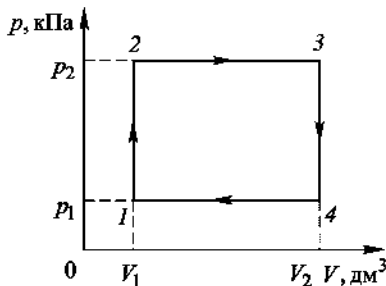
$$Q = (\Delta U_3 + A_3) = \frac{i}{2} \frac{m}{M} R\Delta T + \frac{m}{M} R\Delta T = \left(\frac{i}{2} + 1\right) \frac{m}{M} R\Delta T.$$

Приравнявая правые части выражений для  $Q$ , получаем

$$C_p = \left(\frac{i}{2} + 1\right) R = \left(\frac{6}{2} + 1\right) \cdot 8,31 \text{ Дж}/(\text{моль} \cdot \text{К}) \approx 33 \text{ Дж}/(\text{моль} \cdot \text{К}).$$

Ответ:  $A_1 = 16 \text{ кДж}$ ;  $\Delta U_1 = 0$ ;  $A_2 = 0$ ;  $\Delta U_2 = 16 \text{ кДж}$ ;  $A_3 = 4 \text{ кДж}$ ;  $\Delta U_3 = 12 \text{ кДж}$ ;  $C_V \approx 25 \text{ Дж}/(\text{моль} \cdot \text{К})$  и  $C_p \approx 33 \text{ Дж}/(\text{моль} \cdot \text{К})$ .

**Пример 17.** Состояние двухатомного газа меняется по замкнутому циклу, показанному на рисунке ( $V_1 = 0,25 \text{ дм}^3$ ,  $p_1 = 100 \text{ кПа}$ ;  $V_2 = 1,5 \text{ дм}^3$ ;  $p_2 = 1,0 \text{ МПа}$ ). Определить: 1) количество теплоты  $Q_1$ , полученной от нагревателя; 2) количество теплоты  $Q_{II}$ , отданной холодильнику; 3) работу, совершенную газом за один цикл; 4) КПД цикла; 5) на сколько изменится внутренняя энергия газа после его возвращения в первоначальное состояние. Указать на графике точки с минимальным и максимальным значениями внутренней энергии, и определить эти значения.



К примеру 17

Дано:  $V_1 = 0,25 \text{ дм}^3 = 0,25 \cdot 10^{-3} \text{ м}^3$ ,  $p_1 = 100 \text{ кПа} = 1,0 \cdot 10^5 \text{ Па}$  — параметры, определяющие состояние газа в точке 1;  $V_2 = 1,5 \text{ дм}^3 = 1,5 \cdot 10^{-3} \text{ м}^3$ ,  $p_2 = 1,0 \text{ МПа} = 1,0 \cdot 10^6 \text{ Па}$  — параметры, определяющие состояние газа в точке 3;  $i = 5$  — число степеней свободы (газ двухатомный).

Найти:  $Q_1$  — количество теплоты, полученной от нагревателя;  $Q_{II}$  — количество теплоты, отданной холодильнику;  $A$  — работу, совершенную газом за один цикл;  $\eta$  — КПД цикла;  $\Delta U$  — изменение внутренней энергии газа к концу первого цикла; указать точки с минимальным и максимальным значениями внутренней энергии и определить эти значения.

Решение. 1. На участке 1–2–3 газ получает энергию  $Q_1$  от нагревателя:

$$Q_1 = \Delta U_{1-3} + A_{1-2} + A_{2-3}.$$

Поскольку при изохорном процессе работа не совершается,  $A_{1-2} = 0$ ; следовательно,

$$Q_1 = \Delta U_{1-3} + A_{2-3},$$

где

$$\Delta U_{1-3} = U_3 - U_1 = \frac{i}{2} p_2 V_2 - \frac{i}{2} p_1 V_1 = \frac{i}{2} (p_2 V_2 - p_1 V_1),$$

$$A_{2-3} = p_2 (V_2 - V_1).$$

В окончательном виде

$$Q_1 = \frac{i}{2} (p_2 V_2 - p_1 V_1) + p_2 (V_2 - V_1).$$

Произведем вычисления

$$Q_I = \frac{5}{2} (10^6 \cdot 1,5 \cdot 10^{-3} - 10^5 \cdot 0,25 \cdot 10^{-3}) \text{ Па} \cdot \text{м}^3 + \\ + 10^6 (1,5 \cdot 10^{-3} - 0,25 \cdot 10^{-3}) \text{ Па} \cdot \text{м}^3 = 4937 \text{ Дж} \approx 4,9 \text{ кДж}.$$

2. На участке 3-4-1 газ отдает энергию холодильнику; при этом происходит уменьшение внутренней энергии в процессе охлаждения газа до первоначального состояния в точке 1, а на участке 4-1 совершается отрицательная работа

$$Q_{II} = \Delta U_{3-4-1} + A_{3-4} + A_{4-1}.$$

Так как  $A_{3-4} = 0$ , то

$$|Q_{II}| = U_3 - U_1 + A_{1-4} = \frac{i}{2} (p_2 V_2 - p_1 V_1) + p_1 (V_2 - V_1) = \\ = \frac{5}{2} (10^6 \cdot 1,5 \cdot 10^{-3} - 10^5 \cdot 0,25 \cdot 10^{-3}) \text{ Па} \cdot \text{м}^3 + \\ + 10^5 \cdot 1,25 \cdot 10^{-3} \text{ Па} \cdot \text{м}^3 = 3813 \text{ Дж} \approx 3,8 \text{ кДж}.$$

3.  $|A| = |Q_I| - |Q_{II}| = 4937 \text{ Дж} - 3813 \text{ Дж} = 1124 \text{ Дж} \approx 1,12 \text{ кДж}.$

*Примечание.* Можно привести другой способ определения  $A$ :

$$|A| = |A_{2-3}| - |A_{4-1}| = p_2 (V_2 - V_1) - p_1 (V_2 - V_1) = (p_2 - p_1) (V_2 - V_1); \\ A = 9 \cdot 10^5 \cdot 1,25 \cdot 10^{-3} \text{ Па} \cdot \text{м}^3 = 1125 \text{ Дж} \approx 1,12 \text{ кДж}.$$

4. Для определения КПД можно воспользоваться формулами

$$\eta = \frac{A_{\text{пол}}}{Q_{\text{затр}}} \quad \text{или} \quad \eta = \frac{|Q_I| - |Q_{II}|}{|Q_I|}; \\ \eta = \frac{1125 \text{ кДж}}{4937 \text{ кДж}} = 0,23 = 23 \%.$$

5. Внутренняя энергия газа к концу цикла приобретает первоначальное значение; следовательно, изменение внутренней энергии за цикл равно нулю:  $\Delta U = 0$ .

Точке 1 соответствует минимальное значение внутренней энергии; точке 3 — максимальное:

$$U_1 = \frac{i}{2} p_1 V_1 = \frac{5}{2} \cdot 10^5 \cdot 0,25 \cdot 10^{-3} \text{ Дж} \approx 63 \text{ Дж},$$

$$U_2 = \frac{i}{2} p_2 V_2 = \frac{5}{2} \cdot 10^6 \cdot 1,5 \cdot 10^{-3} \text{ Дж} = 3750 \text{ Дж} \approx 3,8 \text{ кДж}.$$

*Ответ:*  $Q_I \approx 4,9 \text{ кДж}$ ;  $Q_{II} \approx 3,8 \text{ кДж}$ ;  $A \approx 1,12 \text{ кДж}$ ;  $\eta = 23 \%$ ;  $\Delta U = 0$ , в точке 1 энергия минимальная (63 Дж); в точке 3 максимальная (3,8 кДж).

**Пример 18.** В цилиндре двигателя внутреннего сгорания в процессе работы образуются газы с температурой  $800^\circ\text{C}$ , при этом в двигателе расходуется за 1,5 ч 9,6 кг бензина. Какую максимальную полезную

мощность мог развивать двигатель, если бы отработанные газы имели температуру  $120^\circ\text{C}$ ?

*Дано:*  $t_1 = 800^\circ\text{C}$ ;  $T_1 = 1073\text{ K}$  — температура горячих газов;  $t = 1,5\text{ ч} = 5400\text{ с}$  — время работы двигателя;  $m = 9,6\text{ кг}$  — масса израсходованного бензина;  $t_2 = 120^\circ\text{C}$ ;  $T_2 = 393\text{ K}$  — температура отработанных газов. Из таблиц:  $q = 4,6 \cdot 10^7\text{ Дж/кг}$  — удельная теплота сгорания бензина.

*Найти:*  $P_{\text{макс}}$  — максимально полезную мощность, которую мог бы развивать двигатель при температуре  $120^\circ\text{C}$ .

**Решение.** Мощность может быть определена из формулы коэффициента полезного действия  $\eta = Pt/(qm)$ . Если КПД будет максимальным, то

$$P_{\text{макс}} = \frac{\eta_{\text{макс}} qm}{t}.$$

Максимальный КПД определяется по формуле  $\eta_{\text{макс}} = \frac{T_1 - T_2}{T_1}$ . Отсюда

$$P_{\text{макс}} = \frac{qm}{t} \frac{T_1 - T_2}{T_1}.$$

После подстановки числовых значений получим

$$P_{\text{макс}} = \frac{4,6 \cdot 10^7 \cdot 9,6}{5400} \cdot \frac{(1073 - 393)}{1073} \frac{(\text{Дж/кг}) \cdot \text{кг}}{\text{с}} = 51826 \frac{\text{Дж}}{\text{с}} \approx 52\text{ кВт}.$$

*Ответ:*  $P_{\text{макс}} \approx 52\text{ кВт}$ .

### Изменение внутренней энергии тела при теплообмене.

#### Теплота сгорания топлива

**3.1.** Имеется 45 л воды при температуре  $100^\circ\text{C}$ . Сколько литров холодной воды с температурой  $18^\circ\text{C}$  потребуется влить в нее, чтобы получить воду с температурой  $36^\circ\text{C}$ ?

**3.2.** Паровой котел содержит  $40\text{ м}^3$  воды при температуре  $225^\circ\text{C}$ . При добавлении  $5,2\text{ м}^3$  холодной воды установилась температура  $200^\circ\text{C}$ . Определить температуру холодной воды. Зависимость плотности и удельной теплоемкости воды от температуры не учитывать.

**3.3.** Сколько литров воды с температурой  $20$  и  $100^\circ\text{C}$  необходимо смешать, чтобы получить  $300\text{ л}$  воды при температуре  $40^\circ\text{C}$ ?

**3.4.** Какая установится температура воды после смешивания  $39\text{ л}$  воды при  $20^\circ\text{C}$  и  $21\text{ л}$  при  $60^\circ\text{C}$ ?

**3.5.** Определить температуру воды, установившуюся после смешивания  $6\text{ кг}$  воды при  $42^\circ\text{C}$ ,  $4\text{ кг}$  воды при  $72^\circ\text{C}$  и  $20\text{ кг}$  воды при  $18^\circ\text{C}$ .

**3.6.** Смешали  $60\text{ кг}$  воды при температуре  $90^\circ\text{C}$  и  $150\text{ кг}$  воды при  $23^\circ\text{C}$ ; 15 % тепла, отданного горячей водой, пошло на нагревание окружающей среды. Определить конечную температуру воды.

**3.7.** В сосуд, содержащий  $2,4\text{ кг}$  воды при температуре  $20^\circ\text{C}$ , поместили кусок олова, нагретый до  $500\text{ K}$ , после чего температура воды повысилась на  $15\text{ K}$ . Вычислить массу олова. Нагревание сосуда и испарение воды не учитывать.

**3.8.** Стальное сверло массой 0,09 кг, нагретое при закалке до 840 °С, опущено в сосуд, содержащий машинное масло при 20 °С. Сколько масла следует взять, чтобы его конечная температура не превысила 70 °С? Испарением масла пренебречь.

**3.9.** Деталь, предварительно нагретую до 500 °С, опустили в сосуд, содержащий 18,6 л воды с температурой 13 °С. При этом вода нагрелась до 35 °С. Масса детали равна 8,0 кг. Определить удельную теплоемкость материала детали. Испарением воды и нагреванием сосуда пренебречь.

**3.10.** Чугунный, предварительно нагретый брусок массой 0,20 кг опускают в сосуд, содержащий 0,80 кг керосина при 15 °С. Окончательная температура керосина равна 20 °С. Определить первоначальную температуру бруска.

**3.11.** Пластинку массой 0,30 кг, нагретую до 85 °С, опускают в алюминиевый калориметр массой 42 г, содержащий 0,25 кг воды при 22 °С. Температура, установившаяся в калориметре, равна 28 °С. Определить удельную теплоемкость материала пластинки.

**3.12.** В стеклянную колбу массой 50 г, содержащую 185 г воды при 20 °С, вылили ртуть при 100 °С; температура воды в колбе при этом повысилась до 22 °С. Определить массу ртути.

**3.13.** Для определения температуры печи нагретый в ней стальной болт массой 0,30 кг бросили в медный сосуд массой 0,20 кг, содержащий 1,27 кг воды при 15 °С. В результате температура воды повысилась до 32 °С. Вычислить температуру печи.

**3.14.** В алюминиевый калориметр массой 46 г, содержащий 150 г воды при температуре 20 °С, опускают латунный цилиндр массой 160 г, нагретый до 100 °С. Определить установившуюся температуру. Потери теплоты в окружающую среду не учитывать.

**3.15.** Сосуд теплоемкостью 84 Дж/К содержит 200 г воды при температуре 75 °С. На сколько понизится температура воды при погружении в нее стального цилиндра массой 80 г и температурой 22 °С?

**3.16.** В алюминиевый калориметр массой 29,5 г, содержащий керосин при 20 °С, опускают оловянный цилиндр массой 0,60 кг, нагретый до 100 °С. Сколько керосина было в калориметре, если конечная температура стала 29,5 °С, а потери теплоты составили 15 %?

**3.17.** До какой температуры нагрелся при закалке стальной резец массой 0,15 кг, если после опускания его в алюминиевый сосуд массой 0,10 кг, содержащий 0,60 кг машинного масла при 15 °С, масло нагрелось до 48 °С? Потери теплоты в окружающую среду составляют 25 %.

**3.18.** Определить теплоемкость системы, состоящей из железного, медного и алюминиевого тел, массы которых соответственно равны 180, 120 и 60 г.

**3.19.** В батарею водяного отопления вода поступает при температуре 80 °С по трубе с площадью поперечного сечения 500 мм<sup>2</sup> со скоростью 1,2 см/с, а выходит из батареи, имея температуру 25 °С. Определить количество теплоты, полученное помещением за сутки.

**3.20.** Вода поступает в радиаторы водяного отопления при 341 К, а выходит из них при 313 К. До какой температуры нагреется воздух в комнате размером  $6 \times 5 \times 3$  м, если начальная температура воздуха в комнате 279 К, а через радиаторы пройдет 40 л воды? Потери теплоты через стенки, окна и пол составляют 50 %.

**3.21.** Сколько горячей воды должно пройти через радиаторы водяного отопления, чтобы воздух в комнате размером  $10 \times 6 \times 3,5$  м нагрелся от 10 до 22 °С? Температура воды в радиаторах понижается на 25 К. Потери теплоты через стены, окна и пол равны 60 %.

**3.22.** В нагревателе с КПД 36 % необходимо нагреть 12 л воды от 18 до 100 °С. Сколько керосина для этого потребуется сжечь?

**3.23.** КПД плавильной печи 20 %. Сколько угля марки А-II необходимо сжечь, чтобы нагреть 3,0 т серого чугуна от 283 К до температуры плавления?

**3.24.** При нагревании на газовой горелке 4,5 л воды на 85 К израсходовано 110 л природного газа. Определить КПД горелки.

**3.25.** Для нагревания на спиртовке 1,55 л воды на 80 К израсходовано 80 г спирта. Определить КПД спиртовки.

**3.26.** В нагревателе с КПД 62 % при нагревании железного лома от температуры 18 до 1530 °С было израсходовано 62 кг кокса. Определить массу нагретого железа.

**3.27.** Сколько алюминия можно нагреть от 283 К до температуры плавления в плавильной печи с КПД 26 %, если сжечь 25 кг нефти?

**3.28.** Какова потеря теплоты за сутки через стены и окна в комнате с печным отоплением, если для поддержания в ней постоянной температуры воздуха потребовалось сжечь 10 кг угля марки А-I? КПД печи принять равным 35 %.

**3.29.** Стены квартиры, выходящие на улицу, имеют общую площадь  $45 \text{ м}^2$  и толщину 0,60 м. Коэффициент теплопроводности  $0,80 \text{ Вт}/(\text{м} \cdot \text{К})$  (кирпич обыкновенный). Температура внутри квартиры 295 К, снаружи 268 К. Сколько дров необходимо сжечь, чтобы поддерживать указанную разность температур неизменной в течение суток? КПД печи 40 %, потери теплоты через стены составляют  $3/4$  всех тепловых потерь.

### **Изменение внутренней энергии тела при совершении механической работы**

**3.30.** Как может резать металл фрикционная пила, представляющая собой стальной диск без зубьев?

**3.31.** По горизонтальной поверхности равномерно перемещают стальной брусок на расстояние 9,2 м. Считая, что 60 % энергии, затраченной на перемещение, идет на изменение внутренней энергии бруска, определить, на сколько изменится его температура. Коэффициент трения бруска о поверхность 0,3;  $g \approx 10 \text{ м}/\text{с}^2$ .

**3.32.** Трамвайный вагон массой 12,5 т, имеющий скорость 28,8 км/ч, тормозит и останавливается. На сколько нагреваются его восемь тор-

мозных чугунных колодок, если масса каждой колодки 9,0 кг и на их нагревание затрачивается 60 % кинетической энергии вагона?

**3.33.** Вода падает с высоты 1200 м. На сколько повысится температура воды, если на ее нагревание затрачивается 60 % работы силы тяжести?

**3.34.** С какой высоты должен упасть кусок олова, чтобы при ударе о землю он нагрелся до 373 К? до температуры плавления? Считать, что на нагревание олова идет 40 % работы силы тяжести, а его начальная температура равна 273 К.

**3.35.** Два шарика равной массы, медный и алюминиевый, сброшены с высоты 1000 м. Какой из них нагреется больше и на сколько? Потери теплоты не учитывать.

**3.36.** Стальной лом пневматического отбойного молотка обладает энергией удара 37,5 Дж и делает 1000 ударов в минуту. Определить мощность, развиваемую молотком. На сколько повысится температура лома после трех минут работы, если на его нагревание затрачивается 15 % всей энергии? Масса лома 1,8 кг.

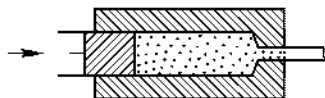
**3.37.** На сколько нагреется при штамповке кусок стали массой 1,5 кг от удара молота массой 400 кг, если скорость молота в момент удара 7,0 м/с, а на нагревание стали затрачивается 60 % энергии молота?

**3.38.** Стальной молот массой 12 кг падает на лежащую на наковальне железную пластинку массой 0,20 кг. Высота падения молота 1,5 м. Считая, что на нагревание пластинки затрачивается 40 % кинетической энергии молота, вычислить, на сколько нагреется пластинка после 50 ударов молота.

**3.39.** С помощью механического молота весом 58,8 кН обрабатывается железная поковка массой 205 кг. За 35 ударов поковка нагрелась от 283 до 291 К. Как велика скорость молота в момент удара? Считать, что на нагревание поковки затрачивается 70 % энергии молота.

**3.40.** При сверлении металла ручной дрелью сверло массой 50 г за 3 мин непрерывной работы нагрелось на 70,5 К. Считая, что на нагревание сверла пошло 15 % всей затраченной энергии, определить мощность, развиваемую при сверлении.

**3.41.** Одним из способов изготовления проволоки является метод выдавливания. Заготовку в нагретом состоянии помещают в цилиндр с отверстием, сечение которого соответствует сечению проволоки. Затем на заготовку производится



К задаче 3.41

давление вдвигающимся в цилиндр поршнем (см. рисунок). На сколько повысится температура медной заготовки массой 1 кг за 5,0 с, если развиваемая при выдавливании мощность равна 4,41 кВт, а на нагревание заготовки идет 60 % энергии?

**3.42.** На сколько нагреется медная пластинка площадью  $2,0 \times 8,0$  см при нарезании в ней резьбы с шагом 0,50 мм, если на вороток действует вращающий момент  $7,6 \text{ Н} \cdot \text{м}$ ? Потери теплоты не учитывать.

**3.43.** Определить вращающий момент, действующий на вороток при нарезании резьбы с шагом 0,75 мм в стальной гайке, если за время нарезания она нагрелась на 50 К. Сечение гайки считать кругом диаметром 20 мм. Потери теплоты не учитывать.

**3.44.** Свинцовый шарик массой  $m_1$ , имеющий скорость  $u_1$ , ударяет неподвижный свинцовый шарик массой  $m_2$ . Считая удар неупругим, определить количество теплоты, выделившейся при ударе. На сколько повысится температура шариков при условии, что выделившаяся при соударении энергия будет израсходована на их нагревание?

**3.45.** Два абсолютно неупругих шара, массы которых  $m_1$  и  $m_2$ , движутся навстречу друг другу со скоростями  $u_1$  и  $u_2$ . После соударения шары движутся как одно целое. Определить количество теплоты, выделившейся при соударении.

**3.46.** Два свинцовых шарика массами по 0,4 кг движутся со скоростями 0,6 и 1,8 м/с навстречу друг другу. Определить, на сколько повысится температура шариков в результате их абсолютно неупругого соударения.

### **Внутренняя энергия идеального газа.**

#### **Работа газа при изменении его объема**

**3.47.** Какой будет средняя кинетическая энергия поступательного движения и полная кинетическая энергия молекул He,  $\text{H}_2$  и  $\text{CO}_2$  при одинаковых температурах?

**3.48.** Средняя кинетическая энергия молекул водорода равна  $1,38 \cdot 10^{-20}$  Дж. Определить среднюю кинетическую энергию молекул углекислого газа при той же температуре. Определить температуру газа.

**3.49.** Определить среднюю кинетическую энергию поступательного движения молекул идеального газа при температурах 273 и 423 К. Найти среднюю квадратичную скорость молекул водорода при этих температурах.

**3.50.** Определить внутреннюю энергию одного моля азота при температуре 127 °С.

**3.51.** Какой внутренней энергией обладают 3,2 кг озона при  $-23$  °С?

**3.52.** На сколько изменится внутренняя энергия 1 г аргона и 1 моль водорода при нагревании на 160 К? На сколько при этом изменится средняя энергия хаотического движения каждой молекулы этих газов?

**3.53.** Какой внутренней энергией обладают  $2,4 \text{ м}^3$  воздуха при нормальном атмосферном давлении? Воздух принять за двухатомный газ.

**3.54.** Найти изменение внутренней энергии  $0,50 \text{ м}^3$  аммиачного газа  $\text{NH}_3$  при увеличении давления на 4,0 кПа.



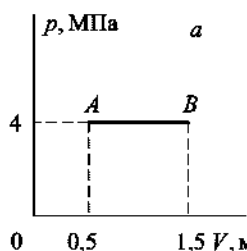
**3.55.** Газ, занимающий объем 6,6 л, расширяется до объема 33 л при постоянном давлении 515 кПа. Какая работа совершается газом?

**3.56.** В вертикально расположенном цилиндре под поршнем находится газ. При изобарном его нагревании поршень переместился на 0,15 м. Масса поршня 0,30 кг, площадь его поперечного сечения  $2,2 \cdot 10^{-2} \text{ м}^2$ . Атмосферное давление нормальное. Определить работу, совершенную газом при расширении.

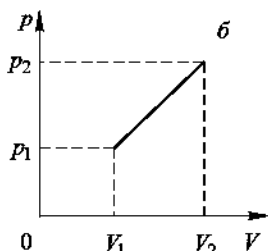
**3.57.** Газ, занимающий объем 460 л при температуре 280 К, нагрели до 295 К. Найти работу, совершенную газом, если давление не изменялось и было равно 999 кПа.

**3.58.** В вертикально расположенном цилиндре с площадью основания  $1,2 \text{ дм}^2$  находится воздух, закрытый подвижным поршнем массой 2,5 кг. Первоначальный объем воздуха 5 л. При изобарном нагревании на 850 К была совершена работа 1,5 кДж. Определить первоначальную температуру воздуха. Наружное давление равно 100 кПа.

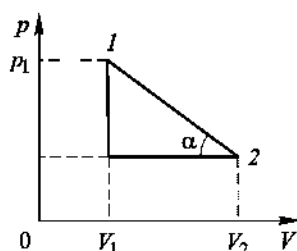
**3.59.** По графикам (см. рисунок) определить работу, совершенную газом.



К задаче 3.59



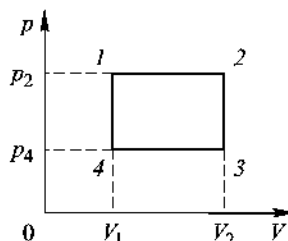
К задаче 3.60



**3.60.** По графику (см. рисунок) определить работу, совершенную газом.

**3.61.** В процессе изменения состояния газа давление изменяется по закону  $p = \alpha V$ . Определить работу, совершенную газом при расширении от  $V_1$  до  $V_2$ . Поглощается или выделяется при этом теплота?

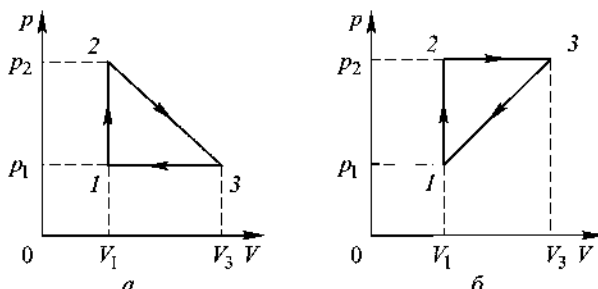
**3.62.** Воздух, находящийся в цилиндре под поршнем, занимает объем 1,5 л при давлении 152 кПа и подвергается сильному нагреванию так, что температура возрастает прямо пропорционально квадрату объема:  $T = \alpha V^2$ . Построить график процесса в координатах  $p, V$  и по нему найти работу, совершенную воздухом при возрастании объема до 9 л. Найти значение коэффициента  $\alpha$ , если масса воздуха 58 г.



К задаче 3.63

**3.63.** Какую работу совершает газ за полный цикл 1-2-3-4-1, показанный на рисунке?

**3.64.** Какая работа совершается газом за один цикл, если состояние газа меняется, как показано на рисунке?



К задаче 3.64

**3.65.** Определить массу азота, содержащегося в цилиндре под поршнем, если в процессе нагревания от температуры 340 до 700 К азотом была совершена работа 460 Дж. На сколько изменилась при этом внутренняя энергия азота? Атмосферное давление нормальное.

**3.66.** Воздух массой 290 г, находящийся в цилиндре под поршнем, при изобарном нагревании совершил работу 5,9 кДж. На сколько при этом изменилась температура воздуха?

**3.67.** Какая работа совершается газом при изобарном нагревании 12 моль газа на 250 К? Зависит ли работа от давления газа?

**3.68.** Углекислый газ массой 220 г имеет температуру 290 К. Определить работу газа при изотермическом расширении от объема 2,4 до 7,2 дм<sup>3</sup>.

**3.69.** Газ под давлением 120 кПа изотермически расширяется от объема 3 до 15 дм<sup>3</sup>. Какая работа при этом совершается газом? Показать на графике зависимость  $p = f(V)$  и работу газа.

### Первый закон термодинамики.

#### Применение первого закона термодинамики к изопроцессам.

#### Адиабатный процесс

**3.70.** На что расходуется энергия, переданная газу при теплообмене в изотермическом процессе?

**3.71.** При изотермическом сжатии газа совершена работа 250 Дж. Определить изменение внутренней энергии газа и количество теплоты, отданной окружающей среде.

**3.72.** При изотермическом расширении гелий получил энергию  $Q$  при температурах  $T_1$  и  $T_2 > T_1$ . Какая работа совершена в обоих случаях?

**3.73.** Сколько теплоты получил газ при изотермическом расширении от объема  $V_1$  до  $V_2$ , если при этом установилось давление  $p_2$ .

**3.74.** На что расходуется энергия  $Q$ , переданная газу при изохорном процессе?

**3.75.** Сколько теплоты потребуется для нагревания на 1 К при постоянном объеме одного моля одно-, двух- и многоатомного газа?

**3.76.** Кислород, масса которого 320 г нагревается при постоянном давлении от 100 до 200 °С. Определить работу расширения и изменения внутренней энергии газа.

**3.77.** При изохорном нагревании 1,45 г двухатомного газа на 250 К израсходовано 260 Дж теплоты. Определить вид газа.

**3.78.** Двухатомный газ находится в баллоне вместимостью 20 л при температуре 300 К и давлении 0,6 МПа. Какими будут температура и давление, если газ получит 6,3 кДж теплоты?

**3.79.** Одноатомный газ заключен в баллон вместимостью 50 л. При изохорном нагревании его давление возросло на 0,6 МПа. Определить количество теплоты, сообщенное газу, и изменение его внутренней энергии.

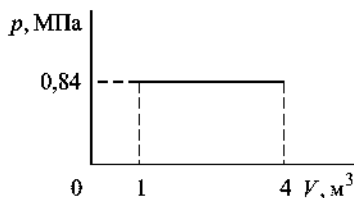
**3.80.** Почему для изобарного нагревания газа требуется большее количество теплоты, чем для изохорного на столько же кельвин?

**3.81.** На сколько молярная теплоемкость газа при постоянном давлении больше молярной теплоемкости при постоянном объеме?

**3.82.** Для нагревания 1 кг газа на 1 К при постоянном давлении потрачено 1043 Дж, а при постоянном объеме — 746 Дж. Какой это газ?

**3.83.** Газ, находящийся при давлении 140 кПа, изобарно нагрели так, что его объем увеличился в четыре раза. При этом была совершена работа 8,4 кДж. Определить первоначальный объем газа.

**3.84.** Состояние двухатомного газа определяется графиком на рисунке. Определить работу, совершенную газом, изменение внутренней энергии газа и теплоту, полученную им в этом процессе.



К задаче 3.84

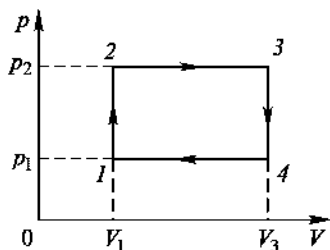
**3.85.** Водород занимает объем 0,5 м³ при давлении 200 кПа. Вначале газ нагрели изохорно до давления 300 кПа, а затем изобарно до объема 0,9 м³. Найти изменение внутренней энергии газа, совершенную им работу и переданное количество теплоты.

**3.86.** Трехатомному газу, занимающему объем 50 л при давлении 1,2 МПа и температуре 300 К, сообщили 60 кДж теплоты. Определить работу газа при изобарном расширении, изменение внутренней энергии и температуру газа в конце процесса.

**3.87.** По условию задачи 3.63 найти, сколько теплоты получит двухатомный газ, сколько ее будет отдано холодильнику и КПД цикла.

**3.88.** Состояние одного моля одноатомного газа меняется, как показано на рисунке. Температура газа в точках 1 и 3 соответственно  $T_1$  и  $T_2$ . Точки 2 и 4 соответствуют одинаковой температуре газа. Определить работу газа за один цикл и количество теплоты, полученной

газом. На каких участках графика газ получает теплоту и на каких отдает? Найти КПД цикла.



К задаче 3.88

**3.89.** В каком из перечисленных ниже примеров процесс можно считать адиабатным? 1. В цилиндре двигателя, работающего по циклу Дизеля, в первом такте происходит всасывание воздуха. 2. При быстром выходе углекислого газа из баллончика на его поверхности у вентиля образуется иней. 3. Ватка, смоченная эфиром и помещенная внутрь прозрачного цилиндра с поршнем, вспыхивает при быстром вдвигании поршня.

**3.90.** Газ с параметрами  $V_1, p_1, T_1$  переходит в другое состояние, расширяясь до объема  $V_2$ : а) изотермически, б) адиабатно. В каком из этих процессов давление будет меньше? Почему? Как меняется внутренняя энергия газа в этих процессах?

**3.91.** При адиабатном расширении внутренняя энергия газа уменьшилась на 120 Дж. Какую работу совершил газ?

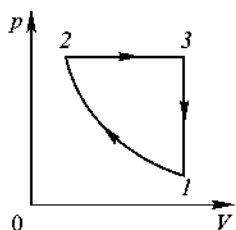
**3.92.** При адиабатном сжатии 1 моль двухатомного газа была совершена работа 8,31 кДж. Определить изменение внутренней энергии и температуры газа.

**3.93.** Трехатомный газ с параметрами  $V_1, p_1$  адиабатно расширяясь, переходит в состояние с параметрами  $V_2, p_2$ . Как и на сколько при этом изменяется внутренняя энергия газа?

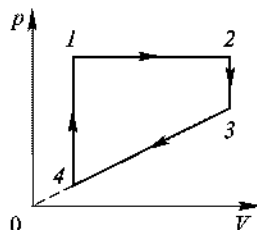
**3.94.** Воздух, находившийся при температуре 260 К под давлением 152 кПа, был подвергнут адиабатному сжатию, причем его объем уменьшился в 12 раз. Найти давление, температуру в конце сжатия газа и совершенную работу. Масса воздуха 1 кг.

**3.95.** На рисунке к задаче 3.88 представлен замкнутый цикл 1–2–3–4. Точки 2 и 4 лежат на одной изотерме. Построить график цикла в координатах  $p, T$  и  $V, T$ . Назвать те участки графика, которые соответствуют процессам, протекающим с поглощением теплоты. Какая точка на графике соответствует максимальной температуре газа?

**3.96.** На рисунке показан график замкнутого цикла, состоящий из изотермы, изобары и изохоры. Представить его в координатах  $p, T$



К задаче 3.96

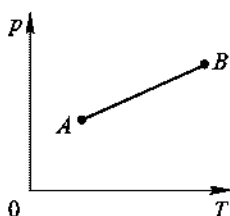


К задаче 3.97

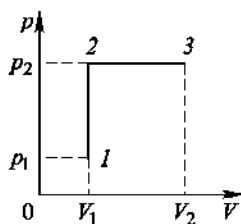
и  $V$ ,  $T$ . Каким точкам на графике соответствует меньшая температура?

**3.97.** На рисунке представлен замкнутый цикл  $1-2-3-4$ . Изобразить его в координатах  $p$ ,  $T$ . На каких участках процесс идет с поглощением теплоты?

**3.98.** Газ заключен в баллон с вентилем. В каком случае изменение состояния газа соответствует графику, изображенному на рисунке?



К задаче 3.98



К задаче 3.99

**3.99.** Процесс изменения состояния двухатомного газа показан на рисунке. На сколько изменилась внутренняя энергия газа? Найти работу совершенную газом, и КПД этого процесса.

**3.100.** На рисунке к задаче 3.95 показан замкнутый цикл изменения состояния одноатомного газа. Определить КПД этого цикла.

**3.101.** Определить КПД двигателя автомобиля, расходующего 0,2 кг бензина на 1 кВт·ч энергии.

**3.102.** Какую среднюю мощность развивает трактор, потребляющий 30 кг дизельного топлива за 1 ч? КПД дизеля 30%.

**3.103.** Тепловоз массой 220 т, движущийся со скоростью 36 км/ч, останавливается. Сколько теплоты выделится в процессе торможения, если предположить, что 80% энергии движения переходит во внутреннюю энергию?

**3.104.** Сколько бензина расходует легковой автомобиль на 100 км пути при скорости движения 90 км/ч? КПД двигателя автомобиля 28%, а развиваемая им мощность равна в среднем 0,40 максимальной мощности 90 кВт.

**3.105.** Подвесной лодочный мотор имеет мощность 13,2 кВт и КПД, равный 15%. На сколько километров пути хватит ему 20 л бензина при скорости лодки 30 км/ч?

**3.106.** Главная силовая установка морского теплохода состоит из двух дизелей мощностью 800 кВт каждый. Зная, что расход дизельного топлива составляет 245 г/(кВт·ч), определить КПД двигателей и расход топлива за плавание в течение недели.

**3.107.** Какой вид топлива используется в теплосиловой установке с КПД 20%, в которой за 1,5 ч работы при развиваемой мощности 25,2 кВт израсходовано 33,0 кг топлива? Какова его удельная теплота сгорания?

**3.108.** Двигатель реактивного самолета с КПД 20 % при полете со скоростью 1800 км/ч развивает силу тяги 88,2 кН. Определить расход керосина за 1 ч полета и развиваемую мощность.

## § 4. Свойства паров. Кипение.

### Водяной пар в атмосфере

**Пример 19.** На электрической плитке с КПД 90 % нагревается вода на 46,9 °C за 10,0 мин. Сколько воды обратится в пар при 100 °C, если ее нагревать еще 40,0 мин? Какова мощность плитки? Первоначальная температура воды 20 °C; масса воды 2,2 кг.

*Дано:*  $\eta = 90\% = 0,90$  — КПД плитки;  $\Delta T = 46,9$  К — изменение температуры воды за первые 10 мин;  $\tau_1 = 10$  мин = 600 с — время нагревания воды;  $\Delta \tau = 40,0$  мин = 2400 с — время дополнительного нагревания воды;  $T_1 = 293$  К — первоначальная температура воды;  $T_2 = 373$  К — температура кипения воды;  $m_{\text{в}} = 2,2$  кг — масса воды. Из таблиц:  $c = 4187$  Дж/(кг · К) — удельная теплоемкость воды,  $r = 2,26 \times 10^6$  Дж/кг — удельная теплота парообразования воды.

*Найти:*  $m_{\text{п}}$  — массу испарившейся воды (пара);  $P$  — мощность электрической плитки.

**Решение.** Количество теплоты, отдаваемое плиткой при постоянной мощности, прямо пропорционально времени ее работы:

$$\frac{Q_1}{Q_2} = \frac{\tau_1}{\tau_2}, \quad Q_2 = \frac{Q_1 \tau_2}{\tau_1},$$

где  $Q_1 = cm_{\text{в}} \Delta T$ ,  $Q_2 = cm_{\text{в}}(T_2 - T_1) + rm_{\text{п}}$ ,  $\tau_2 = \tau_1 + \Delta \tau$ . Отсюда

$$cm_{\text{в}}(T_2 - T_1) + rm_{\text{п}} = \frac{cm_{\text{в}} \Delta T \tau_2}{\tau_1}.$$

Искомая масса испарившейся воды (пара)

$$m_{\text{п}} = \frac{cm_{\text{в}}[\Delta T \tau_2 - (T_2 - T_1)\tau_1]}{r\tau_1}.$$

Подставляя числовые значения, находим

$$m_{\text{п}} = \frac{4187 \cdot 2,2 \cdot [46,9 \cdot 3000 - (373 - 293) \cdot 600]}{2,26 \cdot 10^6 \cdot 600} \frac{\text{Дж}/(\text{кг} \cdot \text{К}) \cdot \text{кг} \cdot \text{К} \cdot \text{с}}{\text{Дж}/\text{кг} \cdot \text{с}} = 0,629 \text{ кг}.$$

Найдем мощность электрической плитки  $P$ :

$$P = \frac{P_{\text{полезн}}}{\eta},$$

здесь  $P_{\text{полезн}} = Q_1/\tau_1$ ,  $Q_1 = cm_{\text{в}} \Delta T$ .

В окончательном виде получим

$$P = \frac{Q_1}{\eta \tau_1} = \frac{cm_{\text{в}} \Delta T}{\eta \tau_1}.$$

Подставляя числовые значения, находим

$$P = \frac{4187 \cdot 2,2 \cdot 46,9}{0,90 \cdot 600} \frac{\text{Дж}/(\text{кг} \cdot \text{К}) \cdot \text{кг} \cdot \text{К}}{\text{с}} = 800 \text{ Вт.}$$

Ответ:  $m_{\text{п}} = 0,629 \text{ кг}$ ;  $P = 800 \text{ Вт}$ .

**Пример 20.** На испарение воды при температуре 373 К затрачено 4,54 МДж теплоты. Определить, какая часть затраченной энергии пошла на совершение работы против внешних сил и какое количество теплоты — на увеличение внутренней энергии системы вода — пар.

Дано:  $T = 373 \text{ К}$  — температура испарения воды;  $Q = 4,54 \text{ МДж} = 4,54 \cdot 10^6 \text{ Дж}$  — количество теплоты, затраченной на испарение;  $v_{\text{п}} = 1,67 \text{ м}^3/\text{кг}$  — удельный объем пара при 373 К;  $v_{\text{в}} = 1,04 \cdot 10^{-3} \text{ м}^3/\text{кг}$  — удельный объем воды при 373 К<sup>\*)</sup>. Из таблиц:  $r = 2,26 \cdot 10^6 \text{ Дж}/\text{кг}$  — удельная теплота парообразования при 373 К,  $p_{\text{н.п}} = 1,013 \cdot 10^5 \text{ Па}$  — давление насыщающего пара при 373 К,  $M = 18 \cdot 10^{-3} \text{ кг}/\text{моль}$  — молярная масса воды,  $R = 8,314 \text{ Дж}/(\text{моль} \cdot \text{К})$  — универсальная газовая постоянная.

Найти:  $\beta = A/Q$  — часть энергии, затраченной на совершение работы;  $\Delta U$  — изменение внутренней энергии системы.

Решение. Согласно первому началу термодинамики

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

здесь  $\Delta U$  — изменение внутренней энергии системы вода-пар,  $A$  — работа расширения пара.

Количество теплоты, затраченной на испарение:

$$Q = rm,$$

где  $m$  — масса испарившейся воды. При изобарном процессе

$$A = p\Delta V = p(V_{\text{п}} - V_{\text{в}});$$

объем пара  $V_{\text{п}}$  и воды  $V_{\text{в}}$  можно выразить через их удельные объемы:

$$V_{\text{п}} = mv_{\text{п}}, \quad V_{\text{в}} = mv_{\text{в}}.$$

Следовательно,  $A = pm(v_{\text{п}} - v_{\text{в}})$ ;

$$\beta = \frac{A}{Q} = \frac{pm(v_{\text{п}} - v_{\text{в}})}{rm} = \frac{p(v_{\text{п}} - v_{\text{в}})}{r}.$$

Подставляя числовые значения, получаем

$$\beta = \frac{1,013 \cdot 10^5 (1,67 - 1,04 \cdot 10^{-3})}{2,26 \cdot 10^6} \frac{\text{Па} \cdot \text{м}^3/\text{кг}}{\text{Дж}/\text{кг}} = 0,075, \text{ или } 7,5 \%.$$

<sup>\*)</sup> Удельный объем воды и насыщающего пара можно найти по формуле  $v = 1/\rho$ , где плотность воды при 373 К дана в табл. III, а плотность насыщающего водяного пара при той же температуре — в табл. VII.

Найдем изменение внутренней энергии:

$$\Delta U = Q - A = Q - \beta Q = (1 - \beta)Q.$$

Подставляя числовые значения, получаем

$$\Delta U = (1 - 0,075) \cdot 4,54 \cdot 10^6 \text{ Дж} = 4,2 \cdot 10^6 \text{ Дж} = 4,2 \text{ МДж}.$$

*Примечание.* Задачу можно решить иначе. Так как давление насыщающего пара значительно меньше, чем давление пара при критической температуре (критическое давление равно  $218,3 \cdot 10^5 \text{ Па}$ ), то к насыщающему пару можно применить уравнение Клапейрона–Менделеева.

При изобарном процессе

$$A = p\Delta V = p(V_{\text{п}} - V_{\text{в}}).$$

Поскольку объем воды  $V_{\text{в}} \ll V_{\text{п}}$ , им можно пренебречь; тогда  $A = pV_{\text{п}}$ . Но, так как  $pV_{\text{п}} = \frac{m}{M}RT$ ,  $A = \frac{m}{M}RT$ . Отсюда

$$\beta = \frac{A}{Q} = \frac{mRT}{M\gamma m} = \frac{RT}{M\gamma}.$$

Подставляя числовые значения, находим

$$\beta = \frac{8,314 \cdot 373}{18 \cdot 10^{-3} \cdot 2,26 \cdot 10^6} \frac{\text{Дж}/(\text{моль} \cdot \text{К}) \cdot \text{К}}{\text{кг}/\text{моль} \cdot \text{Дж}/\text{кг}} = 0,076, \text{ или } 7,6 \%.$$

Небольшое расхождение в значениях  $\beta$  можно объяснить тем, что в последнем решении не учитывался объем воды.

*Ответ:*  $\beta = 7,5\%$ ;  $\Delta U = 4,2 \text{ МДж}$ .

**Пример 21.** После того как температура в помещении понизилась с  $18$  до  $12^\circ\text{C}$ , из каждого  $1 \text{ м}^3$  влажного воздуха выделилось  $1,5 \text{ г}$  воды. Определить абсолютную и относительную влажность воздуха при  $18^\circ\text{C}$ .

*Дано:*  $t_1 = 18^\circ\text{C}$  — первоначальная температура воздуха;  $t_2 = 12^\circ\text{C}$  — конечная температура воздуха;  $m/V = 1,5 \text{ г}/\text{м}^3 = 1,5 \times 10^{-3} \text{ кг}/\text{м}^3$  — масса воды, выделившейся из  $1 \text{ м}^3$  воздуха. Из таблиц:  $\rho_{\text{н.п}} = 15,4 \cdot 10^{-3} \text{ кг}/\text{м}^3$  — плотность насыщающих водяных паров при температуре  $18^\circ\text{C}$ .

*Найти:*  $\rho_{\text{а}}$  — абсолютную влажность воздуха;  $\varphi$  — относительную влажность воздуха при  $18^\circ\text{C}$ .

**Решение.** По условию задачи при температуре  $12^\circ\text{C}$  происходила частичная конденсация; следовательно, пары, находящиеся в воздухе, были насыщающими; их плотность  $\rho_{\text{н.п}}$  можно взять из табл. VII:  $\rho_{\text{н.п}} = 10,7 \cdot 10^{-3} \text{ кг}/\text{м}^3$ .

Абсолютная влажность  $\rho_{\text{а}}$  — плотность водяного пара при данной температуре (в нашем примере при  $18^\circ\text{C}$ ) — определится как

$$\rho_{\text{а}} = \rho_{\text{н.п}} + \frac{m}{V} = (10,7 \cdot 10^{-3} + 1,5 \cdot 10^{-3}) \text{ кг}/\text{м}^3 = 12,2 \cdot 10^{-3} \text{ кг}/\text{м}^3.$$



Находим относительную влажность воздуха  $\varphi$ :

$$\varphi = \frac{\rho_a}{\rho_{н.п}} \cdot 100\% = \frac{12,2 \cdot 10^{-3} \text{ кг/м}^3}{15,4 \cdot 10^{-3} \text{ кг/м}^3} \cdot 100\% = 79\%.$$

Ответ:  $\rho_a = 12,2 \text{ г/м}^3$ ;  $\varphi = 79\%$ .

**Пример 22.** Плотность влажного воздуха при температуре 300 К и давлении 103 кПа равна  $1,19 \text{ кг/м}^3$ . Найти абсолютную и относительную влажность воздуха.

Дано:  $\rho = 1,19 \text{ кг/м}^3$  — плотность влажного воздуха;  $p = 103 \text{ кПа} = 1,03 \cdot 10^5 \text{ Па}$  — давление влажного воздуха;  $T = 300 \text{ К}$  — его температура. Из таблиц:  $\rho_{н.п} = 25,8 \cdot 10^{-3} \text{ кг/м}^3$  — плотность насыщающих водяных паров при температуре 300 К;  $M_n = 18 \cdot 10^{-3} \text{ кг/моль}$  и  $M_b = 29 \cdot 10^{-3} \text{ кг/моль}$  — молярные массы водяных паров и сухого воздуха;  $R = 8,31 \text{ Дж/(моль} \cdot \text{К)}$  — универсальная газовая постоянная.

Найти:  $\rho_a$  и  $\varphi$  — абсолютную и относительную влажности воздуха.

Решение. Давление влажного воздуха  $p$  равно сумме парциальных давлений водяного пара  $p_n$  и сухого воздуха  $p_b$ :

$$p = p_n + p_b. \quad (1)$$

Плотность влажного воздуха  $\rho$  равна сумме плотностей водяного пара  $\rho_n$  и сухого воздуха  $\rho_b$ :

$$\rho = \rho_n + \rho_b. \quad (2)$$

Для определения абсолютной влажности  $\rho_a$  воспользуемся уравнением Клапейрона–Менделеева, в котором положим  $m/V = \rho$ ; тогда

$$p_n = \frac{\rho_n RT}{M_n}, \quad (3)$$

$$p_b = \frac{\rho_b RT}{M_b}. \quad (4)$$

Решим совместно уравнения (1), (3) и (4):

$$p = \frac{\rho_n RT}{M_n} + \frac{(\rho - \rho_n) RT}{M_b};$$

здесь  $\rho - \rho_n = \rho_b$ .

Абсолютная влажность  $\rho_a$  есть плотность водяного пара  $\rho_n$  при заданной температуре. Поэтому

$$\rho_a = \rho_n = \frac{M_n}{M_b - M_n} \frac{pM_b - \rho RT}{RT}.$$

Ограничимся действиями над числовыми значениями величин:

$$\begin{aligned} \rho_a &= \frac{18 \cdot 10^{-3}}{(29 - 18) \cdot 10^{-3}} \frac{1,03 \cdot 10^5 \cdot 29 \cdot 10^{-3} - 1,19 \cdot 8,31 \cdot 300}{8,31 \cdot 300} \frac{\text{кг}}{\text{м}^3} = \\ &= 13 \cdot 10^{-3} \text{ кг/м}^3. \end{aligned}$$

Определим относительную влажность воздуха:

$$\varphi = \frac{\rho_a}{\rho_{н.п}} \cdot 100\% = \frac{13 \cdot 10^{-3}}{25,8 \cdot 10^{-3}} \frac{\text{кг/м}^3}{\text{кг/м}^3} \approx 50\%.$$

Ответ:  $\rho_a = 13 \text{ г/м}^3$ ;  $\varphi \approx 50\%$ .

**Пример 23.** В помещении размером  $5 \times 4 \times 3 \text{ м}$  имеется психрометр. Какова относительная влажность воздуха, если термометры показывают  $25$  и  $18^\circ \text{С}$ ? Определить массу воды, которую потребуется испарить в помещении, чтобы при той же температуре повысить относительную влажность воздуха до  $70\%$ .

Дано:  $V = 60 \text{ м}^3$  — объем воздуха в помещении;  $t_1 = 25^\circ \text{С}$  — показание сухого термометра (температура воздуха в помещении);  $t_2 = 18^\circ \text{С}$  — показание влажного термометра;  $\varphi_2 = 70\%$  — относительная влажность воздуха после испарения воды. Из таблиц:  $\rho_{н.п} = 23 \times 10^{-3} \text{ кг/м}^3$  — плотность насыщенных водяных паров при  $25^\circ \text{С}$ .

Найти:  $\varphi_1$  — первоначальную относительную влажность;  $m$  — массу воды, необходимую для повышения влажности воздуха до  $70\%$ .

Решение. Для ответа на первый вопрос задачи воспользуемся психрометрической таблицей (табл. IX). Относительную влажность по ней найдем на пересечении столбика, соответствующего разности температур (в нашем примере  $7$ ), с горизонтальной строкой, идущей от температуры  $25^\circ \text{С}$ ; она будет равна  $50\%$ .

Для ответа на второй вопрос задачи запишем абсолютные влажности воздуха до и после испарения воды:

$$\rho_{a1} = \rho_n \varphi_1, \quad \rho_{a2} = \rho_n \varphi_2.$$

Тогда массу воды  $m$  найдем следующим образом:

$$m = (\rho_{a2} - \rho_{a1})V = (\varphi_2 - \varphi_1)\rho_n V;$$

$$m = (0,7 - 0,5) \cdot 23 \cdot 10^{-3} \cdot 60 \text{ м}^3 \cdot \text{кг/м}^3 = 0,276 \text{ кг} \approx 0,28 \text{ кг}.$$

Ответ:  $\varphi_1 = 50\%$ ;  $m \approx 0,28 \text{ кг}$ .

## Парообразование и конденсация. Свойства паров

**4.1.** Почему мокрое развешенное белье, скошенная трава и т. п. высыхают быстрее в ветреную погоду?

**4.2.** В открытом сосуде уровень жидкости понижается. Можно ли утверждать, что происходит только испарение?

**4.3.** Вакуумные электрические лампы накаливания перегорают чаще, чем газонаполненные. Почему?

**4.4.** Почему температура воды в пористом сосуде ниже, чем у окружающей среды?

**4.5.** Почему при дожде становится холоднее?

**4.6.** Почему температура воды в открытых водоемах летом всегда ниже температуры окружающего воздуха?

**4.7.** Как изменяется температура испаряющейся жидкости в процессе испарения, если подвода энергии извне нет?

**4.8.** Может ли испаряться жидкость, в которой средняя кинетическая энергия молекул значительно меньше работы выхода молекул при данной температуре?

**4.9.** Как зависит удельная теплота парообразования (конденсации) от температуры?

**4.10.** Можно ли при конденсации получить больше энергии, чем затрачено на испарение той же массы жидкости?

**4.11.** С повышением термодинамической температуры средняя кинетическая энергия молекул возрастает во столько же раз. Справедливо ли утверждать, что скорость испарения при этом увеличивается во столько же раз?

**4.12.** Колбу наполовину заполнили эфиром и герметически закрыли. До каких пор будут возрастать давление и плотность паров, заполняющих пространство над жидким эфиром? Что можно сказать о плотности и давлении насыщенного пара?

**4.13.** Может ли плотность пара быть большей, чем у насыщенного пара при данной температуре?

**4.14.** Давление насыщенного пара при нагревании возрастает гораздо быстрее, чем у идеального газа. Почему?

**4.15.** Жидкость налита в U-образную трубку, и ее концы запаяны. Как узнать, содержится ли в пространстве над жидкостью только ее насыщенный пар, или там находится смесь этого пара с воздухом?

**4.16.** Давление водяного пара при  $22\text{ }^{\circ}\text{C}$  равно  $2,319\text{ кПа}$ . Каким будет давление пара, если его объем уменьшится от  $100$  до  $20\text{ л}$ , а температура повысится до  $40\text{ }^{\circ}\text{C}$ ? Как изменится масса пара?

**4.17.** Насыщенный водяной пар с начальной температурой  $293\text{ К}$  отделили от жидкости и нагрели на  $107\text{ К}$ ; при этом объем, занимаемый паром, увеличили в два раза. Определить давление пара. Как называется такой пар?

**4.18.** Водяной пар с начальной температурой  $313\text{ К}$  и при давлении  $1,117\text{ кПа}$  охладили при постоянном объеме до  $280\text{ К}$ . Определить давление пара. Как называется такой пар? Что произойдет при дальнейшем понижении температуры до  $275\text{ К}$  без изменения объема?

**4.19.** Почему овощи и фрукты быстрее высыхают в разреженном воздухе (в вакуум-аппаратах)? Определить массу воды, выделившейся в результате высушивания в камере вакуум-аппарата партии фруктов. Откачка (воздуха и водяного пара) производилась в течение  $1\text{ ч}$  со скоростью  $70\text{ л/мин}$ , давление в камере сохранялось в течение этого времени равным  $986,4\text{ Па}$ ; после откачки оно упало почти до нуля. Температуру в камере считать постоянной и равной  $280\text{ К}$ .

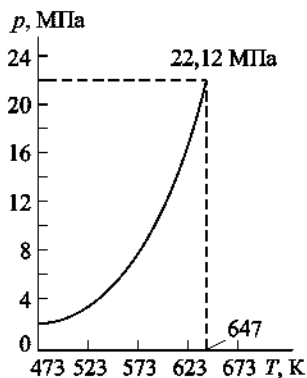
**4.20.** Определить плотность водяного пара при температурах  $0$ ,  $20$  и  $100\text{ }^{\circ}\text{C}$ , если давление пара при этих температурах соответственно равно  $613\text{ Па}$ ,  $2,333\text{ кПа}$  и  $101,325\text{ кПа}$ .

**4.21.** Определить давление водяного пара при температурах 18, 29 и 50 °С, если плотность пара равна соответственно 15,4, 25,8 и 83,2 г/м<sup>3</sup>.

**4.22.** В цилиндре под поршнем находится 58,6 г водяного пара при давлении 24,33 кПа и температуре 80 °С. На сколько изменится объем пара при изотермическом сжатии до момента начала конденсации?

**4.23.** В цилиндре под поршнем находится слой воды толщиной  $h$  при температуре  $T$ . На какую высоту  $H$  следует поднять поршень, чтобы вся вода испарилась? Плотность воды  $\rho$ . Давление насыщенных водяных паров  $p$ . Процесс изотермический.

**4.24.** 276 мг ненасыщенного водяного пара подвергли изотермическому сжатию. Когда объем, занимаемый паром уменьшился до 12 л, началась конденсация пара. При какой температуре протекал процесс?



К задаче 4.26

**4.25.** В цилиндре под поршнем находится 2,0 г газообразного аммиака при температуре –55 °С. Газ изотермически сжимают, и при давлении 27 кПа наступает насыщение. Какой объем занимает в этот момент газ? Сколько аммиака конденсируется, если объем уменьшить до 6 л?

**4.26.** На рисунке графически изображена зависимость давления насыщенного водяного пара от температуры. Пользуясь графиком, определить, в каком агрегатном состоянии находится вода при температуре 575 К и давлениях 3 и 14 МПа; при давлении 10 МПа и температурах 525 и 625 К, при температуре 655 К и давлениях 22,3 и 25,3 МПа.

**4.27.** Какая часть энергии, затраченной в процессе парообразования воды при температуре 100 °С, идет на совершение работы расширения против внешних сил при нормальном внешнем давлении 101,3 кПа?

**4.28.** В процессе изотермического сжатия насыщающего водяного пара при температуре  $T$  внешними силами совершена работа  $A$ . Какое количество теплоты выделилось в процессе конденсации пара? Удельная теплота парообразования (конденсации)  $r$ .

### Кипение. Критическое состояние вещества

**4.29.** Как зависит температура кипения от внешнего давления? Одинакова ли температура кипения определенной жидкости в глубокой шахте и на высокой горе?

**4.30.** При каком условии закипает жидкость? Достаточно ли нагреть жидкость до температуры кипения, чтобы она кипела?

**4.31.** При каком давлении вода закипит, имея температуру  $20^\circ\text{C}$ ? Чему равно давление над поверхностью воды, кипящей при температуре  $80^\circ\text{C}$ ?

**4.32.** Будет ли кипеть вода в кастрюле, плавающей в другой кастрюле с кипящей водой?

**4.33.** Холодную воду можно поднять на высоту  $10,3\text{ м}$  с помощью всасывающего насоса. Можно ли таким насосом поднять кипящую воду?

**4.34.** Сколько теплоты потребуется, чтобы превратить в пар  $0,2\text{ кг}$  спирта и столько же эфира, если они взяты при температуре  $20^\circ\text{C}$ ?

**4.35.** Из  $450\text{ г}$  водяного пара с температурой  $110^\circ\text{C}$  образовалась вода при  $15^\circ\text{C}$ . Сколько при этом выделилось теплоты? Считать, что процесс протекал без потерь. Атмосферное давление нормальное.

**4.36.** В сосуд, содержащий  $255\text{ г}$  воды при температуре  $22^\circ\text{C}$ , ввели  $14\text{ г}$  водяного пара при  $100^\circ\text{C}$ . Определить конечную температуру воды. Теплоемкость сосуда и теплообмен с окружающей средой не учитывать.

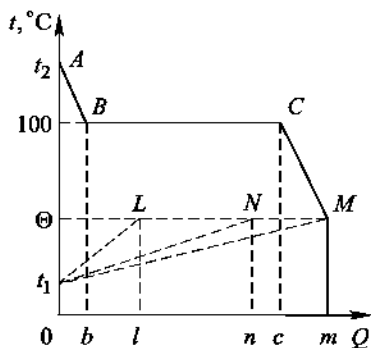
**4.37.** В сосуд, содержащий  $42\text{ л}$  воды, впускают  $2,23\text{ кг}$  водяного пара при температуре  $100^\circ\text{C}$ . После конденсации пара температура воды поднялась до  $40^\circ\text{C}$ . Определить первоначальную температуру воды, если потери энергии составили  $15\%$ .

**4.38.** Для нагревания жидкости от температуры  $t_1$  до  $t_2$  понадобилось время  $\tau_1$ , а для испарения половины ее при температуре кипения — время  $\tau_2$ . Определить удельную теплоту парообразования жидкости, если ее удельная теплоемкость равна  $s$ . Мощность нагревателя считать постоянной.

**4.39.** Для определения удельной теплоты парообразования воды в алюминиевый калориметр массой  $52\text{ г}$ , содержащий  $250\text{ г}$  воды при  $9^\circ\text{C}$ , ввели пар при температуре  $100^\circ\text{C}$ . После его конденсации в калориметре оказалось  $259\text{ г}$  воды с установившейся температурой  $30^\circ\text{C}$ . Вычислить по этим данным удельную теплоту парообразования воды.

**4.40.** Медный калориметр массой  $180\text{ г}$  содержит  $467\text{ г}$  воды при температуре  $18^\circ\text{C}$ . Сколько пара с температурой  $100^\circ\text{C}$  необходимо ввести в калориметр, чтобы в нем установилась температура  $64^\circ\text{C}$ ?

**4.41.** На рисунке изображен графически процесс теплообмена для случая, когда водяной пар с температурой  $t_2 > 100^\circ\text{C}$  вводят в калориметр, содержащий воду при  $t_1$ . Объяснить значение отдельных частей графика.



К задаче 4.41

**4.42.** При какой температуре установится тепловое равновесие в латунном калориметре, содержащем 565 г воды, после введения 47,5 г водяного пара, имеющего температуру 100 °С? Начальная температура воды в калориметре 19 °С, его масса 112 г. Теплообмен с окружающей средой не учитывать.

**4.43.** Бак кипятыльника с КПД 75 % содержит 208 л воды при температуре 15 °С. Сколько пара при температуре 104 °С необходимо пропустить через змеевик кипятыльника, чтобы и вода в баке, и вода, вытекающая из змеевика, имели температуру 92 °С?

**4.44.** Пар поступает в змеевик подогревателя при температуре 100 °С; температура вытекающего из змеевика конденсата 90 °С. После того как через подогреватель прошло 2,0 м<sup>3</sup> воды с начальной температурой 8 °С, из змеевика вытекло 360 л конденсата. До какой температуры нагрелась вода, если КПД подогревателя 80 %?

**4.45.** В сосуд, содержащий 1,75 л воды при температуре 20 °С, погружают кусок железа массой 432 г, нагретый до 532 °С. При этом часть воды испарилась и установилось тепловое равновесие с температурой 28 °С. Определить массу испарившейся воды.

**4.46.** В перегонный куб с КПД 33 % было налито 20 л воды при температуре 283 К. Сколько дистиллированной воды можно получить, если израсходовать в топке куба 2,0 кг нефти?

**4.47.** Для получения 12 л дистиллированной воды из 40 л воды, взятой при температуре 20 °С, израсходовано 2,853 м<sup>3</sup> природного газа. Каков КПД дистиллятора?

**4.48.** На электрической плитке, мощность которой 1,2 кВт и КПД 80 %, в кофейнике кипит вода при нормальном атмосферном давлении. С какой скоростью выходит пар из отверстия площадью 1,5 см<sup>2</sup>?

**4.49.** Вода нагревается от 20 °С до кипения за 15 мин. Сколько времени дополнительно потребуется, чтобы половина этой воды превратилась в пар при постоянной мощности нагревателя?

**4.50.** КПД холодильника, работающего на аммиачном газе, 75 %. Сколько аммиака должно испариться в трубах холодильника для охлаждения 0,86 кг воды от 293 К до точки замерзания?

**4.51.** Каков КПД холодильника, если для охлаждения 2,0 кг воды от 282,5 К до точки замерзания потребовалось испарить 73 г фреона?

**4.52.** Какие параметры характеризуют критическое состояние вещества?

**4.53.** Чему равна удельная теплота парообразования вещества, находящегося в критическом состоянии?

**4.54.** Можно ли обратить газ в жидкость, сжимая его при температуре выше критической?

**4.55.** Имеется смесь кислорода, азота и водорода, не взаимодействующих химически. Какой газ раньше других превратится в жидкость в процессе сжижения?

### Водяной пар в атмосфере

**4.56.** В зимнее время на стеклах в автотранспорте появляется иней. Почему?

**4.57.** Осенью, в прохладное время в неотапливаемом помещении ощущается сырость. Почему?

**4.58.** Чем объяснить образование росы и тумана?

**4.59.** Почему после жаркого дня роса бывает более обильной?

**4.60.** Почему при густой облачности ночью роса не выпадает?

**4.61.**  $5\text{ м}^3$  воздуха при температуре  $25\text{ }^\circ\text{C}$  содержит  $86,5\text{ г}$  водяного пара. Определить абсолютную и относительную влажность воздуха.

**4.62.** Температура воздуха  $21\text{ }^\circ\text{C}$ . Чему равна абсолютная и относительная влажность воздуха, если роса появляется при температуре  $10\text{ }^\circ\text{C}$ ?

**4.63.** Абсолютная влажность уменьшается, а относительная при этом может увеличиться. При каких условиях это возможно?

**4.64.** Температура воздуха в полдень  $298\text{ К}$ , относительная влажность  $46\%$ . Найти абсолютную влажность воздуха. При какой температуре вечером появится роса?

**4.65.** В каком случае будет сильнее ощущаться сырость: в воздухе с содержанием пара  $15\text{ г/м}^3$  при температуре  $30\text{ }^\circ\text{C}$  или в воздухе с содержанием пара  $4\text{ г/м}^3$  при  $2\text{ }^\circ\text{C}$ ?

**4.66.** Температура воздуха  $313\text{ К}$ , а парциальное давление водяного пара в нем  $3,13\text{ кПа}$ . Определить абсолютную влажность воздуха.

**4.67.** Абсолютная влажность воздуха  $15,4\text{ г/м}^3$ , а парциальное давление водяного пара в нем  $2,1\text{ кПа}$ . Определить температуру воздуха и его относительную влажность.

**4.68.** В помещении размером  $5 \times 5 \times 3\text{ м}$  при температуре  $21\text{ }^\circ\text{C}$  содержится  $0,96\text{ кг}$  водяного пара. Определить абсолютную и относительную влажность воздуха в помещении.

**4.69.** В помещении размером  $4 \times 10 \times 3\text{ м}$  при температуре  $16\text{ }^\circ\text{C}$  относительная влажность воздуха составляет  $45\%$ . Сколько дополнительно испарилось воды, если при той же температуре относительная влажность стала  $60\%$ ?

**4.70.** По условию задачи 4.69 определить, на сколько больше потребуется испарить влаги, если с увеличением влажности до  $60\%$  температура воздуха повысится до  $20\text{ }^\circ\text{C}$ .

**4.71.** Найти относительную влажность воздуха по показаниям сухого и влажного термометров психрометра, равным соответственно  $29$  и  $22\text{ }^\circ\text{C}$ ;  $15$  и  $9\text{ }^\circ\text{C}$ ;  $25$  и  $21\text{ }^\circ\text{C}$ ;  $20$  и  $18\text{ }^\circ\text{C}$ . Сравнить найденные значения относительной влажности с результатами отсчетов по гигрометру Ламбрехта, если указываемые им значения температуры точки росы в те же моменты и в том же месте равны соответственно  $18$ ,  $2$ ,  $19$  и  $17\text{ }^\circ\text{C}$ .

**4.72.** Что покажет влажный термометр психрометра при температуре воздуха  $20\text{ }^\circ\text{C}$  и относительной влажности  $51\%$ ?

**4.73.** Относительная влажность воздуха 73 %. Что показывают сухой и влажный термометры психрометра, если разность их показаний равна  $2^{\circ}\text{C}$ ?  $4^{\circ}\text{C}$ ?

**4.74.** Влажный термометр психрометра показывает  $287\text{ K}$ ; разность показаний сухого и влажного равна  $7\text{ K}$ . Какова относительная влажность воздуха и его температура?

**4.75.** Относительная влажность воздуха в помещении 68 % при температуре  $24^{\circ}\text{C}$ . Сколько влаги может сконденсироваться из  $1\text{ м}^3$  воздуха, если его температура понизится до  $14^{\circ}\text{C}$ ?

**4.76.** Вечером на берегу озера при температуре  $18^{\circ}\text{C}$  относительная влажность воздуха была 75 %. При какой температуре воздуха к утру можно ожидать появление тумана?

**4.77.** При температуре  $22^{\circ}\text{C}$  относительная влажность воздуха была 60 %. Появится ли роса при понижении температуры до  $16^{\circ}\text{C}$ ? до  $11^{\circ}\text{C}$ ? Если появится, то сколько влаги выделится из  $1\text{ м}^3$  воздуха?

**4.78.** При температуре  $6^{\circ}\text{C}$  относительная влажность воздуха была 55 %. Появится ли иней при понижении температуры до  $-1^{\circ}\text{C}$ ? до  $-3^{\circ}\text{C}$ ? Если появится, то сколько влаги выделится из  $1\text{ м}^3$  воздуха?

**4.79.** Какой была относительная влажность воздуха при  $25^{\circ}\text{C}$ , если с понижением температуры до  $10^{\circ}\text{C}$  из  $1\text{ м}^3$  воздуха выделилось 6 г воды?

**4.80.** В помещении размером  $8 \times 5 \times 3\text{ м}$  температура воздуха равна  $23^{\circ}\text{C}$ , а относительная влажность — 65 %. Сколько воды может испариться в этом помещении?

**4.81.** В комнате при температуре  $20^{\circ}\text{C}$  относительная влажность воздуха была 70 %. Как должна измениться температура воздуха, чтобы относительная влажность уменьшилась? При какой температуре влажность воздуха будет равна 59 %?

**4.82.** Сухой и влажный термометры психрометра показывают  $23$  и  $16^{\circ}\text{C}$ . Сколько влаги потребуется испарить в  $1\text{ м}^3$ , чтобы относительная влажность воздуха стала 60 % при той же температуре?

**4.83.** Баллон вместимостью 500 л заполнен влажным воздухом при температуре  $300\text{ K}$ . Определить относительную влажность воздуха, если для образования насыщенных паров потребовалось дополнительно испарить в баллоне 3,2 г воды.

**4.84.** В складском помещении вместимостью  $1500\text{ м}^3$  установилась за ночь температура  $12^{\circ}\text{C}$  при относительной влажности 75 %. Необходимо повысить температуру до  $22^{\circ}\text{C}$  и одновременно снизить влажность до 60 %. Как это осуществить?

**4.85.** Температура воздуха  $27^{\circ}\text{C}$ , относительная влажность 54 %. На сколько изменится атмосферное давление, если при неизменной температуре относительная влажность увеличится до 70%? уменьшится до 45%?

**4.86.** Давление насыщенного водяного пара при температуре  $37^{\circ}\text{C}$  равно  $5,95\text{ кПа}$ . Какова масса при этих условиях  $1\text{ м}^3$  воздуха с относительной влажностью 81 %? Атмосферное давление  $101\text{ кПа}$ .



**4.87.** В замкнутом объеме  $2\text{ м}^3$  находится  $97,6\text{ г}$  воды и над нею насыщенный пар с плотностью  $51,2\text{ г/м}^3$  и давлением  $7,36\text{ кПа}$ . При неизменной температуре объем увеличивают до  $10\text{ м}^3$ . Определить конечное давление пара, его температуру и относительную влажность.

**4.88.** Резервуар с переменной емкостью — сильфон, имеющий вид мехов или гармоник, первоначально вмещал  $4\text{ л}$  комнатного воздуха при температуре  $25\text{ }^\circ\text{С}$ , влажности  $62,5\%$  и давлении  $98\text{ кПа}$ . В резервуар наливают немного воды, герметически его закрывают и растягивают, увеличивая его объем до  $20\text{ л}$ , причем температура не изменяется, а влажность возрастает до  $80\%$ . Найти массу воды и конечное давление воздуха.

**4.89.** Воздух, занимающий объем  $1200\text{ л}$ , находится при температуре  $295\text{ К}$  и имеет относительную влажность  $75\%$ . Какой будет относительная влажность, если объем воздуха уменьшить в  $25$  раз, а температуру повысить до  $100\text{ }^\circ\text{С}$ ?

## § 5. Свойства жидкостей

**Пример 24.** Какую энергию необходимо затратить, чтобы сферическую каплю ртути радиусом  $4,0\text{ мм}$  разделить на восемь одинаковых сферических капель при неизменной температуре?

*Дано:*  $R_1 = 4,0\text{ мм} = 4,0 \cdot 10^{-3}\text{ м}$  — радиус капли;  $n = 8$  — число малых капель. Из таблицы:  $\sigma = 0,47\text{ Дж/м}^2$  — поверхностное натяжение ртути.

*Найти:*  $\Delta P$  — энергию, затраченную на разделение капли.

**Решение.** Энергию  $\Delta P$ , затраченную на разделение капли, определим из соотношения

$$\Delta P = 8P_2 - P_1,$$

где  $P_1$  и  $P_2$  — энергии поверхностного слоя большой и малой капель. Эта энергия может быть выражена через поверхностное натяжение  $\sigma$  и площадь поверхности сферических капель  $S$ :

$$P_1 = \sigma S_1, \quad P_2 = \sigma S_2.$$

С учетом того, что  $S = 4\pi R^2$ , можно написать

$$P_1 = \sigma \cdot 4\pi R_1^2, \quad P_2 = \sigma \cdot 4\pi R_2^2.$$

Отсюда  $\Delta P = 8\sigma \cdot 4\pi R_2^2 - \sigma \cdot 4\pi R_1^2 = \sigma \cdot 4\pi(8R_2^2 - R_1^2)$ .

Определим радиус малой капли и используем его для нахождения энергии, затраченной на разделение капли. Будем исходить из того, что объем большой капли равен сумме объемов образованных малых капель:

$$V_1 = 8V_2, \text{ или } \frac{4}{3}\pi R_1^3 = 8 \cdot \frac{4}{3}\pi R_2^3.$$

Отсюда  $R_2 = \sqrt[3]{R_1^3/8} = R_1/2$ ; тогда

$$\Delta P = \sigma \cdot 4\pi \left( 8 \frac{R_1^2}{4} - R_1^2 \right) = \sigma \cdot 4\pi R_1^2.$$

Подставляя числовые значения, получаем

$$\Delta P = 0,47 \cdot 4\pi \cdot (4,0 \cdot 10^{-3})^2 \text{ Дж/м}^2 \cdot \text{м}^2 = 9,45 \cdot 10^{-5} \text{ Дж} \approx 95 \text{ мкДж}.$$

Ответ:  $\Delta P \approx 95 \text{ мкДж}$ .

**Пример 25.** Найти дополнительное (лапласовское) давление: 1) в сферической капле воды диаметром 12 мм; 2) в мыльном пузыре диаметром 16 мм; 3) между двумя параллельными стеклянными пластинами, опущенными в воду, расстояние между которыми 12 мм. Смачивание полное.

Дано:  $d_{в,к} = 12 \text{ мм} = 1,2 \cdot 10^{-2} \text{ м}$  — диаметр водяной капли;  $d_{м,п} = 16 \text{ мм} = 1,6 \cdot 10^{-2} \text{ м}$  — диаметр мыльного пузыря;  $d_{ст} = 12 \text{ мм} = 1,2 \times 10^{-2} \text{ м}$  — расстояние между стеклянными пластинами. Из таблиц:  $\sigma_{в} = 0,072 \text{ Н/м}$  — поверхностное натяжение воды,  $\sigma_{м} = 0,040 \text{ Н/м}$  — поверхностное натяжение мыльного раствора.

Найти:  $p_{л,к}$ ,  $p_{л,п}$ ,  $p_{л,ст}$  — лапласовское давление соответственно в водяной капле, мыльном пузыре, между параллельными стеклянными пластинами.

Решение. Дополнительное (лапласовское) давление вызвано кривизной поверхности жидкости и определяется по формуле

$$p_l = \sigma \left( \frac{1}{R_1} + \frac{1}{R_2} \right),$$

где  $1/R_1$  и  $1/R_2$  — кривизна двух взаимно перпендикулярных сечений поверхностей жидкости.

1. Для сферической капли воды из-за одинаковой кривизны  $R_1 = R_2 = R$ . Лапласовское давление  $p_{л,к}$  определится по формуле

$$p_{л,к} = \frac{2\sigma_{в}}{R}, \quad \text{где } R = \frac{d_{в,к}}{2}.$$

Следовательно,

$$p_{л,к} = \frac{4\sigma}{d_{в,к}} = \frac{4 \cdot 0,072 \text{ Н/м}}{1,2 \cdot 10^{-2} \text{ м}} = 24 \text{ Па}.$$

2. У мыльного пузыря две поверхности, и поэтому

$$p_{л,п} = p_{внут} + p_{внеш}.$$

В нашем примере толщиной мыльной пленки (при сравнении ее с радиусом пузыря) можно пренебречь, поэтому  $R_{внеш} = R_{внут} = R_{м,п}$ ,

$$p_{л,п} = 2 \cdot \frac{2\sigma_{м}}{R_{м,п}}, \quad \text{где } R_{м,п} = \frac{d_{м,п}}{2}.$$

В окончательном виде имеем

$$p_{л,п} = \frac{8\sigma_{м}}{d_{м,п}} = \frac{8 \cdot 0,040 \text{ Н/м}}{1,6 \cdot 10^{-2} \text{ м}} = 20 \text{ Па}.$$

3. Смачивающая стекло вода поднимается между стеклами (см. рисунок), образуя искривленную поверхность, которая и создает лапласовское давление.

Для его определения найдем кривизну двух взаимно перпендикулярных сечений поверхности жидкости. В сечении, параллельном стеклам, кривизна равна нулю. В перпендикулярном сечении образуется дуга окружности радиусом  $R = d_{ст}/2$ , что справедливо при полном смачивании.

Окончательно имеем

$$p_{л.ст} = \frac{2\sigma_{\text{в}}}{d_{ст}} = \frac{2 \cdot 0,072}{1,2 \cdot 10^{-2}} \frac{\text{Н/м}}{\text{м}} = 12 \text{ Па}.$$

Ответ:  $p_{л.к} = 24 \text{ Па}$ ;  $p_{л.п} = 20 \text{ Па}$ ;  
 $p_{л.ст} = 12 \text{ Па}$ .

**Пример 26.** Вычислить высоту подъема воды в стеклянном капилляре диаметром 0,20 мм и работу, совершенную при этом силами поверхностного натяжения. На что затрачивается эта работа? Краевой угол равен  $30^\circ$ , температура воды  $20^\circ\text{C}$ .

Дано:  $d = 0,20 \text{ мм} = 2,0 \cdot 10^{-4} \text{ м}$  — диаметр капилляра;  $\theta = 30^\circ$  — краевой угол сред вода-стекло-воздух. Из таблиц:  $\sigma = 0,072 \text{ Н/м}$  — поверхностное натяжение воды при  $20^\circ\text{C}$ ,  $\rho = 1,0 \cdot 10^3 \text{ кг/м}^3$  — плотность воды,  $g = 9,8 \text{ м/с}^2$  — ускорение свободного падения.

Найти:  $h$  — высоту подъема воды в капилляре;  $A$  — работу сил поверхностного натяжения.

Решение. Высоту подъема воды найдем из формулы

$$h = \frac{4\sigma}{\rho g d} \cos \theta.$$

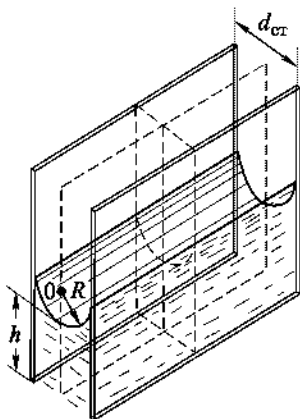
Работу  $A$  определим, умножая значение проекции на вертикаль результирующей сил поверхностного натяжения  $F_n = \pi \sigma d$  на высоту подъема  $h$ :

$$A = F_n h \cos \theta = \frac{\pi \sigma d \cdot 4\sigma}{\rho g d} \cos^2 \theta.$$

Потенциальная энергия  $\Pi = mgh/2$  поднятого столба воды составляет половину работы сил поверхностного натяжения, что не трудно доказать, если в формуле для  $\Pi$  исключить  $m$  и  $h$ :

$$\Pi = \rho S g \frac{h^2}{2} = \frac{2\pi \sigma^2}{\rho g} \cos^2 \theta.$$

Другая половина работы затрачивается на преодоление сил трения и переходит во внутреннюю энергию (теплоту).



К примеру 25

Подставляя числовые значения в выражения для  $h$  и  $A$ , получим

$$h = \frac{4 \cdot 7,2 \cdot 10^{-2} \cdot 0,866}{1,0 \cdot 10^3 \cdot 9,8 \cdot 2,0 \cdot 10^{-4}} \frac{\text{Н/м}}{\text{кг/м}^3 \cdot \text{м/с}^2 \cdot \text{м}} \approx 0,13 \text{ м} = 13 \text{ см},$$

$$A = \frac{4 \cdot 3,14 \cdot 51,84 \cdot 10^{-4} \cdot 0,750}{1,0 \cdot 10^3 \cdot 9,8} \frac{(\text{Н/м})^2}{\text{кг/м}^3 \cdot \text{м/с}^2} = 5,0 \cdot 10^{-6} \text{ Дж} = 5,0 \text{ мкДж}.$$

Ответ:  $h \approx 13 \text{ см}$ ;  $A = 5,0 \text{ мкДж}$ .

### **Поверхностное натяжение. Свободная энергия поверхностного слоя жидкости**

**5.1.** Может ли вещество, находящееся в жидком состоянии, вести себя, как твердое тело?

**5.2.** Всегда ли справедливо утверждение о том, что жидкость не обладает собственной формой?

**5.3.** Свойства поверхностного слоя жидкости толщиной порядка  $10^{-10} \text{ м}$  (радиус сферы молекулярного действия) отличаются от свойств других слоев. Почему?

**5.4.** На какой глубине гидростатическое давление воды будет таким же, как и давление ее поверхностного слоя при комнатной температуре?

**5.5.** Почему тела, находящиеся в жидкости, не испытывают действия молекулярного давления?

**5.6.** Как изменяются поверхностное давление, поверхностное натяжение, свободная энергия поверхностного слоя жидкости при ее нагревании?

**5.7.** Как изменится температура жидкости, если увеличить ее свободную поверхность? Жидкость теплоизолирована, испарения нет.

**5.8.** Определить свободную энергию поверхностного слоя капли воды массой  $42,5 \text{ мг}$  и радиусом  $2,16 \text{ мм}$ .

**5.9.** Определить свободную энергию поверхности мыльного пузыря, радиус которого  $12 \text{ мм}$ .

**5.10.** Прямоугольная рамка полностью затянута мыльной пленкой. Как и на сколько изменится свободная энергия пленки при сокращении ее поверхности в три раза, если размеры рамки  $6,0 \times 3,0 \text{ см}$ ?

**5.11.** Сколько энергии необходимо затратить для разделения сферической капли воды, температура которой  $293 \text{ К}$ , на две одинаковые сферические капли массой по  $18,1 \text{ мг}$ ?

**5.12.** Восемь одинаковых капелек ртути радиусом  $1,25 \text{ мм}$  при слиянии образовали одну сферическую каплю. На сколько при этом повысилась температура ртути? Изменение положения центра тяжести не учитывать.

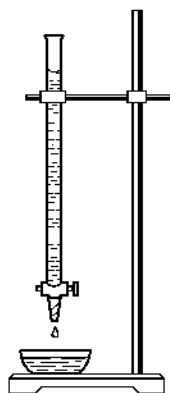
**5.13.** Проволочная рамка с подвижной горизонтальной перекладной, расположенная вертикально, затянута мыльной пленкой. Определить поверхностное натяжение мыльного раствора, если медная перекладка, имеющая диаметр  $1,08 \text{ мм}$ , находится в равновесии.

**5.14 \*).** При определении поверхностного натяжения воды воспользовались бюреткой, закрепленной в штативе (см. рисунок). Было отсчитано 174 капли общей массой 5,00 г. Диаметр отверстия бюретки 1,38 мм. Вычислить поверхностное натяжение воды.

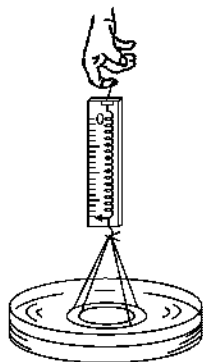
**5.15.** Из бюретки с диаметром отверстия 1,5 мм каждую секунду вытекает по одной капле керосина. За какое время вытечет  $31,4 \text{ см}^3$ ?

**5.16.** Из бюретки (см. рисунок к задаче 5.14) с малым диаметром отверстия вытекает вода, а затем такой же объем спирта. Сколько образовалось капель спирта, если воды вытекло 150 капель?

**5.17.** Какое усилие потребуется для отрыва алюминиевого кольца массой 5,2 г со средним диаметром 85 мм от поверхности глицерина (см. рисунок)?



К задаче 5.14



К задаче 5.17

**5.18.** При определении поверхностного натяжения воды алюминиевое кольцо массой 6,1 г отрывают от поверхности воды (см. рисунок к задаче 5.17). В момент отрыва динамометр показывает усилие 0,15 Н. Учитывая, что средний диаметр кольца 200 мм, вычислить поверхностное натяжение воды.

**5.19.** Медное проволочное кольцо, средний диаметр которого 120 мм, горизонтально касается поверхности воды. Определите усилие, необходимое для отрыва кольца. Площадь поперечного сечения проволоки  $2,2 \text{ мм}^2$ .

**5.20.** Тонкая деревянная палочка длиной 10 см и массой 4,8 г плавает на поверхности воды. С каким ускорением и куда начнет двигаться палочка, если в воду с одного края осторожно налить керосин? Сопротивление среды не учитывать.

### **Смачивание. Давление, обусловленное кривизной поверхности. Капиллярные явления**

**5.21.** Всегда ли вода будет смачивающей жидкостью, а ртуть — несмачивающей?

**5.22.** Какое свойство жидкости используется при крашении, пайке, сварке?

**5.23.** Почему алюминий нельзя паять обычным (оловянным) припоем?

\*) В задачах 5.14–5.16 диаметр шейки капли принимать равным  $9/10$  диаметра канала трубки.

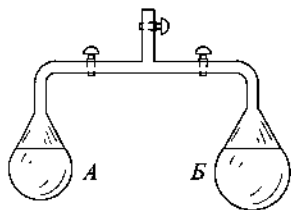
**5.24.** Шарообразный стеклянный сосуд, наполовину заполненный водой, находится в условиях невесомости. Как поведет себя жидкость смачивающая? Несмачивающая? Сосуд закрыт.

**5.25.** Пробковый кубик с ребром, равным 2,0 см, плавает на поверхности воды. Считая смачивание полным, определить глубину погружения кубика в воду.

**5.26.** Найти максимальное значение диаметра тонкого цилиндрического стального стержня, который, будучи слегка смазан жиром, может плавать на поверхности воды. Глубина погружения стержня равна половине его диаметра. Диаметр  $d$  стержня равен 0,05 его длины  $l$ .

**5.27.** Как изменяется краевой угол у смачивающей и несмачивающей жидкости при нагревании?

**5.28.** На противоположных концах трубки-тройника выдули два мыльных пузыря  $A$  и  $B$  (см. рисунок), после чего выходное отверстие трубки закрыли. Что произойдет с пузырями, если предоставить их самим себе, защитив от внешнего воздействия?



К задаче 5.28

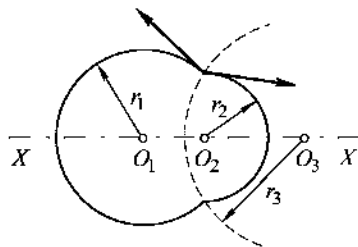
**5.29.** Найти значение добавочного (лапласовского) давления, создаваемого поверхностью: а) пузырька воздуха диаметром 18 мм, находящегося под водой; б) мыльного пузыря диаметром 20 мм.

**5.30.** Определить лапласовское давление в капле жидкости радиусом  $r$  и энергией поверхностного слоя  $\Pi$ .

**5.31.** В тот момент, когда пузырек воздуха находится в воде у ее поверхности, его радиус равен 1 мм. Какова плотность воздуха в пузырьке при нормальном атмосферном давлении и температуре 293 К?

**5.32.** Каков внутренний диаметр стеклянной трубки, если искривленная поверхность воды в ней создает добавочное давление 320 Па? Краевой угол равен  $30^\circ$ .

**5.33.** Зная, что поверхность соприкосновения двух мыльных пузырей с радиусами  $r_1 = 24,0$  мм и  $r_2 = 20,0$  мм имеет также сферическую форму, найти добавочное давление, создаваемое этой поверхностью, и ее радиус кривизны  $r_3$  (см. рисунок). Найти углы, образуемые мыльными пленками в точках их соприкосновения.



К задаче 5.33

**5.34.** Капля ртути помещена между двумя горизонтальными пластинками. С какой силой нужно прижать пластинки друг к другу, чтобы между ними образовался зазор 3,02 мкм? Масса капли 306 мг. Смачивание отсутствует.

**5.35.** Объяснить действие фитиля, бинта из марли, промокательной бумаги.

**5.36.** Во время засухи на поверхности земли образуется твердая корка. Надо ли ее сохранять, чтобы не допустить высыхания нижних слоев земли?

**5.37.** Как следует поступить, чтобы поднять подпочвенную воду к поверхности?

**5.38.** При измерении поверхностного натяжения спирта использовалась капиллярная трубка диаметром канала 0,15 мм. При температуре 293 К спирт поднялся в ней на высоту 7,6 см. Чему равно поверхностное натяжение спирта по результатам опыта?

**5.39.** Определить диаметры каналов двух капиллярных трубок, в которых при температуре 293 К вода поднималась на высоту 15 и 40 мм.

**5.40.** В капилляре жидкость поднялась на высоту  $H$  от уровня жидкости в широком сосуде. Что произойдет, если, погружая капилляр, верхний его конец приближать к поверхности жидкости?

**5.41.** Диаметр канала капиллярной трубки 0,20 мм. Вычислить, на сколько поднимутся в ней вода, керосин и на сколько опустится ртуть. Температура комнатная. Вычислить для керосина работу поверхностных сил и потенциальную энергию поднятого столба жидкости.

**5.42.** На сколько поднимется эфир в капиллярной трубке диаметром канала 0,66 мм, если краевой угол  $\theta$  на границе соприкосновения стекла, эфира и воздуха равен  $20^\circ$ ? На сколько опустится в этом же капилляре ртуть? Краевой угол для ртути принять равным  $155^\circ$ .

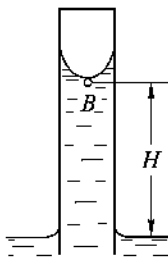
**5.43.** Капилляр помещен в стакан с водой (см. рисунок). Определить давление в точке  $B$ , расположенной непосредственно под искривленной поверхностью на высоте  $H$  над уровнем воды в стакане. Атмосферное давление  $p_0$ .

**5.44.** Дно сосуда представляет собой частую сетку — сито из материала, не смачиваемого водой. До какой наибольшей высоты можно налить воду в этот сосуд, чтобы она не вытекала через дно? Решить такую же задачу для керосина. Диаметр отверстий в сетках равен 0,20 мм.

**5.45.** В дне стеклянного цилиндра имеется отверстие диаметром 1,0 мм. Диаметр дна цилиндра 10 см. Какой может быть максимальная масса ртути в цилиндре, чтобы она не вытекала через отверстие?

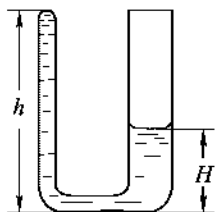
**5.46.** Внутренние диаметры правого и левого колен U-образной капиллярной трубки соответственно равны  $d_1 = 1,0$  мм и  $d_2 = 0,20$  мм. Найти разность уровней  $\Delta h$  налитой в трубку воды; керосина; ртути. Чему равно поверхностное натяжение насыщенного раствора сульфата меди, если разность уровней для него в данной трубке 105 мм?

**5.47.** Радиусы внутренних каналов U-образного капилляра равны  $R_1$  и  $R_2$ , причем  $R_1 < R_2$ . До какой максимальной высоты  $H$  (см.



К задаче 5.43

рисунок) можно налить воду в широкий капилляр, чтобы вода не выливалась из узкого капилляра высотой  $h$ ?



К задаче 5.47

**5.48.** Как будет меняться разность уровней в капиллярах на рисунке к задаче 5.47 при нагревании жидкости?

**5.49.** Длинную капиллярную трубку, открытую с двух концов, наполнили водой и расположили вертикально. Диаметр канала трубки 1,2 мм. Какой высоты столб воды останется в трубке?

**5.50.** Две параллельные стеклянные пластины частично погружены в воду (см. рисунок к примеру 25). Считая смачивание полным, определить высоту, на которую поднимется вода между пластинами, и силу, с которой притягиваются пластины. Ширина пластины  $b = 5,0$  см; расстояние между ними  $d = 0,25$  мм.

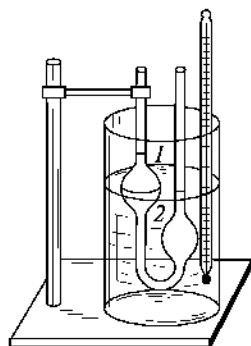
### Осмотическое давление. Вязкость

**5.51.** Вычислить осмотическое давление, возникающее при растворении 10 г сахара  $C_{12}H_{22}O_{11}$  в 0,50 л воды при температуре 40 °С. Считать, что диссоциация отсутствует.

**5.52.** Сколько сульфата натрия  $Na_2SO_4$  потребуется растворить в 1 л воды при температуре 298 К, чтобы осмотическое давление оказалось равным 260 кПа?

**5.53.** В банку с водой погружена затянута полупроницаемой мембраной перевернутая воронка с длинной трубкой (см. рисунок к задаче 1.34), содержащая раствор 0,50 г сульфата меди в 3,0 л воды при температуре 288 К. Чему равна разность уровней жидкости в трубке и банке?

**5.54.** Стальной шарик диаметром 1,0 мм опускается с установившейся скоростью 50,25 см/с в сосуде с глицерином. Сила сопротивления движению шарика в жидкости  $F = 6\pi r\eta v$ , где  $r$  — радиус шарика,  $v$  — установившаяся скорость,  $\eta$  — динамическая вязкость жидкости. Найти  $\eta$  для глицерина; сделать такой же расчет для касторового масла ( $\rho = 960$  кг/м<sup>3</sup>), если скорость падения шарика в этом случае 0,19 см/с.



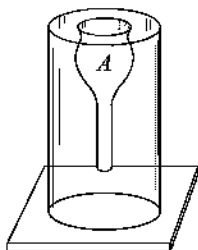
К задаче 5.55

**5.55.** На рисунке схематически изображен вискозиметр Оствальда, служащий для определения динамической вязкости, меньшей или несколько большей, чем у воды. Из опыта находят сначала продолжительность  $t_1$  протекания через прибор (между метками 1 и 2) строго определенного объема воды, а затем продолжительность  $t_2$  протекания



такого же объема испытуемой жидкости. По формуле  $\eta_2 = \eta_1 \frac{\rho_2 t_2}{\rho_1 t_1}$ , где  $\eta_1$  и  $\rho_1$  — вязкость и плотность воды при температуре 293 К, вычисляют динамическую вязкость  $\eta_2$ . Вычислить динамическую вязкость при той же температуре бензола, этилового спирта и нитробензола, если для протекания через вискозиметр одного и того же объема каждой из названных жидкостей потребовалось соответственно 42, 90, 100 с; для воды  $t_1 = 60$  с,  $\eta_1 = 1,00 \cdot 10^{-3}$  Па·с. Сколько времени потребуется для протекания через вискозиметр такого же объема эфира ( $\eta_1 = 2,43 \times 10^{-4}$  Па·с)?

**5.56.** На рисунке схематически изображен вискозиметр Энглера, предназначенный для определения динамической вязкости жидкостей, значительно более вязких, чем вода. Сначала вычисляют отношение продолжительности  $t_2$  вытекания 200 г испытуемой жидкости из сосуда А к продолжительности  $t_1$  вытекания 200 г воды из того же сосуда. Затем, пользуясь формулой  $\eta = (7,32E - 6,31/E)\rho \cdot 10^{-6}$ , где  $\rho$  — плотность данной жидкости,  $E = t_2/t_1$ , определяют при температуре 293 К динамическую вязкость анилина, насыщенного раствора фенола ( $\rho = 1250$  кг/м<sup>3</sup>) и мазута ( $\rho = 9 \cdot 10^2$  кг/м<sup>3</sup>), учитывая, что для протекания через прибор 200 г каждой из названных жидкостей требуется соответственно 63,5, 87,5 и 400 с, а для протекания 200 г воды 50 с. Сколько времени понадобится для протекания через прибор 200 г нитробензола ( $\eta = 2 \cdot 10^{-3}$  Па·с)?



К задаче 5.56

## § 6. Свойства твердых тел. Плавление и кристаллизация. Деформации

**Пример 27.** Зная, что микрорешетка серебра имеет кубическую гранецентрированную решетку (см. рисунок к задаче 6.1), определить число ближайших «соседей» каждого атома серебра; число атомов, приходящихся на элементарную ячейку решетки; постоянную решетки \*); наименьшее расстояние между частицами.

**Дано:** Из таблиц:  $M = 107,88 \cdot 10^{-3}$  кг/моль — молярная масса серебра,  $N_A = 6,022 \cdot 10^{23}$  моль<sup>-1</sup> — постоянная Авогадро,  $\rho = 1,05 \cdot 10^4$  кг/м<sup>3</sup> — плотность серебра.

**Найти:**  $n$  — число ближайших «соседей» каждого атома,  $k$  — число атомов в элементарной ячейке,  $a$  — постоянную решетки;  $d$  — наименьшее расстояние между частицами.

\*) Постоянная кубической пространственной решетки — длина ребра элементарной ячейки кристалла.

**Решение.** Если взять атом в одной из вершин куба, то у него в каждой из взаимно перпендикулярных плоскостей окажется четыре соседа-атома в центрах граней. Всего соседей будет 12.

На элементарную ячейку приходится по одному атому из расположенных в вершине куба и по три из расположенных в центрах его граней — всего четыре атома.

Параметры кубической решетки определяются по формулам

$$a = \sqrt[3]{\frac{M}{\rho N_A} \frac{k}{q}}, \quad d = \frac{\sqrt{2}}{3} a^*),$$

где  $q = 1$  — число атомов (ионов) в молекуле. Например, для ионных решеток  $\text{NaCl}$ ,  $\text{ZnS}$   $q = 2$ .

Подставляя в полученные выражения числовые значения физических величин, получаем

$$a = \sqrt[3]{\frac{107,88 \cdot 10^{-3} \cdot 4}{1,05 \cdot 10^4 \cdot 6,022 \cdot 10^{23}} \frac{\text{кг/моль}}{\text{кг/м}^3 \cdot \text{моль}^{-1}}} \approx 4,09 \cdot 10^{-10} \text{ м},$$

$$d = 0,707 \cdot 4,09 \cdot 10^{-10} \text{ м} \approx 2,89 \cdot 10^{-10} \text{ м}.$$

**Ответ:**  $n = 12$ ;  $k = 4$ ;  $a \approx 4,09 \cdot 10^{-10} \text{ м}$ ;  $d \approx 2,89 \cdot 10^{-10} \text{ м}$ .

**Пример 28.** КПД холодильника равен 80 %. Сколько холодильного агента фреона-12 должно испариться для обращения в лед 150 г воды с начальной температурой 289 К? Нагревание фреона до 0 °С не учитывать.

**Дано:**  $\eta = 0,80$  — КПД холодильника;  $m_{\text{в}} = 0,15 \text{ кг}$  — масса охлаждаемой воды;  $T_1 = 289 \text{ К}$  — начальная температура воды. Из таблиц:  $T_2 = 273 \text{ К}$  — температура плавления льда;  $\lambda = 3,32 \cdot 10^5 \text{ Дж/кг}$  — удельная теплота плавления льда;  $c_{\text{в}} = 4187 \text{ Дж/(кг} \cdot \text{К)}$  — удельная теплоемкость воды;  $r_{\text{фр}} = 1,68 \cdot 10^6 \text{ Дж/кг}$  — удельная теплота испарения фреона.

**Найти:**  $m_{\text{фр}}$  — массу испарившегося фреона.

**Решение.** Задача решается с помощью уравнения теплового баланса. Количество теплоты, которое отдает вода при охлаждении и замерзании,

$$Q_1 = c_{\text{в}} m_{\text{в}} (T_1 - T_2) + \lambda m_{\text{в}}.$$

Количество теплоты, затраченное на испарение фреона,

$$Q_2 = r_{\text{фр}} m_{\text{фр}}.$$

Величины  $Q_1$  и  $Q_2$  связаны между собой формулой  $\eta = Q_1/Q_2$ .

На основании закона сохранения энергии составляем уравнение теплового баланса:

$$c_{\text{в}} m_{\text{в}} (T_1 - T_2) + \lambda m_{\text{в}} = r_{\text{фр}} m_{\text{фр}} \eta.$$

\*) Формула справедлива для кубической гранецентрированной решетки. Для кубической объемноцентрированной решетки расстояние  $d$  между соседними атомами находится по формуле  $d = (\sqrt{3}/2) a$ .

Решив это уравнение относительно  $m_{\text{фр}}$ , находим

$$m_{\text{фр}} = \frac{c_b m_b (T_1 - T_2) + \lambda m_b}{r_{\text{фр}} \eta}.$$

Подставляя числовые значения, получаем

$$m_{\text{фр}} = \frac{0,15 \cdot [4187 \cdot 16 + 3,32 \cdot 10^5]}{1,68 \cdot 10^6 \cdot 0,80} \frac{\text{кг} \cdot \text{Дж/кг}}{\text{Дж/кг}} \approx 0,044 \text{ кг} = 44 \text{ г}.$$

Ответ:  $m_{\text{фр}} \approx 44 \text{ г}$ .

**Пример 29.** К стальному стержню с площадью поперечного сечения  $2,0 \text{ см}^2$  и длиной  $0,50 \text{ м}$  подвешен груз массой  $5,0 \text{ т}$ . Определить запас прочности стержня, если предел прочности (разрушающее напряжение) при растяжении стали равен  $1,25 \text{ ГПа}$ . Каковы относительное удлинение стержня и его энергия упругой деформации? Массой стержня пренебречь.

Дано:  $m = 5,0 \cdot 10^3 \text{ кг}$  — масса груза;  $l = 0,50 \text{ м}$  — длина стержня;  $S = 2,0 \cdot 10^{-4} \text{ м}^2$  — площадь поперечного сечения стержня. Из таблиц:  $g = 9,8 \text{ м/с}^2$  — ускорение свободного падения,  $\sigma_{\text{ст}} = 1,25 \cdot 10^9 \text{ Па}$  — предел прочности стали,  $E = 2,2 \cdot 10^{11} \text{ Па}$  — модуль Юнга.

Найти:  $n$  — запас прочности;  $\varepsilon$  — относительное удлинение;  $\Pi$  — энергию упругой деформации.

Решение. Запас прочности найдем по формуле  $n = \sigma_{\text{ст}}/\sigma$ , где  $\sigma = F/S$ , а  $F = mg$ , откуда

$$n = \frac{\sigma_{\text{ст}} S}{mg}.$$

Относительное удлинение найдем по формуле

$$\varepsilon = \frac{1}{E} \sigma = \frac{mg}{ES}.$$

Зная деформирующую силу  $F = mg$  и абсолютную деформацию  $\Delta l$ , определим энергию упругой деформации:

$$\Pi = \frac{F \Delta l}{2}, \quad \text{где} \quad \Delta l = \varepsilon l = \frac{mgl}{ES}.$$

Очевидно, что

$$\Pi = \frac{(mg)^2 l}{2ES}.$$

Подставляя числовые данные, получаем значение искомых величин:

$$n = \frac{1,25 \cdot 10^9 \cdot 2,0 \cdot 10^{-4}}{5,0 \cdot 10^3 \cdot 9,8} \frac{\text{Па} \cdot \text{м}^2}{\text{кг} \cdot \text{м/с}^2} \approx 5,1,$$

$$\varepsilon = \frac{5,0 \cdot 10^3 \cdot 9,8}{2,2 \cdot 10^{11} \cdot 2,0 \cdot 10^{-4}} \frac{\text{кг} \cdot \text{м/с}^2}{\text{Па} \cdot \text{м}^2} \approx 1,1 \cdot 10^{-3},$$

$$\Pi = \frac{(5,0 \cdot 10^3 \cdot 9,8)^2 \cdot 0,50}{2 \cdot 2,2 \cdot 10^{11} \cdot 2,0 \cdot 10^{-4}} \frac{(\text{кг} \cdot \text{м/с}^2)^2 \cdot \text{м}}{\text{Па} \cdot \text{м}^2} \approx 14 \text{ Дж}.$$

Ответ:  $n \approx 5,1$ ;  $\varepsilon \approx 1,1 \cdot 10^{-3}$ ;  $\Pi \approx 14 \text{ Дж}$ .

**Пример 30.** Предел упругости отпущенной стали равен 572 МПа. Будет ли деформация упругой или пластической, если стальная проволока длиной 3,00 м и площадью поперечного сечения 1,20 мм<sup>2</sup> под действием растягивающей силы удлинится на 8,00 мм? Под действием какой силы происходит такая деформация?

*Дано:*  $\sigma_{\text{упр}} = 5,72 \cdot 10^8$  Па — предел упругости;  $l = 3,00$  м — длина проволоки;  $\Delta l = 8,00$  мм =  $8,00 \cdot 10^{-3}$  м — абсолютное удлинение проволоки;  $S = 1,20$  мм<sup>2</sup> =  $1,20 \cdot 10^{-6}$  м<sup>2</sup> — площадь поперечного сечения проволоки. Из таблиц:  $E = 1,96 \cdot 10^{11}$  Па — модуль Юнга.

*Найти:* вид деформации (упругая или пластическая);  $F$  — силу, вызывающую заданное удлинение.

**Решение.** Для определения вида деформации в проволоке найдем напряжение в ней  $\sigma$  и сравним его с пределом упругости  $\sigma_{\text{упр}}$ . Учтывая, что  $\sigma = E\varepsilon$  и  $\varepsilon = \Delta l/l$ , получаем

$$\sigma = E \frac{\Delta l}{l} = \frac{1,96 \cdot 10^{11} \cdot 8,00 \cdot 10^{-3}}{3,00} \frac{\text{Па} \cdot \text{м}}{\text{м}} \approx 5,23 \cdot 10^8 \text{ Па} = 5,23 \cdot 10^2 \text{ МПа}.$$

Сравнивая полученное значение напряжения  $\sigma$  с пределом упругости, видим, что оно меньше предела упругости ( $\sigma < \sigma_{\text{упр}}$ ), следовательно, деформация в проволоке упругая.

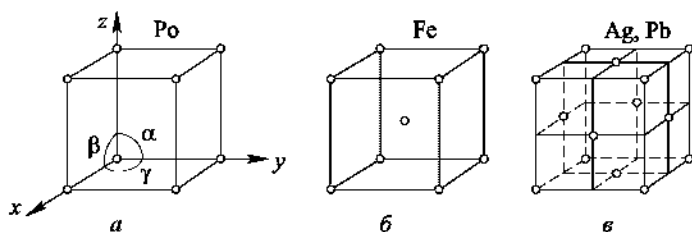
Определим силу  $F$ , вызывающую деформацию в проволоке:

$$F = \sigma S = 5,23 \cdot 10^8 \cdot 1,20 \cdot 10^{-6} \text{ Па} \cdot \text{м}^2 \approx 6,27 \cdot 10^2 \text{ Н}.$$

**Ответ:** Деформация проволоки упругая;  $F \approx 6,27 \cdot 10^2$  Н.

## Пространственная решетка кристалла

**6.1.** На рисунке изображены элементарные ячейки атомных кубических решеток:  $a$  — примитивная (полоний),  $b$  и  $в$  — объемно- и гранецентрированные ( $\alpha$ -железо\*), свинец). Найти для каждого случая: число ближайших соседей у каждого атома и число атомов в элемен-

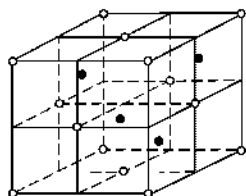


К задаче 6.1

\*)  $\alpha$ -Fe — одна из разновидностей твердой фазы железа; при нагреве до 910 °С переходит в  $\gamma$ -Fe, обладающее гранецентрированной решеткой. При температуре 1392 °С возвращается к прежней структуре ( $\alpha$ -Fe), сохраняя ее до точки плавления.

тарной ячейке. Вычислить постоянную решетки и наименьшее расстояние между атомами  $d$ . Отношения  $d/a$  для ячеек соответственно равны  $1, \sqrt{3}/2, \sqrt{2}/2$ .

**6.2.** На рисунке изображена элементарная ячейка кубической пространственной решетки алмаза (или германия, атомы внутри куба показаны зачерненными кружками). Представить ее в виде плоской сетки и в виде сочетания двух гранецентрированных решеток, первоначально совмещенных. Одна из них сдвигается по отношению к другой вдоль общей диагонали на  $1/4$  ее длины. Найти число ближайших соседей у каждого атома и число атомов, приходящихся на элементарную ячейку.



К задаче 6.2

**6.3.** Найти постоянную пространственной решетки алмаза и наименьшее расстояние между атомами (см. рисунок к задаче 6.2). Определить число атомов, содержащихся в германиевой пластинке, размером  $12 \times 3 \times 0,74$  см.

**6.4.** Почему аморфные вещества в отличие от кристаллов изотропны?

**6.5.** В процессе кристаллизации металла из расплава образуется поликристаллическая структура. Почему?

**6.6.** Когда металл прочнее, при крупных или мелких кристаллических зернах?

**6.7.** Возможно ли из расплава получить аморфный материал?

**6.8.** Почему прочность на разрыв ионных кристаллов в тысячи раз меньше теоретических значений разрушающих напряжений?

## Плавление и кристаллизация

**6.9.** Почему при замерзании воды в водоемах льдом покрывается раньше его поверхность?

**6.10.** Почему во время ледохода становится холоднее, а при снегопаде — теплее?

**6.11.** В плавких предохранителях используется свинцовая проволока, а в лампах накаливания вольфрамовая. Почему?

**6.12.** Какое вещество, взятое в одном и том же объеме при одинаковой температуре, служит лучшим охладителем — речной лед или снег?

**6.13.** В холодное время года при остановке двигателя автомобиля на длительное время из системы охлаждения сливают воду. Зачем?

**6.14.** В тающий снег поместили пробирку со льдом, имеющим температуру  $0^\circ\text{C}$ . Будет ли таять лед в пробирке?

**6.15.** Равные по массе вода и лед имеют температуру  $0^\circ\text{C}$ . Одинакова ли их внутренняя энергия?

**6.16.** Какое значение для весенних полевых работ имеют большие удельная теплота плавления льда и удельная теплота парообразования воды?

**6.17.** Сколько теплоты потребуется для плавления 200 г льда, взятого при температуре  $0^{\circ}\text{C}$  и при  $-10^{\circ}\text{C}$ ?

**6.18.** Определить количество теплоты, выделяющейся в процессе затвердевания и охлаждения до  $20^{\circ}\text{C}$  200 г серы и 200 г нафталина, взятых при температуре плавления.

**6.19.** Лед, взятый при температуре  $-20^{\circ}\text{C}$ , путем нагревания превращается в воду с температурой  $100^{\circ}\text{C}$ . Масса льда 10 кг. Определить количество затраченной теплоты.

**6.20.** Какое количество теплоты выделится при превращении в лед с температурой  $-20^{\circ}\text{C}$  водяного пара, взятого при  $100^{\circ}\text{C}$ ? Масса пара 6,0 кг.

**6.21.** Для плавления льда, взятого при температуре  $0^{\circ}\text{C}$ , понадобилось 4 мин, а для нагревания на том же нагревателе образовавшейся воды до  $100^{\circ}\text{C}$  — 5 мин. Пренебрегая теплообменом с окружающей средой, определить удельную теплоту плавления льда.

**6.22.** В теплой комнате температура воды повысилась на 5 К за 10 мин. За какое время в этой комнате расплавится половина такой же массы льда, взятого при температуре  $0^{\circ}\text{C}$ ? Скорость теплообмена постоянна.

**6.23.** Домашний холодильник за 20 мин охлаждает 1,5 л воды от 16 до  $4^{\circ}\text{C}$ . Сколько потребуется времени, чтобы при том же режиме холодильника 40% воды обратить в лед?

**6.24.** До какой температуры следует нагреть алюминиевый куб, чтобы, поставленный на лед, он мог полностью в него погрузиться? Температура льда  $0^{\circ}\text{C}$ .

**6.25.** При определенных условиях вода может охлаждаться ниже  $0^{\circ}\text{C}$ , не обращаясь в лед. Сколько льда образуется, если в 1000 г переохлажденной до  $-10^{\circ}\text{C}$  воды бросить маленький кусочек льда, вызвав тем самым ее кристаллизацию?

**6.26.** Лед массой 100 г, находящийся при температуре  $0^{\circ}\text{C}$ , заключен в теплонепроницаемую оболочку и подвергнут давлению 55,93 МПа. Определить массу расплавленного льда, если при повышении давления на 13,98 МПа температура плавления понижается на  $1^{\circ}\text{C}$ .

**6.27.** Какому давлению нужно подвергнуть заключенный в теплонепроницаемую оболочку лед при температуре  $0^{\circ}\text{C}$ , чтобы 1/20 часть его расплавилась (см. задачу 6.26)?

**6.28 \*).** Из колбы, в которой находилось 575 г воды при температуре  $0^{\circ}\text{C}$ , откачивают воздух и водяной пар, благодаря чему часть воды в колбе замерзает. Определить массу образовавшегося льда.

---

\*) Значение удельной теплоты парообразования воды при  $0^{\circ}\text{C}$  равно  $2,54 \times 10^6$  Дж/кг.

**6.29 \*)**. В колбе находилось 518 г воды при температуре 0 °С. Выкачивая из колбы воздух и водяной пар, воду заморозили. Сколько воды при этом испарилось?

**6.30.** В алюминиевый калориметр массой 0,20 кг, содержащий 0,34 кг воды при общей температуре 23,5 °С, поместили 81,5 г льда при 0 °С. Найти температуру, установившуюся в калориметре после таяния льда.

**6.31.** В медный калориметр, в котором находилось 0,70 кг воды при температуре 25 °С, поместили кубики льда при 0 °С. Когда весь лед растаял, в калориметре оказалось 0,775 кг воды при температуре 15,2 °С. Масса калориметра 0,20 кг. Используя данные опыта, определить удельную теплоту плавления льда.

**6.32.** 2 кг воды при температуре 20 °С, содержащиеся в алюминиевой кастрюле, охлаждают до 10 °С погружением кусочков льда с температурой –10 °С. Масса кастрюли 500 г. Сколько было израсходовано льда?

**6.33.** Что произойдет, если в сосуд, содержащий 5,52 кг воды при температуре 10,5 °С, поместить лед при –20,4 °С массой 455 г? 5,692 кг? Теплоемкостью сосуда пренебречь.

**6.34.** В медном калориметре находится 450 г воды и 325 г льда при общей температуре 0 °С. Сколько водяного пара при 100 °С необходимо ввести в калориметр, чтобы установилась температура 22,5 °С? Масса калориметра 224 г.

**6.35.** Сосуд содержит 2,0 л воды и лед при общей температуре 0 °С. После введения 380 г водяного пара при температуре 100 °С лед растаял и вся вода нагрелась до 70 °С. Сколько было льда в сосуде? Теплоемкость сосуда 57 Дж/К.

**6.36.** В медный котел массой 6,0 кг, содержащий 20,5 л воды при температуре 19 °С, вылило расплавленное олово при температуре плавления. После того как 100 г воды испарилось, в котле установилась температура 32 °С. Определить массу олова, если потери теплоты, отданной им, составили 25 %.

**6.37.** В сосуд, содержащий 2,0 л воды при температуре 20 °С, вылили 0,65 кг жидкого свинца, температура которого 327 °С. При этом часть воды испарилась и установилась температура 23,5 °С. Принимая теплоемкость сосуда равной 120 Дж/К, а потери теплоты 15 %, определить массу испарившейся воды.

**6.38.** С какой высоты должен упасть кусок олова, чтобы при ударе о землю он расплавился? На нагревание и плавление олова идет 50 % работы силы тяжести; начальная температура олова 0 °С.

**6.39.** С какой начальной скоростью нужно бросить с высоты 2,0 км вертикально вниз свинцовое тело, чтобы при ударе о землю половина

---

\*) Значение удельной теплоты парообразования воды при 0 °С равно  $2,54 \times 10^6$  Дж/кг.

его расплавилась? Начальная температура тела  $20^{\circ}\text{C}$ . На нагревание и плавление расходуется 60 % механической энергии тела.

**6.40.** Какую минимальную скорость должен иметь железный метеор, чтобы в атмосфере Земли он мог обратиться в пар? Начальная температура метеора близка к абсолютному нулю.

**6.41.** С какой скоростью должны лететь навстречу друг другу две одинаковые льдинки, чтобы при соударении обратиться в пар? Начальная температура льдинок  $-100^{\circ}\text{C}$ . Передачу теплоты окружающей среде не учитывать.

**6.42 \*)**. Сколько топлива (кокса) потребуется для получения 1 т алюминиевого литья и литья из серого чугуна? КПД литейного агрегата принять в первом случае 35 %, во втором 45 %. Начальная температура металла  $0^{\circ}\text{C}$ .

**6.43 \*)**. Сколько белого чугуна можно расплавить в печи с КПД 18 %, если израсходовать 3,0 т каменного угля марки А-І? Начальная температура чугуна  $20^{\circ}\text{C}$ .

**6.44.** Необходимо расплавить 10 т меди, начальная температура которой  $25^{\circ}\text{C}$ . Сколько потребуется сжечь нефти в плавильной печи с КПД 30 %?

**6.45.** Определить КПД холодильной установки, в которой путем испарения 240 г аммиака обратили в лед 0,60 л воды с начальной температурой  $18^{\circ}\text{C}$ .

**6.46.** Сколько льда с температурой  $0^{\circ}\text{C}$  можно получить при испарении 100 г аммиака, если КПД холодильника составляет 87 %, начальная температура воды  $15^{\circ}\text{C}$ , а в лед обращается  $1/4$  ее часть?

**6.47.** В камере бытового холодильника за 2 ч его работы 2,5 л воды охлаждены от  $20$  до  $0^{\circ}\text{C}$ , причем  $1/5$  часть этой воды обратилась в лед. Вычислить КПД холодильника и количество теплоты, отданное воздуху комнаты, если холодильник потребляет 75 Вт.

**6.48 \*\*)**. Имеются два одинаковых сосуда Дьюара. Один из них содержит кипящий азот, другой — тающий при  $0^{\circ}\text{C}$  речной лед. За 6 ч из первого сосуда испарилось 99,65 г азота, за 8 ч во втором сосуде растаяло 6,94 г льда. Найти температуру кипения азота, зная, что его удельная теплота парообразования равна  $1,88 \cdot 10^5$  Дж/кг. Температура и давление окружающего воздуха в обоих случаях  $20^{\circ}\text{C}$  и 101,3 кПа.

### Фазовые переходы

**6.49.** Какая точка на  $pT$ -диаграмме состояния (см. рисунок) соответствует равновесию трех фаз — твердой, жидкой и газообразной? Как называется эта точка? Каковы ее параметры для воды?

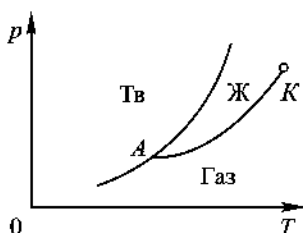
\*) Белый чугун служит для переплавки его в сталь; из серого литейного чугуна изготавливаются различные изделия.

\*\*) Считать, что количество тепла, поступающего в сосуды, пропорционально разности температур окружающей среды и сосуда.

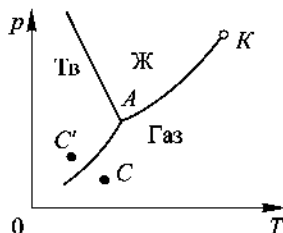


**6.50.** Существуют ли в природе вещества, не имеющие тройной точки?

**6.51.** Кривая равновесия твердого тела с газом исходит из начала координат (см. рисунок к задаче 6.49). Какой из этого следует вывод?



К задаче 6.49



К задаче 6.52

**6.52.** На  $pT$ -диаграммах равновесных состояний для льда, висмута, галлия кривая плавления отклонена влево (см. рисунок). На что это указывает?

**6.53.** Всегда ли справедливо утверждение, что процессы плавления можно рассматривать как фазовый переход?

**6.54.** На  $pT$ -диаграмме (см. рисунок к задаче 6.52) состояние вещества отмечено точкой  $C$ . Какие изменения произойдут с веществом, если его подвергнуть изотермическому сжатию?

**6.55.** На  $pT$ -диаграмме (см. рисунок к задаче 6.52) состояние кристаллического вещества отмечено точкой  $C'$ . Что произойдет с веществом, если его нагревать при постоянном давлении? Привести пример.

**6.56.** Почему твердая углекислота сублимирует при нормальном атмосферном давлении? Параметры тройной точки для углекислоты 516 кПа и 216,6 К.

**6.57.** Какое условие необходимо, чтобы газообразное вещество при изобарном охлаждении перешло вначале в жидкое, а затем в твердое состояние?

**6.58.** В 0,15 кг воды с температурой  $8,5^\circ\text{C}$  помещено 60 г льда, имеющего температуру  $-8,0^\circ\text{C}$ . Считая систему вода–лед теплоизолированной, определить температуру, при которой установится тепловое равновесие. Сколько льда растает?

**6.59.** Кусок олова массой 0,9 кг, получив 75 кДж теплоты, расплавился наполовину, а между жидким и твердым оловом наступило тепловое равновесие. Определить начальную температуру олова. Потери энергии в окружающую среду не учитывать.

**6.60.** Почему на диаграмме состояния (см. рисунок к задаче 6.49) линия фазового перехода жидкость–газ ограничена точкой  $K$  (критической)? Возможен ли переход газа в жидкость при температуре выше критической?

**6.61.** Известно, что для конкретного вещества теплота сублимации больше его теплоты парообразования. Каким должно быть это различие, чтобы не нарушался закон сохранения энергии?

**6.62.** На лед с температурой  $0^\circ\text{C}$ , помещают нагретый брусок из серого чугуна массой 450 г. Объем бруска в момент погружения  $61\text{ см}^3$ . Сколько льда растает в сосуде к моменту установления теплового равновесия? Нагревание сосуда и потери теплоты в окружающую среду не учитывать. Плотность чугуна при  $0^\circ\text{C}$  принять равной  $7,4 \cdot 10^3\text{ кг/м}^3$ .

**6.63.** В калориметре находится 400 г воды и 27,19 г льда с общей температурой  $0^\circ\text{C}$ . После того как в воду ввели 3,4 г сухого насыщенного пара при температуре  $100^\circ\text{C}$ , установилось тепловое равновесие с температурой  $\Theta$ . Определить эту температуру. Теплоемкость калориметра и теплообмен с окружающей средой не учитывать.

**6.64.** Вода в чайнике закипает быстрее, если он закрыт крышкой. Почему?

**6.65.** С какой целью в паровых турбинах используют перегретый пар?

**6.66.** Какие превращения ядер комет могут происходить при их приближении к перигелию?

**6.67.** Что способствует сходу снежных лавин?

### **Механическое напряжение. Деформации**

**6.68.** Какие виды деформаций испытывают стены зданий; тросы подъемного крана; рельсы железной дороги; валы машин; бумага при резании?

**6.69.** Как изменится площадь поперечного сечения стержня: при продольном сжатии? При продольном растяжении?

**6.70.** На тело в двух параллельных плоскостях действуют противоположно направленные пары сил. Какой вид деформации испытывает тело?

**6.71.** Какому виду деформации хорошо сопротивляется камень: сжатию, изгибу, кручению? Какому виду деформаций подвергается он в стенах зданий, колоннах, арках?

**6.72.** Бетон хорошо сопротивляется сжатию, но плохо выдерживает растяжение. Сталь обладает большей прочностью на растяжение. Какими свойствами обладает железобетон?

**6.73.** Под действием какой силы, направленной вдоль оси стержня, в нем возникает напряжение  $150\text{ МПа}$ ? Диаметр стержня равен  $0,40\text{ см}$ .

**6.74.** Каким должен быть диаметр стержня крюка подъемного крана, чтобы при равномерном подъеме груза, вес которого  $25\text{ кН}$ , напряжение в стержне не превышало  $60\text{ МПа}$ ?

**6.75.** Упругий стержень массой  $m$  и площадью поперечного сечения  $S$  движется вертикально вверх с ускорением  $a$ , направленным вдоль оси стержня и одинаковым для всех его точек. Определить механическое напряжение, возникающее вследствие ускоренного дви-

жения стержня в его поперечном сечении, проходящем через середину стержня.

**6.76.** Какой запас прочности имеет стальной стержень с площадью поперечного сечения  $3,00 \text{ см}^2$ , к которому подвешен груз массой  $7,50 \text{ т}$ , если разрушающее напряжение для данной марки стали при растяжении равно  $600 \text{ МПа}$ ? Массу стержня не учитывать.

**6.77.** Какой максимальный груз можно поднимать на канате, состоящем из двухсот стальных проволок диаметром  $1,0 \text{ мм}$ , при запасе прочности, равном  $5,0$ , при равномерном подъеме, а также при подъеме с ускорением  $0,50 \text{ м/с}^2$ ? Предел прочности стали принять  $0,50 \text{ ГПа}$ .

**6.78.** Лифт массой  $500 \text{ кг}$  поднимается с ускорением  $0,50 \text{ м/с}^2$  на тросе с пределом прочности на растяжение  $0,50 \text{ ГПа}$ . Какой должна быть площадь поперечного сечения троса при десятикратном запасе прочности?

**6.79.** Груз массой  $2,0 \text{ т}$  поднимается равномерно на стальном канате, состоящем из проволок диаметром  $1,0 \text{ мм}$ . Сколько проволок должно быть в канате при десятикратном запасе прочности, если предел прочности для стали равен  $580 \text{ МПа}$ ? Каким станет запас прочности каната при подъеме этого груза с ускорением  $1,0 \text{ м/с}^2$ ?

**6.80.** Какое механическое напряжение возникает в стальной проволоке длиной  $l$ , подвешенной вертикально, под действием собственной тяжести? Как оно зависит от площади поперечного сечения проволоки?

**6.81.** При какой максимальной длине подвешенная вертикально стальная проволока начнет рваться под действием собственного веса в воздухе и в морской воде? Предел прочности стали принять равным  $600 \text{ МПа}$ . Плотность морской воды  $1,03 \cdot 10^3 \text{ кг/м}^3$ .

**6.82.** Каково механическое напряжение у основания кирпичной стены высотой  $20 \text{ м}$ ? Одинаковой ли должна быть прочность кирпичной кладки в основании стены и в ее верхней части?

**6.83.** Предел прочности кирпича на сжатие составляет  $60 \text{ МПа}$ . Какой максимальной высоты можно построить кирпичное здание при запасе прочности  $8,0$ ?

**6.84.** Два стержня из одинакового материала и с равными площадями поперечного сечения имеют различную длину ( $l_1 > l_2$ ). Определить, одинаково ли их относительное удлинение под действием одинаковых сил. К какому стержню нужно приложить большую силу для получения одинакового абсолютного удлинения? Массой стержня пренебречь.

**6.85.** Как различаются относительные удлинения двух проволок из одного и того же материала при одинаковых растягивающих их силах, если длина и диаметр первой из них в два раза больше, чем у второй, и как различаются их абсолютные удлинения? Массой проволок пренебречь.

**6.86.** При растяжении алюминиевой проволоки площадью поперечного сечения  $4,0 \text{ мм}^2$  появление остаточной деформации наблюдалось при действии силы  $120 \text{ Н}$ . Каков предел упругости алюминия?

**6.87.** Под действием какой минимальной силы на латунной проволоке длиной 4,0 м и площадью поперечного сечения  $2,0 \text{ мм}^2$  появляется остаточная деформация? Каково при этом абсолютное удлинение проволоки? Предел упругости латуни составляет 0,11 ГПа. Массу проволоки не учитывать.

**6.88.** Медная проволока площадью поперечного сечения  $2,0 \text{ мм}^2$  разорвалась под действием груза, весящего 440 Н. Каков предел прочности меди?

**6.89.** Предел упругости алюминия составляет 31 МПа, а предел его прочности 0,13 ГПа. Пластичен или упруг алюминий? Можно ли его использовать для холодной штамповки?

**6.90.** Предел прочности чугуна на сжатие близок к пределу упругости. Можно ли штамповать чугун? прокатывать его?

**6.91.** Под действием силы 100 Н проволока длиной 5,0 м и площадью поперечного сечения  $2,5 \text{ мм}^2$  удлинилась на 1,0 мм. Определить напряжение, испытываемое проволокой, модуль Юнга и энергию упругой деформации.

**6.92.** Какую площадь поперечного сечения должен иметь медный стержень длиной 5,0 м, чтобы под действием силы 480 Н он удлинился не более чем на 1,0 мм? Выдержит ли стержень такое напряжение, если предел прочности меди при растяжении равен 0,22 ГПа? Массу стержня не учитывать.

**6.93.** На сколько удлинится стальная проволока длиной 1,8 м и диаметром 0,50 мм под действием груза весом 15 Н? Выдержит ли проволока груз весом 100 Н, если ее предел прочности на разрыв 1,2 ГПа?

**6.94.** При каком абсолютном удлинении стальной стержень длиной 2,0 м и площадью поперечного сечения  $10,0 \text{ мм}^2$  обладает потенциальной энергией 44 мДж?

**6.95.** Определить относительное удлинение медного стержня, если при его растяжении работа упругой силы равна 0,24 Дж. Длина стержня равна 2,0 м, площадь его поперечного сечения  $2,0 \text{ мм}^2$ .

**6.96.** К медному стержню длиной 1,0 м и площадью поперечного сечения  $10 \text{ мм}^2$  подвесили груз массой 100 кг. Определить потенциальную энергию упругой деформации стержня.

**6.97.** Какой потенциальной энергией обладает пружина, если для ее удлинения на 10 см понадобилось усилие 100 Н?

**6.98.** Определить потенциальную энергию упруго деформированной пружины, к которой подвешен груз массой 0,10 кг. Жесткость пружины равна 1,0 Н/см. Пружину считать невесомой.

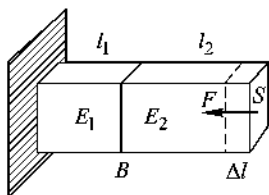
**6.99.** Какой груз нужно подвесить к пружине для упругого удлинения ее на 4,0 см, если жесткость пружины равна 1000,0 Н/м? Какой потенциальной энергией она при этом обладает?

**6.100.** К недеформированной пружине с жесткостью  $k$  подвесили груз массой  $m$  и отпустили. Какова потенциальная энергия упруго деформированной пружины в момент ее максимального удлинения? Пружину считать невесомой.

**6.101.** Какой потенциальной энергией обладает невесомая пружина с жесткостью  $k = 1,00 \cdot 10^3$  Н/м, к которой подвешен груз массой 1 кг? Какова потенциальная энергия системы из двух таких пружин, соединенных последовательно? параллельно? Масса груза пренебрежимо мала.

**6.102.** Какая пружина — стальная или медная — при упругой деформации под действием одинаковой силы приобретает большую потенциальную энергию при прочих равных условиях? Массу пружин не учитывать.

**6.103.** Упругий стержень состоит из двух частей с площадью поперечного сечения  $S$  и длинами  $l_1$  и  $l_2$  (см. рисунок). Модули упругости материалов его составных частей  $E_1$  и  $E_2$ . Под действием силы стержень сжимается на  $\Delta l$ . На сколько при этом переместится точка  $B$ ? Какая работа совершается при деформации всего стержня?



К задаче 6.103

## § 7. Тепловое расширение тел

**Пример 31.** На сколько кельвин потребуется нагреть медную проволоку площадью поперечного сечения  $5,0 \text{ мм}^2$ , чтобы ее удлинение было таким же, как под действием растягивающей силы 255 Н?

*Дано:*  $S = 5,0 \text{ мм}^2 = 5,0 \cdot 10^{-6} \text{ м}^2$  — площадь поперечного сечения проволоки;  $F = 255 \text{ Н}$  — растягивающая сила. Из таблиц:  $\alpha = 1,7 \times 10^{-5} \text{ К}^{-1}$  — температурный коэффициент линейного расширения меди,  $E = 1,27 \cdot 10^{11} \text{ Па}$  — модуль упругости меди.

*Найти:*  $\Delta T$  — разность температур.

**Решение.** При нагревании проволоки на  $\Delta T$  ее длина увеличивается на  $\Delta l = l_0 \alpha \Delta T$ , где  $l_0$  — длина проволоки при  $273 \text{ К}$  ( $0^\circ \text{С}$ ). По закону Гука относительное удлинение

$$\frac{\Delta l}{l_0} = \frac{1}{E} \frac{F}{S};$$

отсюда

$$\Delta l = \frac{l_0 F}{ES}.$$

По условию задачи удлинение под действием растягивающей силы должно быть таким же, как в результате нагревания; следовательно,

$$l_0 \alpha \Delta T = \frac{l_0 F}{ES};$$

отсюда

$$\Delta T = \frac{F}{ES\alpha}.$$

Подставляя в последнюю формулу числовые значения, получаем

$$\Delta T = \frac{255}{1,27 \cdot 10^{11} \cdot 5,0 \cdot 10^{-6} \cdot 1,7 \cdot 10^{-5}} \frac{\text{Н}}{\text{Па} \cdot \text{м}^2 \cdot \text{К}^{-1}} \approx 24 \text{ К}.$$

**Ответ:**  $\Delta T \approx 24 \text{ К}$ .

**Пример 32.** Латунный сплошной шар увеличился в объеме на  $2,85 \text{ см}^3$  после того, как ему сообщили  $161,5 \text{ кДж}$  теплоты. Определить температурный коэффициент линейного расширения латуни. Полученный результат сравнить с табличным значением и определить относительную погрешность.

*Дано:*  $\Delta V = 2,85 \text{ см}^3 = 2,85 \cdot 10^{-6} \text{ м}^3$  — увеличение объема шара;  $Q = 161,5 \text{ кДж} = 161,5 \cdot 10^3 \text{ Дж}$  — количество теплоты, затраченное на нагревание шара. Из таблиц:  $c = 380 \text{ Дж}/(\text{кг} \cdot \text{К})$  — удельная теплоемкость латуни;  $\rho = 8,5 \cdot 10^3 \text{ кг}/\text{м}^3$  — плотность латуни.

*Найти:*  $\alpha$  — температурный коэффициент линейного расширения латуни;  $\delta\alpha$  — относительную погрешность.

*Решение.* Увеличение объема  $\Delta V$  шара можно выразить через температурный коэффициент объемного расширения  $\beta$ :

$$\Delta V = V_0 \beta \Delta T.$$

Неизвестную разность температур определим из формулы

$$Q = c m \Delta T = c \rho V_0 \Delta T.$$

Отсюда

$$\Delta T = \frac{Q}{c \rho V_0}.$$

Подставляя найденное значение  $\Delta T$  в выражение для  $\Delta V$ , учитывая, что коэффициент объемного расширения приблизительно равен  $3\alpha$ , и производя сокращение на  $V_0$ , получаем

$$\Delta V = V_0 \cdot 3\alpha \frac{Q}{c \rho V_0}, \quad \text{или} \quad \Delta V = 3\alpha \frac{Q}{c \rho}.$$

Отсюда

$$\alpha = \frac{\Delta V c \rho}{3 Q}, \quad \delta\alpha = \frac{\alpha_{\text{таб}} - \alpha}{\alpha_{\text{таб}}} \cdot 100 \, \%.$$

Подставляя числовые значения величин, входящих в формулы, получаем

$$\alpha = \frac{2,85 \cdot 10^{-6} \cdot 380 \cdot 8,5 \cdot 10^3}{3 \cdot 161,5 \cdot 10^3} \frac{\text{м}^3 \cdot \text{Дж}/(\text{кг} \cdot \text{К}) \cdot \text{кг}/\text{м}^3}{\text{Дж}} = 1,89 \cdot 10^{-5} \text{ К}^{-1},$$

$$\delta\alpha = \frac{0,01 \cdot 10^{-5} \text{ К}^{-1}}{1,90 \cdot 10^{-5} \text{ К}^{-1}} \cdot 100 \, \% = 0,53 \, \%.$$

*Ответ:*  $\alpha = 1,89 \cdot 10^{-5} \text{ К}^{-1}$ ;  $\delta\alpha = 0,53 \, \%$ .

**Пример 33.** При  $0^\circ \text{С}$  стеклянная колба вмещает  $680 \text{ г}$  ртути, а при  $100^\circ \text{С}$  —  $670 \text{ г}$  ртути. Определить температурный коэффициент линейного расширения стекла.

*Дано:*  $m_0 = 680 \text{ г} = 0,68 \text{ кг}$  — масса ртути, заполняющей колбу при  $0^\circ \text{С}$ ;  $m = 670 \text{ г} = 0,67 \text{ кг}$  — масса ртути, оставшейся в колбе при  $100^\circ \text{С}$ ;  $T_0 = 273 \text{ К}$  и  $T = 373 \text{ К}$  — начальная и конечная температуры колбы с ртутью. Из таблиц:  $\beta_{\text{рт}} = 1,8 \cdot 10^{-4} \text{ К}^{-1}$  — температурный коэффициент объемного расширения ртути.

**Найти:**  $\alpha_{\text{ст}}$  — температурный коэффициент линейного расширения стекла.

**Решение.** Коэффициент линейного расширения стекла  $\alpha_{\text{ст}} = (1/3)\beta_{\text{ст}}$ , причем  $\beta_{\text{ст}}$  можно найти из соотношения  $V = V_0(1 + \beta_{\text{ст}}\Delta T)$ , здесь  $V$  и  $V_0$  — вместимость колбы и объемы ртути, заполняющей колбу при соответствующих температурах, а  $\Delta T = T - T_0$ .

Масса ртути, занимающей объем  $V$ , равна  $m = \rho V$ , причем

$$\rho = \frac{\rho_0}{1 + \beta_{\text{рт}}\Delta T}.$$

Масса ртути, занимающей объем  $V_0$ , равна  $m_0 = \rho_0 V_0$ . Возьмем отношение масс  $m$  и  $m_0$ , подставим полученные выражения для  $\rho$  и  $V$  и найдем значение  $\alpha_{\text{ст}}$ :

$$\frac{m}{m_0} = \frac{\rho V}{\rho_0 V_0} = \frac{\rho_0 V_0(1 + \beta_{\text{ст}}\Delta T)}{\rho_0 V_0(1 + \beta_{\text{рт}}\Delta T)} = \frac{1 + \beta_{\text{ст}}\Delta T}{1 + \beta_{\text{рт}}\Delta T}.$$

Отсюда

$$\alpha_{\text{ст}} = \frac{1}{3}\beta_{\text{ст}} = \frac{m(1 + \beta_{\text{рт}}\Delta T) - m_0}{3m_0\Delta T}.$$

Подставляя числовые значения, получим

$$\alpha_{\text{ст}} = \frac{0,67(1 + 0,00018 \text{ К}^{-1} \cdot 100 \text{ К}) - 0,68}{3 \cdot 0,68 \cdot 100} \frac{\text{кг}}{\text{кг} \cdot \text{К}} \approx 1,0 \cdot 10^{-5} \text{ К}^{-1}.$$

**Ответ:**  $\alpha_{\text{ст}} \approx 1,0 \cdot 10^{-5} \text{ К}^{-1}$ .

## Линейное и поверхностное тепловое расширение

**7.1.** Почему при повышении температуры тел происходит их расширение?

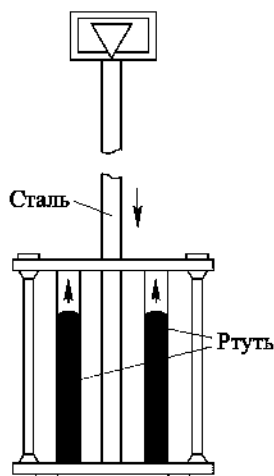
**7.2.** С какой целью при прокладке железнодорожных рельсов и их соединении оставляют промежутки в стыках, а отверстия для болтов в накладках на стыках делают удлиненной формы?

**7.3.** Что произойдет, если одно плечо коромысла чувствительных весов нагреть?

**7.4.** Объяснить устройство и действие компенсационного часового маятника (см. рисунок), у которого расстояние между центром масс и точкой подвеса остается неизменным при любой температуре.

**7.5.** Для чего в паропроводных трубах используются компенсаторы?

**7.6.** Рассчитать минимальный зазор в компенсаторе, установленном в стальном паропроводе, если его длина при  $0^\circ\text{C}$  составляет 25 м, а температура пара —  $140^\circ\text{C}$ .



К задаче 7.4

**7.7.** Какой из материалов в табл. XIII в наибольшей степени подходит для изготовления измерительного инструмента? Почему?

**7.8.** На рисунке изображен лабораторный прибор для измерения температурного коэффициента линейного расширения твердых тел с использованием индикатора. Удлинение трубки в результате нагревания считывается по красной шкале индикатора. При комнатной температуре (293 К) длина латунной трубки 400 мм. После пропускания пара



К задаче 7.8

через трубку на красной шкале индикатора обозначилось 0,59 мм. Конечную температуру трубки принять равной температуре пара (373 К). Какое значение получится для температурного коэффициента линейного расширения латуни? Какова относительная погрешность измерения в сравнении с табличным значением?

**7.9.** Почему используемые в строительстве монолиты из бетона и железа не разрушаются в результате суточных и годовых колебаний температуры?

**7.10.** Каким требованиям должен удовлетворять материал электродов, впаиваемых в стеклянный баллон лампы накаливания? Назовите этот материал (см. табл. XIII).

**7.11.** При температуре 293 К отмерено 450 м медной и столько же стальной проволоки. Какова будет разность их длин при температуре 373 К?

**7.12.** При любых температурах разность длин стержней из алюминия и меди равна 12 см. Определить их длины при температуре 0 °С.

**7.13.** Стальная ферма железнодорожного моста имеет при температуре 10 °С длину 75 м. Определить перемещение тележки, на которой покоится свободный конец фермы, при изменении температуры от -35 до 40 °С.

**7.14.** Длина железнодорожного рельса при температуре 30 °С равна 12,015 м. Определить длину рельса при 273 и 238 К.

**7.15.** При надевании на колесо повозки железной шины ее нагревают на 700 К. Диаметр колеса 1310 мм, первоначальный диаметр шины 1300 мм. Наденется ли шина на колесо?

**7.16.** Диаметр стеклянной пробки, застрявшей в горле бутылки, равен 60 мм. Чтобы вынуть пробку, горло бутылки нагрели на 120 К, причем сама пробка нагрелась лишь на 20 К. Определить размеры зазора между пробкой и горлом бутылки.

**7.17.** При 20 °С чугунное колесо трамвайного вагона имеет диаметр 1150 мм, а предназначенный для него стальной бандаж — диаметр



1145 мм. До какой температуры следует нагреть бандаж, чтобы зазор между ним и колесом был равен 1,0 мм?

**7.18.** При обработке чугунного шкива на токарном станке температура шкива повысилась до 200 °С. Какой диаметр должен иметь при этой температуре шкив, чтобы при остывании до 0 °С его диаметр стал равен 400 мм?

**7.19.** Стальной прокат режут на полосы сразу после выхода из прокатного стана при температуре 900 °С. Определить длину полос в горячем состоянии, если при охлаждении до 20 °С их длина оказалась 15,0 м.

**7.20.** Предложите простейшую схему электрической цепи, в которой с помощью биметаллической пластинки (сталь–медь) можно ограничить потребление электрической энергии.

**7.21.** Биметаллическая пластинка составлена из двух полосок — цинка и стали одинаковой длины и толщины при температуре 273 К. Определить радиус кривизны изгиба пластинки при ее нагревании на 100 К. Толщина биметаллической пластинки 0,40 мм с нагреванием изменяется пренебрежимо мало.

**7.22.** Какую силу необходимо приложить к стальному стержню, чтобы его удлинение было таким же, как от нагревания на 1 К? Площадь поперечного сечения стержня 1,1 см<sup>2</sup>.

**7.23.** Какова масса груза, подвешенного к стальной проволоке, если ее удлинение от действия груза было таким, как при нагревании на 20 К?  $S = 3,2 \text{ мм}^2$ .

**7.24.** На сколько кельвин необходимо нагреть алюминиевую проволоку, чтобы она приняла ту же длину, что и под действием растягивающей силы, равной 508 Н? Площадь поперечного сечения проволоки 6,0 мм<sup>2</sup>.

**7.25.** Медная проволока натягивалась между двумя неподвижными стойками, когда ее температура была 120 °С. При какой температуре возникает опасность разрыва, если предел прочности проволоки равен 200 МПа? Считать, что закон Гука может быть применим при указанном напряжении.

**7.26.** Концы стальной балки наглухо заделаны в противоположные стены помещения. Определить давление, которое будет производить балка на стены, если температура в помещении повысится на 30 К.

**7.27.** Стальная балка наглухо закреплена в двух опорах, препятствующих ее удлинению. Площадь поперечного сечения балки 150 см<sup>2</sup>. На сколько кельвин должна повыситься температура балки, чтобы сила ее давления на опору равнялась 1,4 МН?

**7.28.** В металлическом листе имеется круглое отверстие. Как изменится его диаметр в результате нагревания листа?

**7.29.** На сколько увеличится площадь медного листа, если его температуру повысить на 100 К? Размер листа при 273 К равен  $1,2 \times 0,5 \text{ м}$ .

**7.30.** При 0 °С алюминиевая пластинка имеет размер  $150 \times 80 \text{ мм}$ . Вычислить площадь пластинки при температуре 600 °С.

**7.31.** На сколько кельвин повысилась температура медного листа, если площадь его при этом увеличилась на  $680 \text{ мм}^2$ ? Размер листа при  $273 \text{ К}$  равен  $0,80 \times 1,5 \text{ м}$ .

### Объемное тепловое расширение

**7.32.** Латунная гиря при  $0^\circ \text{С}$  имеет объем  $58,82 \text{ см}^3$ . Вычислить ее объем при  $100^\circ \text{С}$ .

**7.33.** При температуре  $0^\circ \text{С}$  бак вмещает  $12 \text{ л}$ , а при  $22^\circ \text{С}$  — на  $1,5 \cdot 10^{-2} \text{ дм}^3$  больше. Из какого материала изготовлен бак?

**7.34.** Вместимость стеклянной банки при  $50^\circ \text{С}$  равна  $3500 \text{ мл}$ . На сколько уменьшится вместимость банки при понижении температуры до  $10^\circ \text{С}$  и какой она будет при  $0^\circ \text{С}$ ?

**7.35.** После нагревания медного шара от  $0$  до  $100^\circ \text{С}$  его объем увеличился на  $21,3 \text{ см}^3$ . Каким был диаметр шара до нагревания?

**7.36.** Стальной брусок при температуре  $453 \text{ К}$  имеет объем  $645 \text{ см}^3$ . Определить массу бруска.

**7.37.** Объем латунной гири, имеющей начальную температуру  $0^\circ \text{С}$ , после нагревания увеличился на  $0,54 \text{ см}^3$ . Сколько теплоты при этом получила гиря?

**7.38.** Для нагревания ртути было израсходовано  $17 \text{ кДж}$  теплоты. На сколько при этом увеличился ее объем? Начальная температура ртути  $273 \text{ К}$ .

**7.39.** Найти плотность сплава инвар при температурах  $40$  и  $-40^\circ \text{С}$ . Плотность инвара при  $0^\circ \text{С}$  равна  $7,900 \cdot 10^3 \text{ кг/м}^3$ .

**7.40.** Железная деталь при  $0^\circ \text{С}$  имеет объем  $3,00 \text{ дм}^3$ . На сколько увеличится ее объем после того, как на нагревание будет израсходовано  $1,62 \text{ МДж}$  теплоты? До какой температуры нагреется деталь?

**7.41.** Вычислить плотность ртути при  $150$  и  $-30^\circ \text{С}$ .

**7.42.** Сколько керосина можно налить в  $20$ -литровую канистру при  $0^\circ \text{С}$ , чтобы с повышением температуры до  $25^\circ \text{С}$  керосин заполнил ее до краев? Расширение канистры не учитывать.

**7.43.** Решить задачу 7.42, если учесть тепловое расширение канистры из алюминия.

**7.44.** Масса нефти, заполнившей бак при  $0^\circ \text{С}$ , равна  $81,6 \text{ кг}$ , а при температуре  $20^\circ \text{С}$  — на  $1,6 \text{ кг}$  меньше. Найти температурный коэффициент расширения нефти. Тепловое расширение бака не учитывать.

**7.45.** В цилиндрическую, вертикально поставленную цистерну налита нефть до уровня  $6,0 \text{ м}$  при температуре  $-10^\circ \text{С}$ . На сколько увеличится уровень нефти в цистерне с повышением температуры до  $20^\circ \text{С}$ ? При какой температуре возникнет опасность переливания нефти через край, если при температуре  $-10^\circ \text{С}$  уровень нефти был ниже края на  $24 \text{ см}$ ?

**7.46.** Уровень электролита в аккумуляторной банке при температуре  $5^\circ \text{С}$  на  $4,0 \text{ мм}$  ниже отверстия в крышке. При какой температуре

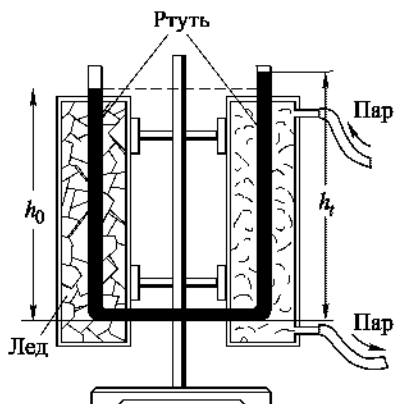
электролит начнет выливаться? Высота банки 300 мм, температурный коэффициент объемного расширения электролита  $4,3 \cdot 10^{-4} \text{ K}^{-1}$ .

**7.47.** Загрузка нефтяного танкера производилась при температуре  $30^\circ\text{C}$ , причем в один из отсеков было налито  $1600 \text{ м}^3$  нефти. На сколько уменьшится объем нефти той же массы при температуре  $-5^\circ\text{C}$ ?

**7.48.** При  $0^\circ\text{C}$  бак вмещает 12,3 кг глицерина, при температуре  $20^\circ\text{C}$  — всего 12,2 кг. Вычислить температурный коэффициент линейного расширения материала, из которого изготовлен бак.

**7.49.** Определить температурный коэффициент объемного расширения жидкости, если известно, что при температуре 273 К стеклянный стакан вмещает 1000 г этой жидкости, а при температуре 423 К — на 22 г меньше.

**7.50.** На рисунке изображен прибор для измерения температурного коэффициента объемного расширения жидкостей. Одно колено U-образной трубки, содержащей испытуемую жидкость, охлаждаются льдом до температуры  $0^\circ\text{C}$ , другое нагревают водяным паром до  $100^\circ\text{C}$ . В одном из опытов высоты столбов жидкости были равны соответственно 250 и 254,5 мм, а в опыте с другой жидкостью — 30 и 33 см. Каковы результаты опытов?



К задаче 7.50

**7.51.** Сколько теплоты сообщили воде, если в результате нагревания ее объем увеличился на  $6,5 \text{ см}^3$ ? Удельную теплоемкость и температурный коэффициент объемного расширения воды принять соответственно  $c = 4200 \text{ Дж}/(\text{кг} \cdot \text{K})$  и  $\beta = 1,5 \cdot 10^{-4} \text{ K}^{-1}$ .

**7.52.** Латунный куб массой 850 г, прикрепленный к нити, опускают в керосин первый раз при температуре  $40^\circ\text{C}$ , второй раз при  $80^\circ\text{C}$ . Вычислить в обоих случаях вес вытесняемой кубом жидкости.

**7.53.** На нагревание ртути было затрачено  $2,5 \text{ кДж}$  теплоты, при этом объем ртути увеличился на 0,009 того объема, который она имела при температуре 273 К. На сколько кельвин повысилась температура ртути и какова ее масса?

**7.54.** Свинцовый шарик массой 200 г, закрепленный на нити, погружен в глицерин при температуре  $20^\circ\text{C}$ . На сколько изменится сила натяжения нити, если температуру глицерина и шарика повысить до  $60^\circ\text{C}$ ?

## Глава II

# ОСНОВЫ ЭЛЕКТРОДИНАМИКИ

### § 8. Взаимодействие электрических зарядов. Закон сохранения заряда. Закон Кулона

**Пример 34.** Два проводящих заряженных шарика, находясь на расстоянии 40 см один от другого, отталкиваются с силой 270 мкН. После того как их привели в соприкосновение и вновь удалили на прежнее расстояние, сила отталкивания между ними стала равна 360 мкН. Считая диаметры шариков одинаковыми и значительно меньшими расстояния между ними, определить заряды на шариках до их соприкосновения. С какой силой будут взаимодействовать шарики после соприкосновения, если вначале их заряды имели противоположные знаки? Среда вакуум.

*Дано:*  $r = 40 \text{ см} = 0,40 \text{ м}$  — расстояние между шариками;  $F_1 = 270 \text{ мкН} = 2,7 \cdot 10^{-4} \text{ Н}$  и  $F_2 = 360 \text{ мкН} = 3,6 \cdot 10^{-4} \text{ Н}$  — силы, с которыми взаимодействуют заряды на шариках до и после соприкосновения. Из таблиц:  $\epsilon_0 = 8,85 \cdot 10^{-12} \text{ Кл}^2/(\text{Н} \cdot \text{м}^2)$  — электрическая постоянная.

*Найти:*  $Q_1$  и  $Q_2$  — первоначальные заряды на шариках;  $F$  — силу взаимодействия после соприкосновения шариков, первоначальные заряды на которых имели противоположные знаки.

**Решение.** Основываясь на законе сохранения электрического заряда, определим заряд  $Q$  каждого шарика после соприкосновения:

$$Q = \frac{1}{2} (Q_1 + Q_2);$$

при соприкосновении шариков одинакового диаметра общий заряд распределяется между ними поровну.

Выражения для сил  $F_1$  и  $F_2$  в зависимости от модуля зарядов и расстояния между ними определяются формулой закона Кулона:

$$F_1 = \frac{1}{4\pi\epsilon_0} \frac{Q_1 Q_2}{r^2}, \quad F_2 = \frac{1}{4\pi\epsilon_0} \frac{(Q_1 + Q_2)^2}{4r^2}.$$

Известно, что

$$\frac{1}{4\pi\epsilon_0} = 9 \cdot 10^9 \text{ Н} \cdot \text{м}^2/\text{Кл}^2,$$

поэтому уравнения для сил примут вид

$$F_1 = 9 \cdot 10^9 \frac{Q_1 Q_2}{r^2}, \quad F_2 = 9 \cdot 10^9 \frac{(Q_1 + Q_2)^2}{4r^2}$$

(для удобства при решении системы уравнений здесь и дальше единицы физических величин опускаем).

После подстановки числовых данных и дальнейших преобразований уравнения примут вид

$$2,7 \cdot 10^{-4} = 9 \cdot 10^9 \frac{Q_1 Q_2}{0,16}, \quad \text{или} \quad 48 \cdot 10^{-16} = Q_1 Q_2,$$

$$3,6 \cdot 10^{-4} = 9 \cdot 10^9 \frac{(Q_1 + Q_2)^2}{4 \cdot 0,16} \quad \text{или} \quad 16 \cdot 10^{-8} = Q_1 + Q_2.$$

Отсюда  $Q_1 = 12 \cdot 10^{-8}$  Кл;  $Q_2 = 4,0 \cdot 10^{-8}$  Кл.

Когда один из шариков имеет отрицательный заряд, например  $Q_2 = -4,0 \cdot 10^{-8}$  Кл, на каждом из них после соприкосновения заряд будет равен

$$Q = \frac{12 \cdot 10^{-8} + (-4,0 \cdot 10^{-8})}{2} = 4,0 \cdot 10^{-8} \text{ [Кл]}.$$

В этом случае сила электрического взаимодействия (отталкивания)

$$F = 9 \cdot 10^9 \frac{(-4,0 \cdot 10^{-8})^2}{0,16} = 9 \cdot 10^{-5} \text{ [Н]} = 90 \text{ мкН}.$$

**Ответ:**  $Q_1 = 120 \text{ нКл}$ ;  $Q_2 = 40 \text{ нКл}$ ;  $F = 90 \text{ мкН}$ .

**8.1.** Необходимо определить знак электрического заряда на изолированном проводнике, имея в распоряжении электроскоп, стеклянную палочку и шелк. Как это сделать?

**8.2.** Можно ли утверждать, что подвешенный на шелковой нити проводящий шарик заряжен отрицательно, если стеклянная палочка с положительным зарядом притягивает его к себе?

**8.3.** Справедливо ли утверждение (см. задачу 8.2), что шарик имеет положительный заряд, если он отталкивается от стеклянной палочки?

**8.4.** Два одинаковых проводящих шарика, имеющих электрические заряды  $+1,8 \cdot 10^{-8}$  и  $-2,0 \cdot 10^{-9}$  Кл, вследствие притяжения на мгновение соприкоснулись. Как распределится заряд между ними?

**8.5.** В алюминиевом шарике массой 270 мг каждый из 100 атомов лишился одного электрона проводимости. Выразить электрический заряд шарика.

**8.6.** Определить заряд, который приобрел бы алюминиевый шарик диаметром 2,0 см при условии потери всех электронов проводимости. Считать, что на каждый атом алюминия приходится один электрон проводимости.

**8.7.** С целью лучшего сцепления ремня со шкивами на производствах применяют канифоль. Почему во взрывоопасных помещениях

ее запрещено применять? С какой целью на предприятиях приводные ремни натирают проводящей пастой, а шкивы заземляют?

**8.8.** Зачем при наполнении автомобильной цистерны бензином цистерну и опоражниваемый сосуд соединяют проводом и заземляют?

**8.9.** С какой целью при промышленном изготовлении пороха его обволакивают графитовым порошком?

**8.10.** Можно ли передать весь заряд с одного проводника на другой изолированный проводник?

**8.11.** Определить поверхностную плотность электрического заряда на проводящем изолированном шаре после сообщения ему заряда  $1,57 \times 10^{-8}$  Кл. Радиус шара 5,0 см.

**8.12.** Какой заряд надо передать проводящему изолированному шару радиусом 8,0 см, чтобы создать на нем поверхностную плотность заряда  $2,5 \cdot 10^{-4}$  Кл/м<sup>2</sup>?

**8.13.** Заряженный проводник, имеющий форму прямоугольного листа, свернули, придав ему цилиндрическую форму. Как изменилась поверхностная плотность электрического заряда на нем?

**8.14.** Чтобы составить представление о заряде в 1 Кл, определить, с какой силой будут взаимодействовать два точечных заряда по 1 Кл в вакууме на расстоянии 1 м? в воде на том же расстоянии?

**8.15.** Два точечных электрических заряда  $6,6 \cdot 10^{-2}$  и 11 мкКл расположены в воде на расстоянии 3,3 см один от другого. Определить силу электрического взаимодействия и расстояние, на котором в вакууме взаимодействие не изменится.

**8.16.** Два точечных заряда, один из которых в три раза больше другого, находясь в вакууме на расстоянии 0,30 м, взаимодействуют с силой 30 Н. Определить эти заряды. На каком расстоянии в воде сила взаимодействия зарядов увеличится в три раза?

**8.17.** Два одинаковых точечных заряда находятся в сосуде со льдом на расстоянии 0,20 м один от другого. Температура льда равна  $-18^\circ\text{C}$ . Когда в сосуде образовалась вода с температурой  $0^\circ\text{C}$ , чтобы сила электрического взаимодействия не изменилась, расстояние между зарядами уменьшили на 16,2 см. Определить диэлектрическую проницаемость льда, если для воды при  $0^\circ\text{C}$  она равна 88.

**8.18.** Определить силу электрического взаимодействия электрона и протона на расстоянии  $1,0 \cdot 10^{-8}$  см один от другого. Во сколько раз она больше гравитационной силы?

**8.19.** Два проводящих шарика пренебрежимо малых размеров получили вместе  $5 \cdot 10^9$  избыточных электронов. Как распределился заряд на шариках, если в вакууме на расстоянии один от другого, равном 3,0 см, они взаимодействуют с силой 1,2 мкН? Сколько избыточных электронов имеет каждый шарик?

**8.20.** Два одинаковых проводящих шарика с зарядами 2 и 4 нКл расположены в вакууме на расстоянии 0,3 м между их центрами. Шарiki приводят в соприкосновение и вновь удаляют на прежнее

расстояние. Какова сила электрического взаимодействия до и после соприкосновения шариков?

**8.21.** Доказать, что при любых модулях одноименных зарядов  $Q_1$  и  $Q_2$  и произвольном  $r$  (см. условие задачи 8.20)  $F_2 > F_1$  ( $F_1$  и  $F_2$  — силы электрического взаимодействия до и после соприкосновения).

**8.22.** Два одинаковых проводящих шарика с зарядами разного знака притягиваются с силой 4,00 мН, когда расстояние между их центрами 30,0 см. После того как они соприкоснулись и вновь разошлись на прежнее расстояние, сила электрического отталкивания стала 2,25 мН. Определить первоначальные заряды на шариках. Массы и размеры шариков ничтожно малы. Среда — вакуум.

**8.23.** Проводящий шарик массой 120 мг подвешен на шелковой нити и имеет заряд 1,2 нКл. Когда под ним на расстоянии 18 см поместили второй заряженный шарик, натяжение нити уменьшилось в два раза. Определить знак и модуль заряда второго шарика. Ускорение свободного падения принять равным  $9,8 \text{ м/с}^2$ .

**8.24.** Тонкая шелковая нить выдерживает натяжение 9,80 мН. Подвешенный на этой нити шарик массой 670 мг имеет заряд  $1,10 \cdot 10^{-8}$  Кл. Снизу в направлении линии подвеса на расстоянии 1,80 см к нему подносят шарик, имеющий заряд противоположного знака. При каком заряде нить может разорваться?

**8.25.** Два точечных электрических заряда 30 и 120 нКл расположены в вакууме на расстоянии 80 см один от другого. Где между ними следует поместить третий заряд 3,2 мкКл, чтобы под действием электрических сил он оставался в равновесии? Нарушится ли равновесие, если заменить третий заряд?

**8.26.** Два точечных электрических заряда 120 и  $-30$  нКл закреплены в вакууме на расстоянии 80 см один от другого. Где на линии, проходящей через эти заряды, должен находиться заряд 3,2 мкКл, чтобы он был в равновесии? Будет ли оно устойчивым?

**8.27.** В точках  $A$  и  $B$ , расстояние между которыми 10 см, находятся два электрических заряда  $5 \cdot 10^{-4}$  и  $-5 \cdot 10^{-4}$  Кл. Какая сила будет действовать на капельку, находящуюся на оси симметрии на расстоянии 5 см от середины отрезка  $AB$ , если заряд капельки равен заряду 10 электронов? Массой капельки пренебречь.

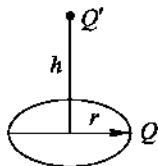
**8.28.** Какое первоначальное ускорение получит капелька (см. задачу 8.27), если ее масса равна  $4,0 \cdot 10^{-7}$  кг ( $g = 10 \text{ м/с}^2$ )?

**8.29.** Два маленьких проводящих шарика одинакового радиуса и массы подвешены в одной точке на шелковых нитях равной длины. После того как шарикам сообщили электрические заряды по  $4,0 \times 10^{-8}$  Кл, нити образовали угол  $60^\circ$ . Найти массу каждого шарика, если расстояние от точки подвеса до центра шарика 20 см. Как поведут себя шарики в условиях невесомости?

**8.30.** Двум водяным капелькам, радиус которых 0,30 мм, сообщили одинаковые по модулю и знаку электрические заряды. Определить

эти заряды, если сила электрического отталкивания уравновешивается силой гравитационного притяжения капель.

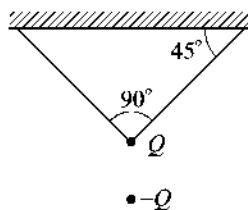
**8.31.** Вокруг точечного электрического заряда  $3,0 \cdot 10^{-9}$  Кл равномерно движется по окружности под действием электрической силы маленький отрицательно заряженный шарик. Чему равно отношение заряда шарика к его массе, если радиус окружности 2,0 см, а угловая скорость движения шарика 3,0 рад/с?



К задаче 8.32

**8.32.** На тонком кольце радиуса  $r$  равномерно распределен заряд  $Q$  (см. рисунок). Определить силу, действующую на точечный заряд  $Q'$ , находящийся на расстоянии  $h$  от центра кольца.

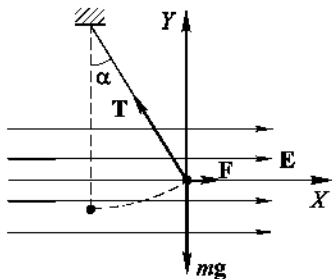
**8.33.** Заряженный шарик массой  $5,88 \times 10^{-4}$  кг подвешен на шелковой нити, как показано на рисунке. На расстоянии 4,2 см по вертикали снизу помещают другой шарик с таким же зарядом противоположного знака. Натяжение нити при этом увеличивается в два раза. Определить заряд шарика и натяжение нити с учетом кулоновского взаимодействия.



К задаче 8.33

## § 9. Электрическое поле

**Пример 35.** Определить напряженность однородного электрического поля (см. рисунок), под действием которого шарик массой 1,2 г с зарядом  $4,9 \cdot 10^{-8}$  Кл, подвешенный на нити, отклоняется так, что нить образует с вертикалью угол  $30^\circ$ .



К примеру 35

*Дано:*  $m = 1,2 \text{ г} = 1,2 \cdot 10^{-3} \text{ кг}$  — масса шарика;  $Q = 4,9 \cdot 10^{-8} \text{ Кл}$  — электрический заряд на шарике;  $\alpha = 30^\circ$  — угол, образованный нитью с вертикалью. Из таблиц:  $g = 9,8 \text{ м/с}^2$  — ускорение свободного падения.

*Найти:*  $E$  — напряженность однородного электрического поля.

*Решение.* На шарик действуют  $mg$  — сила тяжести,  $T$  — сила натяжения нити,  $F = EQ$  — сила, с которой электрическое поле действует на заряд шарика. Запишем условие равновесия шарика в электрическом поле под действием сил:

$$mg + T + F = 0$$

или в проекциях на оси  $X$  и  $Y$ :

$$-T \sin \alpha + F = 0, \quad T \cos \alpha - mg = 0,$$



или

$$T \sin \alpha = EQ, \quad T \cos \alpha = mg.$$

После почленного деления уравнений получим

$$\operatorname{tg} \alpha = \frac{EQ}{mg}.$$

Отсюда

$$E = \frac{mg}{Q} \operatorname{tg} \alpha.$$

Подставив числовые данные из условия, определим

$$E = \frac{1,2 \cdot 10^{-3} \cdot 9,8}{4,9 \cdot 10^{-8}} \cdot 0,5774 \frac{\text{кг} \cdot \text{м}/\text{с}^2}{\text{Кл}} \approx 1,4 \cdot 10^5 \text{ Н/Кл} = 140 \text{ кН/Кл}.$$

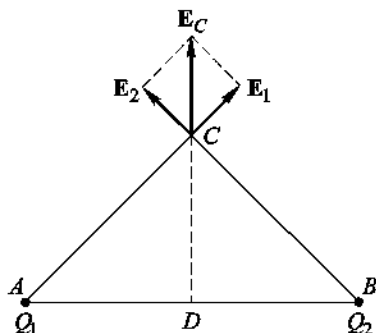
Ответ:  $E = 140 \text{ кН/Кл}$ .

**Пример 36.** В вершинах при основании прямоугольного равнобедренного треугольника расположены точечные электрические заряды  $Q_1$  и  $Q_2$  по 20 нКл (см. рисунок). Расстояние между зарядами 0,60 м. Определить напряженности электрического поля и потенциалы в вершине прямого угла и на пересечении высоты с основанием треугольника. Рассмотреть случаи одноименных и разноименных зарядов.

Дано:  $Q_1 = Q_2 = 20 \text{ нКл} = 2,0 \times 10^{-8} \text{ Кл}$  — электрические заряды;  $AB = l = 0,60 \text{ м}$  — расстояние между зарядами. Из таблиц:  $\epsilon_0 = 8,85 \cdot 10^{-12} \text{ Кл}^2/(\text{Н} \cdot \text{м}^2)$  — электрическая постоянная.

Найти:  $E_C$  и  $E_D$  — напряженности электрического поля в точках  $C$  и  $D$ ;  $\varphi_C$  и  $\varphi_D$  — электрические потенциалы в тех же точках.

Решение. Напряженность электрического поля в заданных точках можно найти из формулы  $E = Q/(4\pi\epsilon_0\epsilon r^2)$ . Если поле образовано несколькими зарядами, то результирующая напряженность будет равна геометрической сумме напряженностей, создаваемых отдельными зарядами. Потенциал электрического поля каждого заряда в отдельности определится формулой  $\varphi = Q/(4\pi\epsilon_0\epsilon r)$ , а потенциал суммарного поля будет равен алгебраической сумме потенциалов  $\varphi_1$  и  $\varphi_2$ , созданных в заданной точке зарядами  $Q_1$  и  $Q_2$ . Расстояния от зарядов до точки  $C$  одинаковы и равны  $r = l/\sqrt{2}$ ; поэтому



К примеру 36

$$E_1 = E_2 = \frac{2Q_1}{4\pi\epsilon_0\epsilon l^2}, \quad E_C = \sqrt{2} E_1.$$

Задача решается в применении к вакууму, для которого  $\varepsilon = 1$ . Подставляя числовые значения, получаем

$$E_C = \sqrt{2} \cdot \frac{2 \cdot 2,0 \cdot 10^{-8}}{4 \cdot 3,14 \cdot 8,85 \cdot 10^{-12} \cdot 1 \cdot 0,36} \frac{\text{Кл}}{\text{Кл}^2/(\text{Н} \cdot \text{м}^2) \cdot \text{м}^2} \approx 1,4 \text{ кН/Кл}.$$

Вектор результирующей напряженности в точке  $C$  направлен вертикально вверх для одноименных зарядов и горизонтально, если заряды разноименные; абсолютное значение напряженности в обоих случаях одинаково.

Потенциал в точке  $C$ , создаваемый каждым зарядом, равен

$$\begin{aligned} \varphi_1 = \varphi_2 &= \frac{2,0 \cdot 10^{-8} \cdot \sqrt{2}}{4 \cdot 3,14 \cdot 8,85 \cdot 10^{-12} \cdot 1 \cdot 0,60} \frac{\text{Кл}}{\text{Кл}^2/(\text{Н} \cdot \text{м}^2) \cdot \text{м}} \approx \\ &\approx 420 \frac{\text{Н} \cdot \text{м}}{\text{Кл}} \approx 420 \text{ В}. \end{aligned}$$

Потенциал результирующего поля, образованного двумя зарядами в точке  $C$ , определится как алгебраическая сумма потенциалов  $\varphi_1$  и  $\varphi_2$ , т. е.

$$\varphi_C = \varphi_1 + \varphi_2 \approx 840 \text{ В}.$$

Если заряды разноименные, то  $\varphi_C = 0$ .

Поскольку точка  $D$  расположена посередине отрезка  $AB$ , соединяющего заряды, векторы напряженности  $\mathbf{E}_1$  и  $\mathbf{E}_2$  равны по модулю:

$$\begin{aligned} E_1 = E_2 &= \frac{Q_1}{4\pi\varepsilon_0\varepsilon(l/2)^2} = \frac{2,0 \cdot 10^{-8} \cdot 4}{4 \cdot 3,14 \cdot 8,85 \cdot 10^{-12} \cdot 1 \cdot 0,36} \frac{\text{Кл}}{\text{Кл}^2/(\text{Н} \cdot \text{м}^2) \cdot \text{м}^2} \approx \\ &\approx 2,0 \text{ кН/Кл}. \end{aligned}$$

В случае одноименных зарядов искомая напряженность  $E_D = 0$ , так как векторы  $\mathbf{E}_1$  и  $\mathbf{E}_2$  направлены в противоположные стороны; в случае разноименных зарядов напряженность  $E_D = 4,0 \text{ кН/Кл}$  и направлена в сторону отрицательного заряда.

Потенциал в точке  $D$  равен

$$\begin{aligned} \varphi_D = 2\varphi_1 &= 2 \cdot \frac{2,0 \cdot 10^{-8}}{4 \cdot 3,14 \cdot 8,85 \cdot 10^{-12} \cdot 0,3} \frac{\text{Кл}}{\text{Кл}^2/(\text{Н} \cdot \text{м}^2) \cdot \text{м}} = \\ &= 1,2 \frac{\text{Н} \cdot \text{м}}{\text{Кл}} = 1,2 \text{ кВ}. \end{aligned}$$

В случае разноименных зарядов  $\varphi_D = 0$ .

**Ответ:** Искомые напряженность и потенциал в точке  $C$  для одноименных зарядов равны  $1,4 \text{ кН/Кл}$  и  $840 \text{ В}$ ; в случае разноименных зарядов меняется направление вектора напряженности, а потенциал равняется нулю. В точке  $D$  соответствующие значения напряженности равны  $0$  и  $4,0 \text{ кН/Кл}$ , потенциала —  $1,2 \text{ кВ}$  и  $0$ .

**Пример 37.** Определить, до какого потенциала заряжен проводящий уединенный шар, если в точках, удаленных от его поверхности в вакууме на  $5,00$  и  $10,0 \text{ см}$ , потенциалы равны соответственно  $300$  и  $210 \text{ В}$ .

*Дано:*  $r_1 = 5,00 \cdot 10^{-2}$  м,  $r_2 = 0,100$  м — расстояния от поверхности шара до точек с известными потенциалами;  $\varphi_1 = 300$  В,  $\varphi_2 = 210$  В — потенциалы двух точек электрического поля, образованного заряженным шаром.

*Найти:*  $\varphi_{\text{ш}}$  — потенциал заряженного шара.

*Решение.* Потенциал  $\varphi_{\text{ш}}$ , до которого заряжен шар в вакууме, определяется из формулы

$$\varphi_{\text{ш}} = \frac{Q}{4\pi\epsilon_0 R},$$

где  $R$  — радиус шара.

Для нахождения заряда предположим, что он сосредоточен в центре шара (электрическое поле заряженной сферы начинается у ее поверхности и совпадает с полем заряда, помещенного в центре сферы). Поэтому

$$\varphi_1 = \frac{Q}{4\pi\epsilon_0(R + r_1)}, \quad \varphi_2 = \frac{Q}{4\pi\epsilon_0(R + r_2)}.$$

Определим заряд шара:

$$Q = \varphi_1 \cdot 4\pi\epsilon_0(R + r_1), \quad Q = \varphi_2 \cdot 4\pi\epsilon_0(R + r_2).$$

Решив систему полученных уравнений относительно  $R$ , найдем выражение для радиуса шара:

$$R = \frac{\varphi_2 r_2 - \varphi_1 r_1}{\varphi_1 - \varphi_2}.$$

В формулу для потенциала заряженного шара подставим выражения для  $Q$  и  $R$  и после преобразований определим

$$\varphi_{\text{ш}} = \varphi_1 \varphi_2 \frac{r_2 - r_1}{\varphi_2 r_2 - \varphi_1 r_1}.$$

Подставляя числовые значения и производя вычисления, получаем

$$\varphi_{\text{ш}} = 300 \cdot 210 \cdot \frac{0,100 - 0,050}{210 \cdot 0,100 - 300 \cdot 0,050} \frac{\text{Кл}}{\text{Кл}^2/(\text{Н} \cdot \text{м}^2) \cdot \text{м}} = 525 \text{ В}.$$

*Ответ:*  $\varphi_{\text{ш}} = 525$  В.

**Пример 38.** Электрическое поле образовано в вакууме двумя точечными зарядами  $Q_1 = 40$  и  $Q_2 = -5,0$  нКл (см. рисунок). Расстояние между зарядами  $l = 30$  см. Определить разность потенциалов в точках  $A$  и  $B$  и работу, совершенную электрическим полем по перемещению пробного заряда  $Q_3 = 5,0$  нКл из точки  $A$  в точку  $B$  по дуге окружности радиусом  $0,40$  м.

*Дано:*  $Q_1 = 4,0 \cdot 10^{-8}$  Кл;  $Q_2 = -0,50 \cdot 10^{-8}$  Кл — электрические заряды;  $l = 0,30$  м — расстояние между зарядами  $Q_1$  и  $Q_2$ ;  $Q_3 = 5,0 \times 10^{-9}$  Кл — пробный заряд;  $r = 0,40$  м — радиус дуги  $AB$ . Из таблиц:  $\epsilon_0 = 8,85 \cdot 10^{-12}$  Кл<sup>2</sup>/(Н · м<sup>2</sup>) — электрическая постоянная.

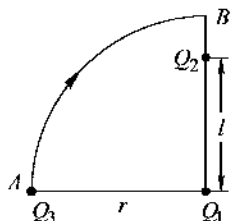
*Найти:*  $\Delta\varphi$  — разность электрических потенциалов в точках  $A$  и  $B$ ;  $A$  — работу, совершенную полем по перемещению пробного заряда  $Q_3$  из точки  $A$  в точку  $B$ .

**Решение.** Для решения задачи необходимо воспользоваться принципом независимости действия электрических полей. Точки  $A$  и  $B$  равноудалены от заряда  $Q_1$ . Поэтому образованный зарядом потенциал в этих точках будет

$$\varphi_1 = \frac{Q_1}{4\pi\epsilon_0 r}.$$

Заряд  $Q_2$  в тех же точках образует потенциалы

$$\varphi_2 = \frac{Q_2}{4\pi\epsilon_0 \sqrt{r^2 + l^2}}, \quad \varphi'_2 = \frac{Q_2}{4\pi\epsilon_0 (r - l)}.$$



К примеру 38

циалов двух полей:

$$\varphi_A = \varphi_1 + \varphi_2, \quad \varphi_B = \varphi_1 + \varphi'_2.$$

Тогда разность потенциалов

$$\Delta\varphi = \varphi_A - \varphi_B = \varphi_2 - \varphi'_2 = \frac{Q_2}{4\pi\epsilon_0} \left( \frac{1}{\sqrt{r^2 + l^2}} - \frac{1}{r - l} \right).$$

Подставляя числовые значения и производя вычисления, получаем

$$\Delta\varphi = \frac{-0,50 \cdot 10^{-8}}{4 \cdot 3,14 \cdot 8,85 \cdot 10^{-12}} \left( \frac{1}{0,50} - \frac{1}{0,10} \right) \frac{\text{Кл}}{\text{Кл}^2/(\text{Н} \cdot \text{м}^2) \cdot \text{м}} \approx \approx 360 \frac{\text{Н} \cdot \text{м}}{\text{Кл}} \approx 360 \text{ В}.$$

Для перемещения в электрическом поле пробного заряда  $Q_3$  будет совершена работа

$$A = Q_3 \Delta\varphi = 5,0 \cdot 10^{-9} \cdot 360 \text{ Кл} \cdot \text{В} = 1,8 \cdot 10^{-6} \text{ Дж} = 1,8 \text{ мкДж}.$$

**Ответ:**  $\Delta\varphi \approx 360 \text{ В}$ ;  $A = 1,8 \text{ мкДж}$ .

**Пример 39.** Протон летит по направлению к неподвижному ядру атома гелия. На достаточно большом удалении от последнего скорость протона составляет  $2,0 \cdot 10^8 \text{ км/с}$ . Определить наименьшее расстояние, на которое сможет приблизиться протон к ядру атома гелия ( $\alpha$ -частице). Заряды частиц считать точечными.

**Дано:**  $v_p = 2,0 \cdot 10^6 \text{ м/с}$  — скорость протона. Из таблиц:  $e_p = 1,6 \times 10^{-19} \text{ Кл}$  — заряд протона,  $m_p = 1,67 \cdot 10^{-27} \text{ кг}$  — масса протона,  $Q_\alpha = 2 \cdot 1,6 \cdot 10^{-19} \text{ Кл}$  — заряд ядра атома гелия ( $\alpha$ -частицы),  $\epsilon_0 = 8,85 \cdot 10^{-12} \text{ Кл}^2/(\text{Н} \cdot \text{м}^2)$  — электрическая постоянная,  $\epsilon = 1$  — диэлектрическая проницаемость среды.

**Найти:**  $r$  — наименьшее расстояние сближения протона с  $\alpha$ -частицей.

**Решение.** При решении задачи используем закон сохранения энергии. Полная энергия, которой обладает протон,  $W = P + K$ , где  $P$  — потенциальная, а  $K$  — кинетическая энергия. На большом удале-

нии от ядра атома гелия потенциальную энергию протона условимся считать равной нулю. Тогда энергия, которой обладает протон, определится формулой

$$K = \frac{m_p v_p^2}{2}.$$

С приближением к ядру атома гелия скорость, а следовательно, и кинетическая энергия будут убывать, и на расстоянии  $r$  вся кинетическая энергия протона перейдет в потенциальную энергию взаимодействия частиц

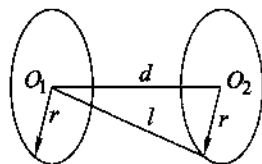
$$\frac{m_p v_p^2}{2} = e_p \varphi, \quad \text{где} \quad \varphi = \frac{Q_\alpha}{4\pi\epsilon_0 \epsilon r}.$$

С учетом того, что  $Q_\alpha = 2e_p$ , получим

$$\begin{aligned} r &= \frac{4e_p^2}{4m_p v_p^2 \pi \epsilon_0 \epsilon} = \\ &= \frac{4 \cdot 1,6 \cdot 1,6 \cdot 10^{-38}}{1,67 \cdot 10^{-27} \cdot 4,0 \cdot 10^{12} \cdot 4 \cdot 3,14 \cdot 8,85 \cdot 10^{-12} \cdot 1} \frac{\text{Кл}^2}{\text{кг} \cdot (\text{м/с})^2 \cdot \text{Кл}^2 / (\text{Н} \cdot \text{м}^2)} = \\ &= 1,4 \cdot 10^{-13} \frac{\text{Н} \cdot \text{м}}{\text{кг} \cdot \text{м/с}^2} = 1,4 \cdot 10^{-13} \text{ м}. \end{aligned}$$

Ответ:  $r = 1,4 \cdot 10^{-13} \text{ м}$ .

**Пример 40.** Два параллельных тонких кольца, радиусы которых одинаковы и равны 5,0 см, имеют в вакууме общую ось  $O_1O_2$  (см. рисунок). Расстояние между их центрами 12 см. На первом кольце равномерно распределен электрический заряд 0,82 мкКл, а на втором — 0,60 мкКл. Какая работа совершается при перемещении пробного заряда 3,0 нКл из центра одного кольца в центр другого?



К примеру 40

Дано:  $r_1 = r_2 = r = 5,0 \cdot 10^{-2} \text{ м}$  — радиусы колец;  $d = 0,12 \text{ м}$  — расстояние между центрами колец;  $Q_1 = 8,2 \cdot 10^{-7} \text{ Кл}$  — заряд на первом кольце;  $Q_2 = 6,0 \cdot 10^{-7} \text{ Кл}$  — заряд на втором кольце;  $q = 3,0 \cdot 10^{-9} \text{ Кл}$  — пробный заряд, перемещаемый в электрическом поле. Из таблиц:  $\epsilon_0 = 8,85 \cdot 10^{-12} \text{ Кл}^2 / (\text{Н} \cdot \text{м}^2)$  — электрическая постоянная.

Найти:  $A$  — работу, совершаемую при перемещении электрического заряда между центрами заряженных колец.

Решение. Электрические заряды, находящиеся на кольцах, нельзя считать точечными; поэтому непосредственно нельзя использовать для вычисления потенциала в вакууме формулу  $\varphi = \frac{Q}{4\pi\epsilon_0 r}$ , справедливую для точечных зарядов. Так как работа при перемещении заряда зависит от разности потенциалов точек начала и конца перемещения (в нашем случае это центры колец), для решения задачи необходимо вычислить потенциалы этих точек  $\varphi_{O_1}$  и  $\varphi_{O_2}$ .

Условно разделим каждое из колец на  $n$  равных частей, и тогда заряд каждой части можно считать точечным:

$$Q'_1 = \frac{Q_1}{n}, \quad Q'_2 = \frac{Q_2}{n}.$$

Потенциал, образованный точечным зарядом  $Q'_1$  в центре первого кольца,

$$\varphi'_1 = \frac{Q'_1}{4\pi\epsilon_0 r}.$$

Весь заряд  $Q_1$ , распределенный на первом кольце, образует потенциал в его центре  $\varphi_1$ , равный алгебраической сумме потенциалов от  $n$  точечных зарядов, или

$$\varphi_1 = \varphi'_1 n = \frac{Q'_1}{4\pi\epsilon_0 r} n = \frac{Q_1}{4\pi\epsilon_0 r}.$$

Рассуждая подобным образом, находим потенциал в точке  $O_1$ , образованный зарядом  $Q_2$ , причем учтем, что  $l = \sqrt{d^2 + r^2}$ :

$$\varphi_2 = \frac{Q'_2 n}{4\pi\epsilon_0 \sqrt{d^2 + r^2}} = \frac{Q_2}{4\pi\epsilon_0 \sqrt{d^2 + r^2}}.$$

Потенциал электрического поля в центре первого кольца  $\varphi_{O_1}$ , образованный зарядами  $Q_1$  и  $Q_2$ , будет равен

$$\varphi_{O_1} = \varphi_1 + \varphi_2,$$

или

$$\varphi_{O_1} = \frac{Q_1}{4\pi\epsilon_0 r} + \frac{Q_2}{4\pi\epsilon_0 \sqrt{d^2 + r^2}}.$$

Повторяя все рассуждения, находим выражение для потенциала в центре второго кольца  $\varphi_{O_2}$ :

$$\varphi_{O_2} = \frac{Q_2}{4\pi\epsilon_0 r} + \frac{Q_1}{4\pi\epsilon_0 \sqrt{d^2 + r^2}}.$$

Работу, совершаемую при перемещении заряда  $Q$  из точки  $O_1$  в точку  $O_2$ , определим по формуле

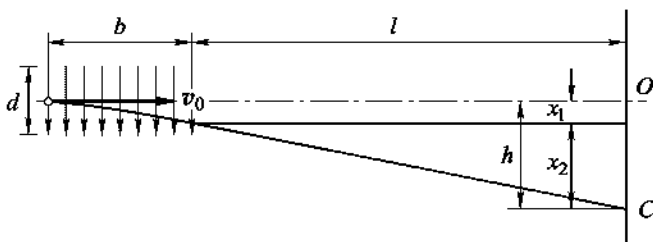
$$A = Q(\varphi_{O_1} - \varphi_{O_2}).$$

Подставляя в эту формулу значения  $\varphi_{O_1}$  и  $\varphi_{O_2}$ , получаем

$$\begin{aligned} A &= Q \left( \frac{Q_1}{4\pi\epsilon_0 r} + \frac{Q_2}{4\pi\epsilon_0 \sqrt{d^2 + r^2}} - \frac{Q_2}{4\pi\epsilon_0 r} - \frac{Q_1}{4\pi\epsilon_0 \sqrt{d^2 + r^2}} \right) = \\ &= Q \frac{Q_1 - Q_2}{4\pi\epsilon_0} \left( \frac{1}{r} - \frac{1}{\sqrt{d^2 + r^2}} \right) = 3,0 \cdot 10^{-9} \cdot \frac{2,2 \cdot 10^{-7}}{4 \cdot 3,14 \cdot 8,85 \cdot 10^{-12}} \times \\ &\times \left( \frac{1}{5,0 \cdot 10^{-2}} - \frac{1}{\sqrt{1,44 \cdot 10^{-2} + 0,25 \cdot 10^{-2}}} \right) \frac{\text{Кл}^2}{\text{Кл}^2/(\text{Н} \cdot \text{м}^2) \cdot \text{м}} \approx \\ &\approx 7,3 \cdot 10^{-5} \text{ Дж}. \end{aligned}$$

Ответ:  $A \approx 73 \text{ мкДж}$ .

**Пример 41.** Протоны, имеющие скорость 95 км/с, влетают в плоский конденсатор так, что их расстояние от пластин одинаково, а скорость направлена параллельно пластинам. При напряжении на пластинах конденсатора 14 В протоны смещаются и попадают в точку  $C$  экрана (см. рисунок). Определить смещение  $OC$  протонов, если расстояние между пластинами конденсатора  $d = 2,4$  см, длина пластин  $b = 6,2$  см и расстояние от конденсатора до экрана  $l = 45$  см. Движение протонов происходит в вакууме. Действием силы тяжести пренебречь.



К примеру 41

*Дано:*  $U = 14$  В — напряжение на обкладках конденсатора;  $d = 2,4 \cdot 10^{-2}$  м — расстояние между пластинами конденсатора;  $b = 6,2 \cdot 10^{-2}$  м — длина пластин конденсатора;  $l = 0,45$  м — расстояние от конденсатора до экрана;  $v_0 = 9,5 \cdot 10^4$  м/с — начальная скорость протонов. Из таблиц:  $m_p = 1,67 \cdot 10^{-27}$  кг — масса протона,  $Q = e_p = 1,6 \cdot 10^{-19}$  Кл — заряд протона.

*Найти:*  $h$  — смещение протона на экране под действием электрического поля.

**Решение.** Смещение  $h = OC$  можно найти как сумму смещений  $x_1$  и  $x_2$ , где  $x_1$  — смещение протона внутри конденсатора, которое происходит под действием электрической силы  $\mathbf{F} = Q\mathbf{E}$ , а  $x_2$  — смещение при движении протона по инерции вне поля (нарушением однородности поля у края конденсатора мы пренебрегаем). Поскольку сила  $\mathbf{F}$  действует перпендикулярно вектору скорости  $\mathbf{v}_0$ , можно считать, что горизонтальная составляющая вектора скорости движения протона остается постоянной и равной  $v_0$ . Следовательно, время движения протона внутри конденсатора можно определить из соотношения  $t_1 = b/v_0$ . Равномерно ускоренное движение протона в электрическом поле в вертикальном направлении происходит в течение времени  $t_1$ , т. е.

$$x_1 = \frac{1}{2} a t_1^2.$$

Ускорение можно найти из второго закона Ньютона:

$$a = \frac{F}{m_p} = \frac{QE}{m_p}.$$

Нужную для решения напряженность электрического поля определим из формулы  $E = U/d$ .

Вертикальная составляющая скорости протона  $v_b$  в момент вылета его из конденсатора будет  $v_b = at_1$ , а в дальнейшем останется постоянной. Поэтому

$$x_2 = v_b t_2$$

( $t_2$  — время движения протона вне конденсатора, определяемое соотношением  $t_2 = l/v_0$ ).

Смещение протона внутри конденсатора

$$\begin{aligned} x_1 &= \frac{at_1^2}{2} = \frac{Fb^2}{2m_p v_0^2} = \frac{UQb^2}{2dm_p v_0^2} = \\ &= \frac{14 \cdot 1,6 \cdot 10^{-19} \cdot (6,2)^2 \cdot 10^{-4}}{2 \cdot 2,4 \cdot 10^{-2} \cdot 1,67 \cdot 10^{-27} \cdot (9,5)^2 \cdot 10^8} \frac{\text{В} \cdot \text{Кл} \cdot \text{м} \cdot \text{м}}{\text{м} \cdot \text{кг} \cdot \text{м}^2/\text{с}^2} \approx 0,012 \text{ м}. \end{aligned}$$

Смещение протона вне конденсатора

$$\begin{aligned} x_2 &= v_b t_2 = at_1 \frac{l}{v_0} = \frac{Fbl}{m_p v_0 v_0} = \frac{EQbl}{m_p v_0^2} = \frac{UQbl}{dm_p v_0^2} = \\ &= \frac{14 \cdot 1,6 \cdot 10^{-19} \cdot 6,2 \cdot 10^{-2} \cdot 0,45}{2,4 \cdot 10^{-2} \cdot 1,67 \cdot 10^{-27} \cdot (9,5)^2 \cdot 10^8} \frac{\text{В} \cdot \text{Кл} \cdot \text{м} \cdot \text{м}}{\text{м} \cdot \text{кг} \cdot \text{м}^2/\text{с}^2} = \\ &= 0,172 \frac{\text{В} \cdot \text{Кл} \cdot \text{м}}{\text{кг} \cdot \text{м}/\text{с}^2 \cdot \text{м}} = 0,172 \text{ м}. \end{aligned}$$

Теперь определим  $h$ :

$$h = x_1 + x_2 = 1,2 \text{ см} + 17,2 \text{ см} = 18,4 \text{ см}.$$

Ответ:  $h = 18,4 \text{ см}$ .

## Напряженность электрического поля

**9.1.** В каком случае напряженность электрического поля в какой-либо точке и сила, действующая на пробный заряд в той же точке, будут иметь противоположные знаки?

**9.2.** Электростатические фильтры, применяемые в тепловых электростанциях и других предприятиях для улавливания твердых частиц дыма, представляют собой металлические трубы с протянутой по оси трубы проволокой. Как действует такой фильтр?

**9.3.** При электростатическом способе окраски, применяемом на автомобильных заводах, окрашиваемые детали проходят под электродом в виде металлической сетки, соединенным с одним полюсом источника высокого напряжения. Через сетку-электрод подается распыленная краска. При каком условии капельки краски будут двигаться только к деталям?

**9.4.** Нарисуйте линии напряженности электрического поля, образованного двумя точечными разноименными зарядами неодинаковой величины.

**9.5.** На примере проводников, имеющих форму шара, показать зависимость между напряженностью и поверхностной плотностью заряда.



**9.6.** При сильной электризации проводника вблизи его острых концов образуется «электрический ветер», который можно обнаружить по отклонению пламени свечи. Как это объяснить?

**9.7.** Внутри полой проводящей незаряженной сферы поместили шарик с положительным зарядом. Будут ли существовать электрические поля внутри и вне сферы? Где и какие заряды возникнут? Что произойдет, если шарик с зарядом перемешать внутри сферы? если не трогать шарик, а снаружи к сфере поднести заряженное тело?

**9.8.** Что положено в основу устройства электростатической защиты? С какой целью на корпус некоторых радиоламп надевают металлические колпачки?

**9.9.** На пробный электрический заряд  $0,40 \text{ мкКл}$ , находящийся в вакууме, в некоторой точке электрического поля, действует сила  $30 \text{ мН}$ . Определить напряженность поля в этой точке и создающий поле заряд, удаленный от нее на расстояние  $0,60 \text{ м}$ .

**9.10.** Электрическое поле образовано в вакууме точечным зарядом  $6,0 \text{ мкКл}$ . Найти напряженность поля в точке, удаленной от заряда на расстояние  $0,30 \text{ м}$ . На сколько дальше от заряда отстоит точка, напряженность в которой в два раза меньше?

**9.11.** Электрическое поле образовано в вакууме точечным зарядом. Какой будет напряженность поля в точках, удаленных от заряда на  $0,12 \text{ м}$ , если на расстояниях  $3,0 \cdot 10^{-2} \text{ м}$  она равна  $5,52 \text{ МН/Кл}$ ? Какую форму имеет поверхность, на которой модули напряженности в любых точках одинаковы?

**9.12.** Электрическое поле образовано точечным зарядом  $24 \text{ нКл}$ . Определить, на каком расстоянии от него расположена точка, в которой напряженность поля равна  $15 \text{ кН/Кл}$ . С какой силой в этой точке действует поле на пробный заряд  $1,8 \text{ нКл}$ ?

**9.13.** В некоторой среде на расстоянии  $5,0 \text{ см}$  от точечного заряда  $0,45 \text{ мкКл}$  напряженность поля равна  $20 \text{ кН/Кл}$ . Определить диэлектрическую проницаемость среды и назвать среду.

**9.14.** Какова диэлектрическая проницаемость глицерина, если точечный электрический заряд  $0,14 \text{ мкКл}$ , находящийся в нем, создает электрическое поле, напряженность которого на расстоянии  $7,0 \text{ см}$   $6,6 \text{ кН/Кл}$ ? Каким должен быть заряд, чтобы на прежнем расстоянии в среде с диэлектрической проницаемостью, равной 2, напряженность поля уменьшилась в два раза?

**9.15.** Поверхностная плотность электрического заряда на полой проводящем шаре радиусом  $12,0 \text{ см}$  равна  $3,45 \cdot 10^{-7} \text{ Кл/м}^2$ . Какова напряженность поля в центре шара, на расстоянии от центра, равном половине радиуса и на расстоянии  $12,0 \text{ см}$  от поверхности шара?

**9.16.** Проводящий заряженный шарик диаметром  $0,12 \text{ м}$  помещен в жидкую среду с диэлектрической проницаемостью, равной 2. Определить поверхностную плотность электрического заряда на шарике, если на расстоянии  $12 \text{ см}$  от его поверхности напряженность поля составляет  $160 \text{ В/м}$ .

**9.17.** Построить график, выражающий зависимость напряженности электрического поля точечного заряда от расстояния до него, и график поля, образованного проводящим заряженным шаром радиусом  $R$ .

**9.18.** По теории Бора электрон в атоме водорода движется вокруг ядра по круговой орбите. Определить напряженность поля, создаваемого зарядом ядра на расстоянии, равном радиусу первой орбиты электрона, т.е.  $5,3 \cdot 10^{-11}$  м, и скорость движения электрона по этой орбите вокруг ядра.

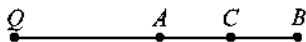
**9.19.** Как с помощью заряженной эбонитовой палочки зарядить два проводника равными по модулю, но противоположными по знаку зарядами?

**9.20.** Останется ли электрическое поле однородным после того, как в него будет помещен металлический шар?

**9.21.** Три равных одноименных заряда  $Q$  поместили в вершинах равностороннего треугольника со стороной, равной  $a$ . Определить напряженность поля в центре треугольника. Какой будет напряженность в этой точке, если один заряд будет иметь другой знак?

**9.22.** Два равных одноименных заряда расположены на расстоянии  $l$  один от другого. Чему будет равна напряженность суммарного поля в средней точке отрезка, соединяющего заряды? На сколько изменится напряженность при наличии разноименных зарядов?

**9.23.** В двух противоположных вершинах квадрата со стороной 30 см находятся заряды по 0,30 мкКл. Определить напряженность поля в двух других вершинах. Что изменится, если знак у одного заряда поменять?



К задаче 9.24

**9.24.** В точках  $A$  и  $B$ , расстояние между которыми 0,30 м (см. рисунок), напряженность электрического поля точечного

заряда соответственно 4,0 и 1,0 кН/Кл. Определить заряд, образующий поле, и напряженность в точке  $C$ , расположенной посередине отрезка  $AB$ .

**9.25.** Заряженный металлический шарик, подвешенный на шелковой нити, поместили в однородное горизонтальное электрическое поле напряженностью  $5,0 \cdot 10^6$  В/м. Какой угол с вертикалью образует нить, если масса шарика 20 г, а его заряд 20 нКл? Ускорение свободного падения принять равным  $10 \text{ м/с}^2$ .

**9.26.** Подвешенный на шелковой нити бузиновый шарик массой 0,40 г поместили в однородное горизонтальное электрическое поле напряженностью 160 кВ/м. Какой заряд необходимо передать шарiku, чтобы нить с вертикалью образовала угол  $11^\circ$ ?

**9.27.** В однородном электрическом поле в вакууме находится пылинка массой  $40,0 \cdot 10^{-8}$  г, обладающая зарядом  $-1,6 \cdot 10^{-11}$  Кл. Определить напряженность электрического поля (модуль и направление), при которой пылинка остается в покое.

**9.28.** Заряженная сферическая капля ртути радиусом 0,20 мм находится в равновесии в однородном электрическом поле напряженностью 12 кВ/м. Определить заряд капли.

**9.29.** Какое первоначальное ускорение под действием электрического поля, образованного зарядом  $2,0 \cdot 10^{-6}$  Кл, получит капля массой 0,016 мг, потерявшая 100 электронов? Заряд удален от капли на расстояние 3,0 см.

**9.30.** На сколько изменится ускорение тела, падающего на землю, если ему сообщить заряд  $+4,0 \cdot 10^{-8}$  Кл? Масса тела 5,0 г; напряженность поля у поверхности Земли равна 100 В/м и направлена к ее центру.

**9.31.** Известно, что внутри проводника при равновесии зарядов, находящихся на его поверхности, электрическое поле отсутствует. Однако если проводник движется с ускорением, то в нем возникает электрическое поле. С каким ускорением должен двигаться металлический стержень, чтобы напряженность возникающего в нем однородного поля была равна 1,0 мкВ/м? Движение электрона происходит в вакууме.

**9.32.** Электрон, обладающий скоростью 18 км/с, влетает в однородное электрическое поле напряженностью 3,0 мВ/м и движется против линий напряженности. С каким ускорением движется электрон и какова будет его скорость, когда он пройдет расстояние 7,1 см? Сколько времени потребуется для достижения этой скорости? Движение электрона происходит в вакууме.

**9.33.** Электрон, попадая в однородное электрическое поле, движется в нем по направлению линий напряженности. Через сколько времени скорость электрона станет равной нулю, если напряженность поля составляет 90 В/м, а начальная скорость электрона  $1,8 \cdot 10^3$  км/с? Движение электрона происходит в вакууме.

**9.34.** Какой должна быть напряженность однородного электрического поля в вакууме, чтобы находящийся в нем покоящийся электрон получил ускорение  $2,0 \cdot 10^{12}$  м/с<sup>2</sup>? Через сколько времени электрон приобретет скорость  $5,0 \cdot 10^6$  м/с?

**9.35.** Двукратно ионизованный атом гелия ( $\alpha$ -частица) движется со скоростью  $1,6 \cdot 10^7$  м/с в направлении к неподвижному ядру урана. На какое наименьшее расстояние может он приблизиться к ядру урана? Заряды считать точечными. Различие в массах протона и нейтрона не учитывать.

**9.36.** Равномерно заряженная бесконечная плоскость образует однородное электрическое поле, напряженность которого определяется по формуле  $E = \sigma / (2\epsilon_0\epsilon)$ . Определить силу, действующую на заряд 0,15 нКл, помещенный в поле плоскости, если поверхностная плотность заряда на ней  $\sigma = 20$  мкКл/м<sup>2</sup> и  $\epsilon = 1$ .

**9.37.** Поле равномерно заряженной плоскости действует в вакууме на заряд 0,2 нКл с силой  $2,26 \cdot 10^{-5}$  Н. Определить напряженность электрического поля и поверхностную плотность заряда на пластине.

**9.38.** Используя формулу напряженности для бесконечной, равномерно заряженной плоскости (см. задачу 9.36), получить выражение для напряженности электрического поля между двумя параллельными, разноименно заряженными плоскостями с одинаковой поверхностной плотностью заряда.

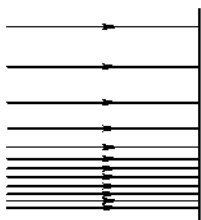
**9.39.** Две бесконечные параллельные пластины несут равномерно распределенные по поверхности электрические заряды. Определить напряженность электрического поля между пластинами и вне пластин. Поверхностная плотность заряда на пластинах равна соответственно  $40$  и  $-10 \text{ нКл/м}^2$ .

**9.40.** Проводящая плоскость площадью  $200 \text{ см}^2$  несет на себе равномерно распределенный электрический заряд  $0,20 \text{ мКл}$ . С какой силой будут притягиваться две такие плоскости, расположенные параллельно друг другу, если заряды на них будут иметь противоположные знаки?

### Работа по перемещению заряда в электрическом поле.

#### Электрический потенциал. Разность потенциалов

**9.41.** Какое поле называется потенциальным? Привести примеры потенциальных полей.



К задаче 9.42

**9.42.** Может ли существовать электростатическое поле, изображенное на рисунке?

**9.43.** В однородном электрическом поле перемещается заряд  $+65 \text{ нКл}$  так, что вектор перемещения с направлением линий напряженности образует угол  $60^\circ$ . Напряженность поля равна  $12 \text{ кВ/м}$ , модуль перемещения составляет  $20 \text{ см}$ . Найти работу, совершаемую полем, и изменение потенциальной энергии заряда в электрическом поле. Какими будут ответы для отрицательного заряда?

**9.44.** При перемещении электрического заряда  $120 \text{ мКл}$ , находившегося вне поля, в какую-то его точку была совершена работа, равная  $6,0 \cdot 10^{-4} \text{ Дж}$ . Найти электрический потенциал поля в этой точке.

**9.45.** Уединенный проводящий шар радиусом  $3,0 \text{ см}$  находится в вакууме. До какого потенциала зарядится шар, получив заряд  $20 \text{ нКл}$ ?

**9.46.** Сколько электронов следует передать в вакууме уединенному проводящему шару, чтобы его потенциал стал равным  $6 \text{ кВ}$ ? Радиус шарика  $7,2 \text{ см}$ .

**9.47.** Начертить графики зависимости потенциала от расстояния для поля точечного заряда и поля, создаваемого проводящим заряженным шаром радиуса  $R$ . Изменится ли характер графика, если шар будет сплошным или полым?

**9.48.** Уединенный проводящий шар диаметром  $30,0 \text{ см}$  зарядили в вакууме до поверхностной плотности  $3,2 \cdot 10^{-7} \text{ Кл/м}^2$ . Определить

потенциал шара на его поверхности, в центре и на расстоянии 15 см от поверхности шара.

**9.49.** Проводящий шарик радиусом 4,0 см, погруженный в керосин, заряжен до потенциала 180 В. Определить сообщенный шарiku заряд. Вычислить работу, совершаемую полем при перемещении заряда 50 нКл на расстояние 8,0 см от поверхности шарика, считая по силовой линии.

**9.50.** Какую работу необходимо совершить, чтобы перенести находящийся в воздухе точечный заряд 20 нКл из бесконечности в точку, расположенную на расстоянии 28 см от поверхности проводящего шара радиусом 2,0 см, если потенциал шара равен 300 В?

**9.51.** Определить потенциал находящегося в вакууме шара радиусом 10 см, если на расстоянии 1,0 м от его поверхности потенциал равен 20 В. Какой заряд распределен на поверхности шара?

**9.52.** Зачем корпус электрометра делают металлическим и заземляют? Можно ли измерить потенциал проводника, соединив его с корпусом электрометра, установленного на подставке из изолятора, а стержень и стрелку электрометра с землей? Что покажет электрометр, если пробный шарик, соединенный длинным проводником с электрометром, перемещать по поверхности заряженного проводника любой формы?

**9.53.** Проводящий шар с положительным зарядом располагается над металлическим листом. Показать приближенную картину эквипотенциальных поверхностей и линий напряженности поля уединенного шара.

**9.54.** Электрическое поле образовано точечным зарядом 1,5 нКл. На каком расстоянии друг от друга расположены в вакууме две эквипотенциальные поверхности с потенциалами 45 и 30 В?

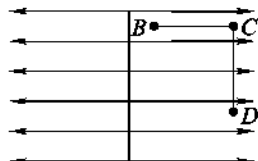
**9.55.** В электрическом поле точечного заряда точки с потенциалами 15,3 и 7,65 В расположены вдоль линии напряженности на расстоянии 15 см одна от другой. Определить заряд, образующий поле.

**9.56.** На расстоянии 5,0 см от поверхности заряженного проводящего шара потенциал равен 1,2 кВ, а на расстоянии 10,0 см 0,9 кВ. Определить радиус шара, заряд и потенциал шара.

**9.57.** Электрическое поле образовано в глицерине точечным зарядом 9,0 нКл. Какова разность потенциалов двух точек, удаленных от заряда на 3,0 и 12 см? Какую работу совершит поле, перемещая между этими точками одноименный заряд 5,0 нКл?

**9.58.** Какую требуется совершить работу, чтобы два точечных заряда по 3,0 мкКл, находящиеся в воздухе на расстоянии 0,60 м, сблизить до 0,20 м?

**9.59.** Электрическое поле образовано в вакууме бесконечной проводящей плоскостью, несущей равномерно распределенный заряд плотностью 24 нКл/м<sup>2</sup> (см. рисунок). Определить напряженность поля в точках В и С и разность



К задаче 9.59

потенциалов в тех же точках. Определить работу, совершенную полем при перемещении заряда  $0,60 \text{ мкКл}$  между точками  $B$  и  $C$  и точками  $B$  и  $D$  ( $BC = CD = 25 \text{ см}$ ).

**9.60.** Маленький шарик с зарядом  $Q$  поместили в произвольную точку внутри полый металлической незаряженной сферы. Какой будет поверхностная плотность индуцированных зарядов на внутренней и внешней поверхностях сферы? Как с помощью линий напряженности изобразится поле внутри и вне сферы?

**9.61.** Электрон, двигаясь вдоль линии напряженности электрического поля, полностью теряет свою скорость между точками с разностью потенциалов  $400 \text{ В}$ . Определить скорость электрона перед вхождением в электрическое поле. Какой будет разность потенциалов, когда скорость электрона уменьшится в два раза?

**9.62.** При радиоактивном распаде солей урана вылетают  $\alpha$ -частицы со скоростью примерно  $2,0 \cdot 10^4 \text{ км/с}$ . Какой должна быть разность потенциалов двух точек электрического поля, чтобы при перемещении между ними  $\alpha$ -частицы приобрели такую же скорость?  $m_\alpha = 6,64 \times 10^{-27} \text{ кг}$ .

**9.63.** Проводящий шарик с зарядом  $4,0 \cdot 10^{-8} \text{ Кл}$  и массой  $1,6 \text{ г}$  перемещается из точки  $M$  с потенциалом  $700 \text{ В}$  в точку  $N$ , потенциал которой равен нулю. Какую скорость имел шарик в точке  $M$ , если в точке  $N$  его скорость была равна  $0,40 \text{ м/с}$ ?

**9.64.** Пылинка массой  $1,0 \cdot 10^{-11} \text{ г}$  имеет заряд, равный 20 элементарным зарядам, и находится в равновесии между двумя горизонтальными параллельными пластинами с разностью потенциалов  $153 \text{ В}$ . Каково расстояние между пластинами? В каком направлении и с каким ускорением будет двигаться пылинка, если разность потенциалов увеличить на  $2,0 \text{ В}$ ?

**9.65.** Пылинка массой  $4,9 \cdot 10^{-12} \text{ г}$ , несущая избыточный отрицательный заряд, находится во взвешенном состоянии (в равновесии) в поле двух горизонтальных параллельных проводящих пластин. Расстояние между ними равно  $1,0 \text{ см}$ , разность потенциалов —  $10 \text{ В}$ . При воздействии ультрафиолетового излучения пылинка частично теряет заряд и выходит из состояния равновесия. Сколько электронов потеряет пылинка, если для восстановления равновесия требуется увеличить разность потенциалов на пластинах на  $50 \text{ В}$ ?

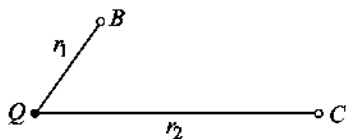
**9.66.** Две металлические концентрические сферы радиусом  $15$  и  $30 \text{ см}$  расположены в воздухе. На внутренней сфере имеется заряд  $-20 \text{ нКл}$ , а потенциал внешней сферы равен  $450 \text{ В}$ . Найти напряженность и потенциал в точках, удаленных от центра сфер на  $10$ ,  $20$  и  $36 \text{ см}$ .

**9.67.** Два параллельных тонких кольца одинакового радиуса  $r$  имеют в вакууме общую ось. Расстояние между их центрами равно  $d$ . На первом кольце равномерно распределен заряд  $Q_1$ , на втором — заряд  $-Q_2$ . Определить разность потенциалов между центрами колец.

**9.68.** На тонком неподвижном кольце радиусом  $R$  равномерно распределен заряд  $Q$ . Вдоль оси, проходящей через центр кольца, к нему приближается маленький шарик массой  $m$  и зарядом  $-Q$ . Шарик на большом удалении от кольца находился в покое. Какую скорость он будет иметь в момент прохождения центра кольца?

**9.69.** Определить заряд, распределенный на плоскости площадью  $200 \text{ см}^2$ , находящейся в вакууме, если в точках, удаленных от нее на 4 и 10 см разность потенциалов равна 6 В.

**9.70.** Электрическое поле образовано точечным зарядом  $0,50 \text{ мКл}$ , находящимся в среде с диэлектрической проницаемостью  $2,0$  (см. рисунок). Определить разность потенциалов точек  $B$  и  $C$ , удаленных от заряда на 5,0 и 20 см, и работу, совершенную полем при перемещении заряда  $30 \text{ нКл}$  между этими точками.



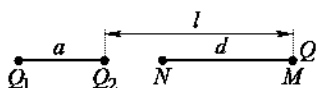
К задаче 9.70

**9.71.** Три одинаковые проводящие пластины достаточно большой площади расположены на расстоянии  $d = 1,0 \text{ мм}$  параллельно друг другу. Поверхностная плотность зарядов на них  $1,5$ ;  $3,0$ ;  $-4,5 \text{ мКл/м}^2$ . Определить напряженность поля между соседними пластинами и разность потенциалов на них.

**9.72.** Внутри конденсатора, находящегося в вакууме, параллельно его горизонтальным пластинам длиной  $6,5 \text{ см}$  летят электроны со скоростью  $8,5 \cdot 10^4 \text{ км/с}$ . Когда на конденсатор подается напряжение, то электроны смещаются внутри него по направлению к одной из пластин на  $1,8 \text{ мм}$ . Определить напряженность электрического поля в конденсаторе и разность потенциалов на пластинах, расстояние между которыми  $8,0 \text{ мм}$ .

**9.73.** Пучок протонов, летящих в вакууме, попадает в плоский конденсатор длиной  $5,5 \text{ см}$  перпендикулярно линиям напряженности электрического поля. Если напряженность поля в конденсаторе  $30 \text{ кВ/м}$ , то протоны, пролетев конденсатор, смещаются в направлении поля на  $1,5 \text{ мм}$ . Определить кинетическую энергию протонов, влетающих в конденсатор. Действием поля тяготения пренебречь.

**9.74.** В плоский воздушный конденсатор параллельно пластинам влетает электрон со скоростью  $3,0 \cdot 10^7 \text{ м/с}$ ; при вылете из конденсатора он смещается на  $1,76 \text{ мм}$  по направлению к одной из пластин. Определить отношение заряда электрона к его массе. Длина пластин



К задаче 9.75

конденсатора  $3,0 \text{ см}$ , расстояние между ними  $2,0 \cdot 10^{-2} \text{ м}$ , разность потенциалов на пластинах  $400 \text{ В}$ .

**9.75.** Электрическое поле образовано точечными зарядами  $Q_1$  и  $Q_2$ , расстояние между которыми  $a$  (см. рисунок). Какую работу необходимо совершить, чтобы заряд  $Q$  переместить из точки  $M$  в точку  $N$ .

**9.76.** Сто маленьких одинаковых капелек ртути, каждая из которых заряжена до потенциала 3,0 В, при слиянии образовали одну каплю. Каков ее потенциал? Все капли имеют шарообразную форму.

**9.77.** В зависимости от строения молекул диэлектрики могут быть полярными и неполярными: К какой группе относится вода? водород?

**9.78.** Какой величиной характеризуются электрические свойства молекул диэлектриков? От чего зависит эта величина?

**9.79.** Чем отличается явление электростатической индукции в проводнике от поляризации диэлектрика?

## § 10. Электрическая емкость проводника.

### Конденсаторы. Энергия электрического поля конденсатора

**Пример 42.** Два проводника, имеющие форму шара радиусом 4,0 и 6,0 см, заряжены в вакууме до потенциалов соответственно 150 и 50 В. Определить электрические емкости проводников и заряды на них. Какими будут потенциалы и заряды на проводниках, если их соединить тонкой проволокой?

*Дано:*  $r_1 = 4,0 \text{ см} = 4,0 \cdot 10^{-2} \text{ м}$ ,  $r_2 = 6,0 \text{ см} = 6,0 \cdot 10^{-2} \text{ м}$  — радиусы шаров;  $\varphi_1 = 150 \text{ В}$ ,  $\varphi_2 = 50 \text{ В}$  — их потенциалы. Из таблиц:  $\varepsilon_0 = 8,85 \times 10^{-12} \text{ Ф/м}$  — электрическая постоянная.

*Найти:*  $C_1$  и  $C_2$  — электрические емкости шаров;  $Q_1$  и  $Q_2$  — заряды на шарах;  $\varphi'_1$  и  $\varphi'_2$ ,  $Q'_1$  и  $Q'_2$  — потенциалы и заряды шаров после их соединения.

**Решение.** Емкость шарового проводника находится по формуле

$$C = 4\pi\varepsilon_0 r.$$

Отсюда

$$C_1 = 4\pi\varepsilon_0 r_1 = 4 \cdot 3,14 \cdot 8,85 \cdot 10^{-12} \text{ Ф/м} \cdot 4,0 \cdot 10^{-2} \text{ м} = 4,45 \cdot 10^{-12} \text{ Ф},$$

$$C_2 = 4\pi\varepsilon_0 r_2 = 4 \cdot 3,14 \cdot 8,85 \cdot 10^{-12} \text{ Ф/м} \cdot 6,0 \cdot 10^{-2} \text{ м} = 6,67 \cdot 10^{-12} \text{ Ф}.$$

Заряд шара можно определить, взяв любую из двух формул:

$$Q = \varphi \cdot 4\pi\varepsilon_0 r \quad \text{или} \quad Q = C \cdot \varphi.$$

$$Q_1 = C_1 \varphi_1 = 4,45 \cdot 10^{-12} \text{ Ф} \cdot 150 \text{ В} = 6,68 \cdot 10^{-10} \text{ Кл},$$

$$Q_2 = C_2 \varphi_2 = 6,67 \cdot 10^{-12} \text{ Ф} \cdot 50 \text{ В} = 3,34 \cdot 10^{-10} \text{ Кл}.$$

После соединения шаров их можно рассматривать как один проводник, на поверхности которого все точки имеют одинаковый потенциал (эквипотенциальная поверхность):  $\varphi'_1 = \varphi'_2 = \varphi$ , где

$$\varphi'_1 = \varphi = \frac{Q'_1}{C_1}, \quad \varphi'_2 = \varphi = \frac{Q'_2}{C_2}.$$

Из равенства потенциалов следует

$$\frac{Q'_1}{C_1} = \frac{Q'_2}{C_2}.$$



Воспользуемся законом сохранения заряда  $Q_1 + Q_2 = Q = Q'_1 + Q'_2$ , тогда

$$Q'_1 C_2 = (Q - Q'_1) C_1, \quad Q'_1 (C_2 + C_1) = Q C_1.$$

Отсюда

$$Q'_1 = \frac{Q C_1}{C_2 + C_1} = \frac{(3,34 + 6,68) \cdot 10^{-10} \text{ Кл} \cdot 4,45 \cdot 10^{-12} \text{ Ф}}{11,12 \cdot 10^{-12} \text{ Ф}} \approx 4,0 \cdot 10^{-10} \text{ Кл},$$

$$Q'_2 = Q - Q'_1 = 6,0 \cdot 10^{-10} \text{ Кл}.$$

Потенциал шаров после соединения будет равен

$$\varphi = \frac{Q'_1}{C_1} = \frac{4,0 \cdot 10^{-10} \text{ Кл}}{4,45 \cdot 10^{-12} \text{ Ф}} \approx 90 \text{ В}.$$

*Примечание.* Можно показать, что электрическая емкость двух шаров после их соединения будет равна сумме емкостей отдельных шаров. Действительно, каждый проводящий шар по отношению к Земле можно рассматривать как систему, подобную конденсатору, у которого вторым проводником будет Земля; ее потенциал условимся считать равным нулю. Соединение шаров можно рассматривать (в совокупности с Землей) как параллельное соединение, при котором общая емкость  $C$  равна сумме емкостей шаров в отдельности:

$$C = C_1 + C_2 = (4,45 + 6,67) \cdot 10^{-12} \text{ Ф} \approx 11 \text{ пФ}.$$

Такой же ответ получим, разделив общий заряд  $Q$  на потенциал шаров после их соединения:

$$C = \frac{Q}{\varphi} = \frac{10,0 \cdot 10^{-10} \text{ Кл}}{90 \text{ В}} \approx 0,11 \cdot 10^{-10} \text{ Ф} = 11 \text{ пФ}.$$

*Ответ:*  $C_1 = 4,45 \text{ пФ}$ ,  $C_2 = 6,67 \text{ пФ}$ ,  $Q_1 = 6,68 \cdot 10^{-10} \text{ Кл}$ ,  $Q_2 = 3,34 \cdot 10^{-10} \text{ Кл}$ ,  $\varphi'_1 = \varphi'_2 = 90 \text{ В}$ ;  $Q'_1 = 4,0 \cdot 10^{-10} \text{ Кл}$ ;  $Q'_2 = 6,0 \times 10^{-10} \text{ Кл}$ .

**Пример 43.** Плоский конденсатор заполнен твердым диэлектриком, диэлектрическая проницаемость которого равна 6. Площадь каждой пластины  $6,2 \cdot 10^{-3} \text{ м}^2$ , а расстояние между ними 2,0 мм. Конденсатор зарядили, передав пластинам заряд  $3,1 \cdot 10^{-8} \text{ Кл}$ , после чего отключили от источника напряжения. Определить электрическую емкость конденсатора, разность потенциалов на его пластинах и напряженность поля внутри конденсатора. Подсчитать силу взаимного притяжения пластин и работу, которую нужно совершить для удаления диэлектрика из конденсатора. Трение не учитывать.

*Дано:*  $\epsilon = 6$  — диэлектрическая проницаемость диэлектрика;  $S = 6,2 \cdot 10^{-3} \text{ м}^2$  — площадь пластины;  $d = 2,0 \text{ мм} = 2,0 \cdot 10^{-3} \text{ м}$  — расстояние между пластинами;  $Q = 3,1 \cdot 10^{-8} \text{ Кл}$  — электрический заряд на пластине. Из таблиц:  $\epsilon_0 = 8,85 \cdot 10^{-12} \text{ Ф/м}$  — электрическая постоянная.

*Найти:*  $C$  — электрическую емкость конденсатора;  $U$  — разность потенциалов на его пластинах;  $E$  — напряженность поля в конденсаторе;  $F$  — силу взаимного притяжения пластин;  $A$  — работу, необходимую для удаления диэлектрика из конденсатора.

**Решение.** Электрическую емкость плоского конденсатора определим по формуле

$$C = \frac{\epsilon_0 \epsilon S}{d} = \frac{8,85 \cdot 10^{-12} \cdot 6 \cdot 6,2 \cdot 10^{-3}}{2,0 \cdot 10^{-3}} \frac{\text{Ф/м} \cdot \text{м}^2}{\text{м}} \approx 165 \cdot 10^{-12} \text{ Ф} = 165 \text{ пФ}.$$

Зная заряд  $Q$  и емкость  $C$ , определяем разность потенциалов на пластинах конденсатора  $U$ :

$$U = \frac{Q}{C} = \frac{3,1 \cdot 10^{-8}}{165 \cdot 10^{-12}} \frac{\text{Кл}}{\text{Ф}} \approx 188 \text{ В}.$$

Напряженность однородного поля  $E$  и разность потенциалов  $U$  на пластинах конденсатора связаны зависимостью

$$E = \frac{U}{d} = \frac{188}{2,0 \cdot 10^{-3}} \frac{\text{В}}{\text{м}} = 94 \text{ кВ/м}.$$

Известно, что пластины конденсатора несут заряды противоположного знака, что приводит к возникновению силы их взаимного притяжения  $F = QE$ , где  $E$  — напряженность поля, образованного одной пластиной, а  $Q$  — заряд на другой.

Учитывая, что  $E = Q/(2\epsilon_0 \epsilon S)$ , получаем

$$F = \frac{Q^2}{2\epsilon_0 \epsilon S} = \frac{(3,1 \cdot 10^{-8})^2}{2 \cdot 8,85 \cdot 10^{-12} \cdot 6 \cdot 6,2 \cdot 10^{-3}} \frac{\text{Кл}^2}{\text{Ф/м} \cdot \text{м}^2} \approx 0,0146 \cdot 10^{-1} \text{ Н} = 1,46 \text{ мН}.$$

В согласии с законом сохранения энергии  $A = \Delta W = W_2 - W_1$ , где  $W_1$  и  $W_2$  — энергия поля конденсатора при наличии в нем твердого диэлектрика и без него:

$$W_1 = \frac{Q^2}{2C_1}, \quad C_1 = \frac{\epsilon_0 \epsilon S}{d}, \quad W_1 = \frac{Q^2 d}{2\epsilon_0 \epsilon S}.$$

Поскольку конденсатор отключен от источника напряжения, заряд на пластинах остается неизменным, а меняется емкость (имеются в виду величины, входящие в приведенную формулу энергии поля):

$$W_2 = \frac{Q^2}{2C_2}, \quad C_2 = \frac{\epsilon_0 S}{d}, \quad W_2 = \frac{Q^2 d}{2\epsilon_0 S}.$$

Энергия поля в отсутствие диэлектрика увеличилась за счет работы внешних сил

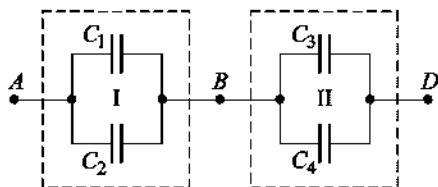
$$A = \Delta W = \left(1 - \frac{1}{\epsilon}\right) \frac{Q^2 d}{2\epsilon_0 S}.$$

Подставляя числовые значения величин, входящих в выражение для работы, и производя вычисления, получаем

$$A = \left(1 - \frac{1}{6}\right) \frac{(3,1 \cdot 10^{-8})^2 \cdot 2,0 \cdot 10^{-3}}{2 \cdot 8,85 \cdot 10^{-12} \cdot 6,2 \cdot 10^{-3}} \frac{\text{Кл}^2 \cdot \text{м}}{\text{Ф} \cdot \text{м} \cdot \text{м}^2} \approx \\ \approx 146 \cdot 10^{-7} \text{ Дж} = 14,6 \text{ мкДж}.$$

*Ответ:*  $C = 165 \text{ пФ}$ ;  $U \approx 188 \text{ В}$ ;  $E = 94 \text{ кВ/м}$ ;  $F \approx 1,46 \text{ мН}$ ;  $A = 14,6 \text{ мкДж}$ .

**Пример 44.** Четыре конденсатора соединены по схеме, изображенной на рисунке, и подключены к источнику постоянного напряжения 300 В. Емкости конденсаторов:  $C_1 = 2,0 \text{ мкФ}$ ,  $C_2 = 4,0 \text{ мкФ}$ ,  $C_3 = C_4 = 2,0 \text{ мкФ}$ . Найти электрическую емкость батареи конденсаторов; общий заряд и заряды, накопленные отдельными конденсаторами; напряжение на отдельных конденсаторах; электрическую энергию, запасенную батареей.



К задаче 44

*Дано:*  $U_{AD} = 300 \text{ В}$  — напряжение, подведенное к батарее конденсаторов;  $C_1 = 2,0 \text{ мкФ}$ ,  $C_2 = 4,0 \text{ мкФ}$ ,  $C_3 = C_4 = 2,0 \text{ мкФ}$  — электрические емкости отдельных конденсаторов.

*Найти:*  $C$  — электрическую емкость батареи;  $Q$ ,  $Q_1$ ,  $Q_2$ ,  $Q_3$ ,  $Q_4$  — соответственно общий заряд и заряды на отдельных конденсаторах;  $U_{AB}$  и  $U_{CD}$  — напряжения;  $W$  — электрическую энергию, запасенную всей батареей.

**Решение.** На схеме, изображенной на рисунке, представлено смешанное соединение, в котором участки I и II (они показаны штриховыми линиями) соединены между собой последовательно. Для этого случая справедлива формула

$$\frac{1}{C} = \frac{1}{C_I} + \frac{1}{C_{II}}, \quad \text{или} \quad C = \frac{C_I C_{II}}{C_I + C_{II}}.$$

На участках I и II конденсаторы соединены параллельно:

$$C_I = C_1 + C_2, \quad C_{II} = C_3 + C_4.$$

Заметим, что емкости в процессе вычислений удобнее выражать в микрофарадах:

$$C_I = (2,0 + 4,0) \text{ мкФ} = 6,0 \text{ мкФ}, \quad C_{II} = 4,0 \text{ мкФ},$$

$$C = \frac{6,0 \cdot 4,0}{6,0 + 4,0} \frac{(\text{мкФ})^2}{\text{мкФ}} = 2,4 \text{ мкФ} = 2,4 \cdot 10^{-6} \text{ Ф}.$$

Теперь можно определить общий заряд:

$$Q = CU_{AD} = 2,4 \cdot 10^{-6} \cdot 300 \text{ Ф} \cdot \text{В} = 7,2 \cdot 10^{-4} \text{ Кл}.$$

При параллельном соединении разность потенциалов на конденсаторах  $C_1$  и  $C_2$  одинакова. Тогда

$$U_{AB} = \frac{Q_1}{C_1} = \frac{Q - Q_1}{C_2}, \quad Q_1 = \frac{QC_1}{C_1 + C_2},$$

$$Q_1 = \frac{7,2 \cdot 10^{-4} \cdot 2,0 \text{ Кл} \cdot \text{мкФ}}{6,0 \text{ мкФ}} = 2,4 \cdot 10^{-4} \text{ Кл},$$

$$Q_2 = Q - Q_1 = 4,8 \cdot 10^{-4} \text{ Кл}.$$

Определяем  $U_{AB}$ :

$$U_{AB} = \frac{Q_1}{C_1} = \frac{2,4 \cdot 10^{-4} \text{ Кл}}{2,0 \cdot 10^{-6} \text{ Ф}} = 120 \text{ В},$$

$$U_{BD} = U_{AD} - U_{AB} = 180 \text{ В}.$$

Такой же результат можно получить иначе:

$$U_{BD} = \frac{Q}{C_3 + C_4} = \frac{7,2 \cdot 10^{-4} \text{ Кл}}{4,0 \cdot 10^{-6} \text{ Ф}} = 180 \text{ В}.$$

Аналогично тому, как определялись заряды в первых двух конденсаторах, найдем  $Q_3$  и  $Q_4$ :

$$U_{BD} = \frac{Q_3}{C_3} = \frac{Q - Q_3}{C_4}.$$

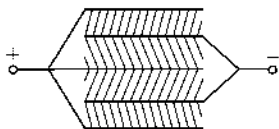
Решение может быть более простым, если учесть, что  $C_3 = C_4$ . Тогда  $Q_3 = Q_4 = Q/2 = 3,6 \cdot 10^{-4} \text{ Кл}$ .

Для определения электрической энергии, накопленной батареей, можно воспользоваться формулами (по выбору)

$$W = \frac{CU_{AD}^2}{2} = \frac{Q^2}{2C} = \frac{QU_{AD}}{2} = \frac{7,2 \cdot 10^{-4} \cdot 300}{2} \text{ Кл} \cdot \text{В} \approx 0,11 \text{ Дж}.$$

*Ответ:*  $C = 2,4 \text{ мкФ}$ ;  $Q = 7,2 \cdot 10^{-4} \text{ Кл}$ ;  $Q_1 = 2,4 \cdot 10^{-4} \text{ Кл}$ ;  $Q_2 = 4,8 \cdot 10^{-4} \text{ Кл}$ ;  $Q_3 = 3,6 \cdot 10^{-4} \text{ Кл}$ ;  $Q_4 = 3,6 \cdot 10^{-4} \text{ Кл}$ ;  $W = 0,11 \text{ Дж}$ .

**Пример 45.** Конденсатор, электрическая емкость которого  $0,03 \text{ мкФ}$ , изготовлен из одинаковых по площади листов металлической фольги и слюды (см. рисунок). Сколько слюдяных пластинок необходимо взять, если площадь каждой из них  $50 \text{ см}^2$ , а толщина  $0,177 \text{ мм}$ ? Диэлектрическую проницаемость слюды принять равной шести.



К задаче 45

*Дано:*  $C_n = 0,03 \text{ мкФ} = 3,0 \cdot 10^{-8} \text{ Ф}$  — электрическая емкость конденсатора;  $S = 50 \text{ см}^2 = 5,0 \cdot 10^{-3} \text{ м}^2$  — площадь пластинок;  $d = 0,177 \text{ мм} = 1,77 \cdot 10^{-4} \text{ м}$  — толщина пластинки из слюды;  $\epsilon = 6$  — диэлектрическая проницаемость слюды. Из таблиц:  $\epsilon_0 = 8,85 \times 10^{-12} \text{ Ф/м}$  — электрическая постоянная.

*Найти:*  $n$  — число пластин из слюды.

Решение. Электрическая емкость плоского конденсатора определяется формулой  $C = \epsilon_0 \epsilon S/d$ . В данном примере имеется  $n$  таких конденсаторов, которые соединены параллельно; следовательно, общая емкость  $C_n$  будет в  $n$  раз больше емкости одного конденсатора:

$$C_n = Cn.$$

Отсюда

$$n = \frac{C_n d}{\epsilon_0 \epsilon S} = \frac{3,0 \cdot 10^{-8} \cdot 1,77 \cdot 10^{-4}}{8,85 \cdot 10^{-12} \cdot 6 \cdot 5,0 \cdot 10^{-3}} \frac{\Phi \cdot \text{м}}{\Phi/\text{м} \cdot \text{м}^2} = 20.$$

Ответ:  $n = 20$ .

*Примечание.* В том случае, когда через  $n$  обозначено число металлических пластинок параллельно соединенных конденсаторов,  $n$  будет на один меньше и формула примет вид

$$C_n = \frac{\epsilon_0 \epsilon S}{d} (n - 1).$$

**10.1.** Всегда ли одинаковы электрические емкости двух одинаковых по форме и размерам проводников в одной и той же среде?

**10.2.** Подсчитать приближенно электрическую емкость земного шара. Каким должен быть радиус проводящего шара, чтобы его емкость равнялась 1 Ф?

**10.3.** На поверхности штампованных пластмассовых деталей из-за соприкосновения со стенками металлических форм возникает статический заряд. Почему возрастает потенциал заряженной поверхности относительно Земли, когда деталь вынимается из формы?

**10.4.** При сообщении проводящему шару заряда 30 нКл его потенциал становится равным 6,0 кВ. Определить электрическую емкость шара в воздухе и его радиус.

**10.5.** Определить потенциал и радиус металлического шарика емкостью 4,5 пФ, получившего заряд 180 нКл, если шарик находится в воздухе.

**10.6.** Два проводящих шарика радиусом 1,5 и 6,0 см получили соответственно заряды 0,50 и 6,0 нКл. Что произойдет после того, как шарики соединят тонкой проволокой? Определить потенциалы шариков до и после соединения, если они находятся в воздухе. Найти окончательные заряды на шариках.

**10.7.** Двум изолированным проводящим шарикам радиусом  $R_1$  и  $R_2$  сообщили заряды  $Q_1$  и  $Q_2$  соответственно. Доказать, что в результате соединения шариков и перераспределения зарядов на них создается общий потенциал  $\varphi = \frac{Q_1 + Q_2}{4\pi\epsilon_0\epsilon(R_1 + R_2)}$ .

**10.8.** Проводящие шарики электрической емкостью 6,0 и 9,0 пФ заряжены до потенциалов соответственно 200 и 800 В. Найти суммарный заряд шариков и их потенциал после соприкосновения.

**10.9.** Металлические шарики радиусом 0,20 и 0,60 см привели в соприкосновение, сообщили заряд 280 нКл, а затем развели на расстоя-

ние 10 см (между их центрами). Как распределились заряды? Найти отношение поверхностных плотностей зарядов, считая их одинаковыми, на всех участках поверхности. С какой силой на этом расстоянии отталкиваются шарики?

**10.10.** Площадь пластины слюдяного конденсатора  $36 \text{ см}^2$ , толщина слоя диэлектрика  $0,14 \text{ см}$ . Вычислить электрическую емкость, заряд и энергию, запасенную конденсатором, если разность потенциалов на его пластинах  $300 \text{ В}$ , а диэлектрическая проницаемость слюды равна 7.

**10.11.** Какова максимальная емкость раздвижного школьного конденсатора с пластинами в форме полукругов радиусами  $10 \text{ см}$ , у которого диэлектриком использовано стекло толщиной  $7,0 \text{ мм}$  ( $\epsilon = 5$ )?

**10.12.** Определить электрический заряд, накопленный плоским конденсатором емкостью  $0,020 \text{ мкФ}$ , если напряженность поля в конденсаторе  $320 \text{ В/см}$ , а расстояние между пластинами  $0,50 \text{ см}$ . Какой будет разность потенциалов на пластинах, если воздушный зазор между ними увеличить в два раза? Определить энергию электрического поля конденсатора в обоих случаях.

**10.13.** Какую опасность представляют обесточенные цепи с имеющимися в них конденсаторами? Что необходимо предпринять после размыкания такой цепи?

**10.14.** Проводящий шарик диаметром  $2,0 \text{ см}$  с потенциалом  $9,0 \times 10^4 \text{ В}$  соединили с Землей длинным проводником. Какое количество энергии выделится в проводнике?

**10.15.** Один миллион сферических проводящих капелек сливаются в одну каплю. Радиус каждой капельки  $5,0 \cdot 10^{-4} \text{ см}$ , а ее заряд  $1,6 \times 10^{-14} \text{ Кл}$ . Какая энергия расходуется на преодоление электрических сил отталкивания при слиянии капелек?

**10.16.** Площадь каждой пластины плоского слюдяного конденсатора  $300 \text{ см}^2$ , толщина слюды  $1,0 \text{ мм}$ . Какая разность потенциалов была приложена к пластинам, если известно, что при разрядке конденсатора выделилось  $0,21 \text{ Дж}$  теплоты?

**10.17.** Почему электролитические конденсаторы обладают большой емкостью? Что следует учитывать при их использовании?

**10.18.** Плоский воздушный конденсатор емкостью  $1600 \text{ пФ}$  зарядили до разности потенциалов  $500 \text{ В}$ , отключили от источника напряжения и увеличили расстояние между пластинами в три раза. Определить разность потенциалов на пластинах конденсатора после их раздвижения и работу, совершенную при этом внешними силами.

**10.19.** Определить работу, которую необходимо совершить, чтобы увеличить расстояние между пластинами плоского воздушного конденсатора на  $0,40 \text{ мм}$ . Площадь каждой пластины равна  $6,28 \cdot 10^4 \text{ мм}^2$ , заряд составляет  $200 \text{ нКл}$ .

**10.20.** В плоском конденсаторе в качестве диэлектрика взята стеклянная пластинка толщиной  $15 \text{ мм}$ . Конденсатор зарядили до  $200 \text{ В}$ , отключили от источника постоянного напряжения, после чего удалили стеклянную пластинку. Как и на сколько изменилась разность потен-

циалов на пластинах конденсатора? Диэлектрическую проницаемость стекла принять равной 7,5.

**10.21.** Плоский воздушный конденсатор после зарядки отключают от источника постоянного напряжения и погружают в керосин. Как и во сколько раз изменится энергия электрического поля в конденсаторе?

**10.22.** Плоский воздушный конденсатор с площадью пластин по  $80 \text{ см}^2$  и расстоянием между ними 1,5 мм заряжается от источника с напряжением 100 В, отключается от него и погружается в жидкий диэлектрик, диэлектрическая проницаемость которого равна 2,5. Как и на сколько при этом изменится энергия конденсатора? Не нарушается ли в этом случае закон сохранения энергии?

**10.23.** Два конденсатора, электрические емкости которых равны 1,5 и 3,0 мкФ, соединили последовательно и подключили к источнику постоянного напряжения 120 В. Каковы емкость батареи, заряд и разность потенциалов на каждом конденсаторе?

**10.24.** Определить электрическую емкость плоского конденсатора с площадью пластины  $20 \text{ см}^2$ , который содержит в качестве диэлектрика слой слюды ( $\epsilon = 6$ ) толщиной  $3,0 \cdot 10^{-3} \text{ мм}$  и слой парафинированной бумаги толщиной  $1,0 \cdot 10^{-3} \text{ мм}$ .

**10.25.** Два конденсатора электрической емкостью 4,0 и 1,0 мкФ соединены последовательно и подключены к источнику постоянного напряжения 220 В. Определить общую емкость и разность потенциалов на пластинах каждого конденсатора.

**10.26.** Можно ли, имея два одинаковых конденсатора, получить электрическую емкость вдвое меньшую и вдвое большую, чем у одного из них? Если можно, то как это сделать?

**10.27.** Конденсатор емкостью 0,60 мкФ, заряженный до разности потенциалов 200 В, соединяют в батарею параллельно с конденсатором емкостью 0,40 мкФ и разностью потенциалов на пластинах 300 В. Определить емкость батареи, разность потенциалов на ее зажимах и запасенную в ней энергию.

**10.28.** Конденсатор емкостью 6,0 мкФ, заряженный до 400 В, соединили параллельно с незаряженным конденсатором емкостью 10,0 мкФ. Какая разность потенциалов установилась на конденсаторах? Как распределился электрический заряд на них?

**10.29.** Конденсатор неизвестной емкости, заряженный до 1000 В, соединили параллельно в батарею с другим конденсатором, заряженным до 400 В и имеющим емкость 2,0 мкФ. Определить емкость первого конденсатора, если после соединения разность потенциалов на ее зажимах стала 570 В. Найти общий заряд.

**10.30.** Плоский воздушный конденсатор имеет электрическую емкость  $C$ . Определить емкость того же конденсатора, когда он наполовину погружен в трансформаторное масло так, что его пластины перпендикулярны поверхности масла, диэлектрическая проницаемость которого равна 2,2.

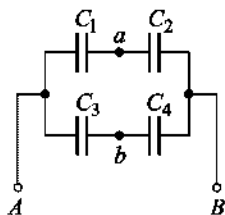
**10.31.** Одинакова ли работа по раздвижению пластин плоского воздушного конденсатора, если конденсатор после зарядки остается подключенным к источнику напряжения или если после зарядки отключается?

**10.32.** Шесть конденсаторов емкостью по  $5,0 \cdot 10^{-3}$  мкФ соединили параллельно в батарею и зарядили до 4000 В. Какой заряд накоплен всеми конденсаторами? Сколько теплоты выделится при разрядке такой батареи?

**10.33.** Определить электрическую емкость конденсатора, в котором листы станиоля площадью  $4,7 \text{ см}^2$  проложены 15 листами парафинированной бумаги толщиной 0,03 мм.

**10.34.** Конденсатор образован 21 латунным листом, между которыми помещено стекло толщиной 2,0 мм. Площади латунных листов и стеклянных прокладок одинаковы и равны каждая  $200 \text{ см}^2$ . Листы соединены так, что образуют батарею параллельно соединенных конденсаторов. Определить ее емкость, если диэлектрическую проницаемость стекла принять равной 7.

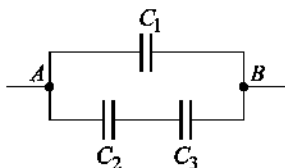
**10.35.** Четыре конденсатора, электрические емкости которых  $C_1 = 0,30$  мкФ,  $C_2 = 0,60$  мкФ,  $C_3 = 0,20$  мкФ и  $C_4 = 0,30$  мкФ, соединены по схеме, изображенной на рисунке, и заряжены от источника постоянного напряжения до 200 В. Определить общую емкость, заряд и энергию электрического поля батареи конденсаторов.



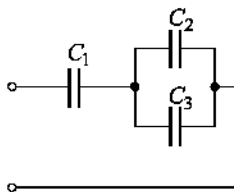
К задаче 10.35

**10.36.** Как соединены четыре одинаковых конденсатора, если электрическая емкость всей системы осталась такой, как у одного конденсатора? Как изменилась энергия электрического поля системы по сравнению с энергией одного конденсатора?

**10.37.** Три конденсатора соединены по схеме, изображенной на рисунке, и образуют батарею емкостью 5,8 мкФ. Определить емкость и заряд конденсатора  $C_1$ , если  $C_2 = 1,0$  мкФ,  $C_3 = 4,0$  мкФ, а подведенное к точкам A и B напряжение равно 220 В.



К задаче 10.37



К задаче 10.38

**10.38.** Три конденсатора с емкостями  $C_1 = 1,0$  мкФ,  $C_2 = 1,0$  мкФ и  $C_3 = 2,0$  мкФ соединены по схеме, изображенной на рисунке, и подключены к источнику постоянного напряжения 120 В. Какова их



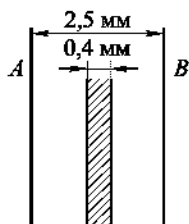
общая емкость? Определить заряд и разность потенциалов на каждом из конденсаторов.

**10.39.** Какой заряд необходимо передать плоскому воздушному конденсатору, чтобы пылинка массой  $1,0 \cdot 10^{-11}$  г, потерявшая 20 электронов, могла находиться в равновесии в электрическом поле этого конденсатора? Емкость конденсатора  $0,015$  мкФ, расстояние между его пластинами  $2,5$  мм.

**10.40.** Плоский конденсатор электрической емкостью  $C$  находится в вакууме. Площадь одной пластины равна  $S$ , напряженность поля внутри конденсатора —  $E$ . Определить скорость, которую приобретет электрон, пройдя в конденсаторе путь от одной пластины к другой. Начальная скорость электрона  $v_0 = 0$ .

**10.41.** Однородное электрическое поле напряженностью  $1,0 \cdot 10^4$  В/м образовано двумя заряженными пластинами, расположенными на расстоянии  $2,0$  см одна от другой в воздухе. Чему будет равна разность потенциалов, если между пластинами параллельно им поместить металлический лист толщиной  $0,50$  см?

**10.42.** На расстоянии  $2,5$  мм друг от друга в воздухе расположены вертикально две параллельные пластины  $A$  и  $B$  (см. рисунок), потенциалы которых соответственно равны  $50,0$  и  $-50,0$  В. Определить напряженность образовавшегося однородного электрического поля и разность потенциалов между пластинами, если посередине между ними помещен металлический лист толщиной  $0,40$  мм. Какую работу совершит поле при перенесении заряда  $1,0$  мКл между пластиной  $A$  и промежуточным листом?



К задаче 10.42

**10.43.** Определить объемную плотность энергии электрического поля внутри плоского воздушного конденсатора, полностью погруженного в керосин. Напряженность электрического поля между пластинами равна  $5,0 \cdot 10^6$  В/м.

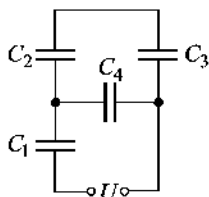
**10.44.** Проводящий шарик, заряженный до поверхностной плотности  $\sigma$ , образует в вакууме электрическое поле. Определить электрическую емкость шарика, если на расстоянии  $l$  от его поверхности потенциал поля равен  $\varphi$ .

**10.45.** Два плоских воздушных конденсатора, электрические емкости которых равны  $C_1$  и  $C_2$ , соединены последовательно и подключены к источнику постоянного напряжения. Определить, во сколько раз изменится разность потенциалов на каждом из конденсаторов, если один из них полностью погрузить в жидкость с диэлектрической проницаемостью  $\epsilon$ . Каким будет ответ, если первоначальные емкости (до погружения) конденсаторов будут одинаковы?

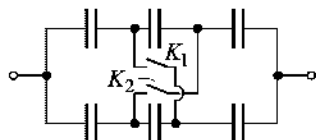
**10.46.** Четыре конденсатора, электрические емкости которых равны  $C_1 = 1,0$  мкФ,  $C_2 = 1,5$  мкФ,  $C_3 = 2,5$  мкФ и  $C_4 = 0,50$  мкФ, соединены в батарею, как показано на рисунке к задаче 10.35, и подключены

к источнику постоянного напряжения  $U_{AB} = 15$  В. Найти разность потенциалов между точками  $a$  и  $b$ .

**10.47.** Четыре конденсатора, электрические емкости которых равны  $C_1 = 0,5$  мкФ,  $C_2 = 1,0$  мкФ,  $C_3 = 1,5$  мкФ и  $C_4 = 2,0$  мкФ, соединены, как показано на рисунке, и подключены к источнику постоянного напряжения 124 В. Найти заряды конденсаторов и разность потенциалов на пластинах конденсатора  $C_2$ .



К задаче 10.47



К задаче 10.48

**10.48.** Шесть конденсаторов одинаковой электрической емкостью  $C$  соединены в батарею, изображенную на рисунке. Во сколько раз изменится емкость батареи после замыкания ключей  $K_1$  и  $K_2$ ?

## § 11. Постоянный электрический ток.

### Электрический ток в металлах.

### Законы постоянного электрического тока

**Пример 46.** В проводнике площадью поперечного сечения  $0,62$  мм<sup>2</sup> концентрация подвижных носителей зарядов равна  $7,8 \cdot 10^{21}$  см<sup>-3</sup>, а их средняя скорость дрейфа составляет  $0,49$  мм/с. Найти силу тока и плотность электрического тока в проводнике.

*Дано:*  $S = 0,62$  мм<sup>2</sup> =  $6,2 \cdot 10^{-7}$  м<sup>2</sup> — площадь поперечного сечения проводника;  $n = 7,8 \cdot 10^{21}$  см<sup>-3</sup> =  $7,8 \cdot 10^{27}$  м<sup>-3</sup> — концентрация подвижных носителей зарядов;  $\bar{v} = 0,49$  мм/с =  $4,9 \cdot 10^{-4}$  м/с — средняя скорость дрейфа подвижных носителей зарядов. Из таблицы:  $e = 1,6 \times 10^{-19}$  Кл — элементарный электрический заряд.

*Найти:*  $I$  — силу тока,  $j$  — плотность тока в проводнике.

**Решение.** Сила тока определяется из формулы  $I = Q/t$ . Заряд  $Q$  в проводнике длиной  $l$  и площадью поперечного сечения  $S$  будет равен  $Q = ne l S$ . Этот заряд пройдет через поперечное сечение за время  $t = l/\bar{v}$ , создавая электрический ток

$$I = \frac{ne l S}{t} = \frac{ne l S \bar{v}}{l} = ne S \bar{v}.$$

Подставляя числовые значения величин, входящих в выражение для силы тока, получаем

$$I = 7,8 \cdot 10^{27} \cdot 1,6 \cdot 10^{-19} \cdot 6,2 \cdot 10^{-7} \cdot 4,90 \cdot 10^{-4} \text{ м}^{-3} \cdot \text{Кл} \cdot \text{м}^2 \cdot \text{м/с} \approx \\ \approx 0,38 \text{ А}.$$

Зная силу тока и площадь поперечного сечения, определяем плотность тока в проводнике:

$$j = \frac{I}{S} = \frac{0,38}{6,2 \cdot 10^{-7}} \frac{\text{А}}{\text{м}^2} \approx 0,61 \cdot 10^6 \text{ А/м}^2 = 0,61 \text{ А/мм}^2.$$

*Ответ:*  $I \approx 0,38 \text{ А}$ ;  $j \approx 0,61 \text{ А/мм}^2$ .

**Пример 47.** Для изготовления нагревательного элемента электрического кипятильника использовали 9,0 м нихромового провода поперечным сечением  $0,39 \text{ мм}^2$ . Допустимая плотность тока равна  $10,2 \text{ А/мм}^2$ . Определить сопротивление нагревательного элемента кипятильника, силу тока в нем и напряжение, на которое рассчитан кипятильник. Удельное сопротивление нихрома при работе кипятильника принять равным  $1,3 \cdot 10^{-6} \text{ Ом} \cdot \text{м}$ .

*Дано:*  $l = 9,0 \text{ м}$  — длина провода;  $S = 0,39 \text{ мм}^2 = 3,9 \cdot 10^{-7} \text{ м}^2$  — площадь его поперечного сечения;  $j = 10,2 \cdot 10^6 \text{ А/м}^2$  — плотность тока;  $\rho = 1,3 \cdot 10^{-6} \text{ Ом} \cdot \text{м}$  — удельное сопротивление нихрома.

*Найти:*  $R$  — сопротивление нагревательного элемента,  $I$  — силу тока,  $U$  — напряжение на зажимах кипятильника.

*Решение.* Сопротивление нагревательного элемента находим, используя формулу  $R = \rho l / S$ :

$$R = \frac{1,3 \cdot 10^{-6} \cdot 9,0}{3,9 \cdot 10^{-7}} \frac{\text{Ом} \cdot \text{м} \cdot \text{м}}{\text{м}^2} = 30 \text{ Ом}.$$

Зная плотность тока и площадь поперечного сечения провода, определяем силу тока

$$I = jS = 10,2 \cdot 10^6 \cdot 3,9 \cdot 10^{-7} \text{ А/м}^2 \cdot \text{м}^2 \approx 4 \text{ А}.$$

Используя закон Ома для участка цепи  $I = U/R$ , находим напряжение на зажимах кипятильника

$$U = IR = 4 \cdot 30 \text{ А} \cdot \text{Ом} = 120 \text{ В}.$$

*Ответ:*  $R = 30 \text{ Ом}$ ;  $I \approx 4 \text{ А}$ ;  $U = 120 \text{ В}$ .

**Пример 48.** Четыре резистора ( $R_1 = 5,0 \text{ Ом}$ ,  $R_2 = 9,0 \text{ Ом}$ ,  $R_3 = 3,0 \text{ Ом}$ ,  $R_4 = 2,75 \text{ Ом}$ ) соединены, как показано на рисунке а, и подключены к гальваническому элементу с ЭДС 1,5 В и внутренним сопротивлением 0,50 Ом. Найти общее сопротивление внешней части цепи, силу тока в элементе и первом резисторе.

*Дано:*  $R_1 = 5,0 \text{ Ом}$ ,  $R_2 = 9,0 \text{ Ом}$ ,  $R_3 = 3,0 \text{ Ом}$ ,  $R_4 = 2,75 \text{ Ом}$  — сопротивления резисторов,  $\mathcal{E} = 1,5 \text{ В}$  — ЭДС элемента,  $r = 0,50 \text{ Ом}$  — внутреннее сопротивление элемента.

*Найти:*  $R$  — общее сопротивление внешней части цепи,  $I$  — силу тока в элементе,  $I_1$  — силу тока в первом резисторе.

*Решение.* Для решения задачи представим схему цепи иначе (см. рисунок б).

Для определения  $R$  найдем сопротивление двух параллельно соединенных резисторов  $R_2$  и  $R_3$ :

$$R' = \frac{R_2 R_3}{R_2 + R_3}.$$

Сопротивления  $R'$  и  $R_4$  соединены последовательно, следовательно,

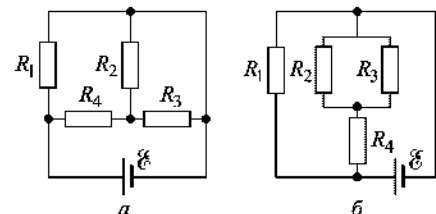
$$R'' = R' + R_4 = \frac{R_2 R_3}{R_2 + R_3} + R_4 = \left( \frac{9,0 \cdot 3,0}{12} + 2,75 \right) \text{ Ом} = 5,0 \text{ Ом}.$$

Резистор  $R_1$  и сопротивление  $R''$  соединены параллельно. Здесь уместно учесть, что эти сопротивления одинаковы, т.е.  $R_1 = R''$ . Поэтому

$$R = \frac{R_1 R''}{R_1 + R''} = \frac{R_1}{2} = 2,5 \text{ Ом}.$$

Силу тока  $I$  определим из закона Ома для всей цепи:

$$I = \frac{\mathcal{E}}{R + r} = \frac{1,5}{2,5 + 0,50} \frac{\text{В}}{\text{Ом}} = 0,50 \text{ А}.$$



К примеру 48

Силы тока в параллельных ветвях обратно пропорциональны сопротивлениям ветвей:

$$\frac{I_1}{I''} = \frac{R''}{R_1}.$$

В данном примере параллельные ветви имеют одинаковые сопротивления; следовательно,  $I_1 = I''$ .

По первому закону Кирхгофа сила тока в неразветвленной части цепи равна сумме сил тока в параллельных ветвях:

$$I = I_1 + I'' = 2I_1;$$

$$I_1 = (0,50/2) \text{ А} = 0,25 \text{ А}.$$

**Ответ:**  $R = 2,5 \text{ Ом}$ ;  $I = 0,50 \text{ А}$ ;  $I_1 = 0,25 \text{ А}$ .

**Пример 49.** В цехе, удаленном от генератора на расстояние 200 м, включены параллельно 22 лампы накаливания сопротивлением 440 Ом и 18 ламп сопротивлением 360 Ом каждая. Номинальное напряжение на лампах 220 В. Проводка выполнена алюминиевым проводом поперечным сечением 27,0 мм<sup>2</sup>. Определить падение напряжения в подводящих проводах, напряжение на зажимах генератора и его ЭДС. Внутреннее сопротивление генератора  $5,4 \cdot 10^{-2} \text{ Ом}$ .

**Дано:**  $L = 200 \text{ м}$  — расстояние от генератора до потребителя;  $n_1 = 22$  — число ламп в одной группе;  $R_1 = 440 \text{ Ом}$  — сопротивление одной лампы в ней;  $n_2 = 18$  — число ламп в другой группе;  $R_2 = 360 \text{ Ом}$  — сопротивление лампы в ней;  $U_{\text{л}} = 220 \text{ В}$  — напряжение на лампах;  $S = 27,0 \text{ мм}^2 = 2,7 \cdot 10^{-5} \text{ м}^2$  — площадь поперечного сечения провода;  $r = 5,4 \cdot 10^{-2} \text{ Ом}$  — внутреннее сопротивление генератора. Из таблиц:  $\rho = 2,7 \cdot 10^{-8} \text{ Ом} \cdot \text{м}$  — удельное сопротивление алюминия.

**Найти:**  $U_{\text{пр}}$  — падение напряжения в проводах;  $U_{\text{г}}$  — напряжение на зажимах генератора;  $\mathcal{E}$  — ЭДС генератора.

**Решение.** В замкнутой цепи ЭДС генератора равна сумме падений напряжения на всех участках цепи (закон Ома для всей цепи):  $\mathcal{E} = U_{\text{г}} + Ir$ , где  $U_{\text{г}} = U_{\text{л}} + U_{\text{пр}}$ .

Используя закон Ома для участка цепи и зная число ламп в каждой группе, можно определить силу тока в неразветвленной части цепи (в подводящем проводе):

$$I = I_1 + I_2 = n_1 \frac{U_{\text{л}}}{R_1} + n_2 \frac{U_{\text{л}}}{R_2} = \left( 22 \cdot \frac{220}{440} + 18 \cdot \frac{220}{360} \right) \frac{\text{В}}{\text{Ом}} = 22 \text{ А.}$$

Сопротивление проводов найдем по формуле

$$R_{\text{пр}} = \rho \frac{l}{S}; \quad \text{здесь } l = 2L.$$

Зная силу тока в подводящих проводах и их сопротивление, определяем падение напряжения в проводах:

$$U_{\text{пр}} = IR_{\text{пр}} = I\rho \frac{l}{S} = \frac{22 \cdot 2,7 \cdot 10^{-8} \cdot 400}{2,7 \cdot 10^{-5}} \frac{\text{А} \cdot \text{Ом} \cdot \text{м} \cdot \text{м}}{\text{м}^2} = 8,8 \text{ В.}$$

Напряжение на зажимах генератора больше напряжения на лампах на падение напряжения в подводящих проводах:

$$U_{\text{г}} = U_{\text{л}} + U_{\text{пр}} = (220 + 8,8) \text{ В} \approx 229 \text{ В,}$$

$$\mathcal{E} = U_{\text{л}} + U_{\text{пр}} + Ir = 220 \text{ В} + 8,8 \text{ В} + 22 \cdot 5,4 \cdot 10^{-2} \text{ А} \cdot \text{Ом} \approx 230 \text{ В.}$$

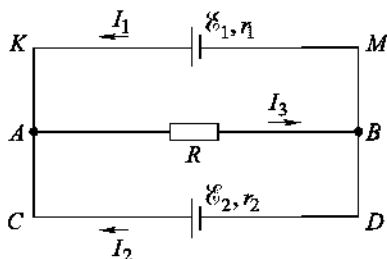
**Ответ:**  $U_{\text{пр}} = 8,8 \text{ В}$ ;  $U_{\text{г}} \approx 229 \text{ В}$ ;  $\mathcal{E} \approx 230 \text{ В}$ .

**Пример 50.** Два элемента с ЭДС 1,6 и 1,3 В и внутренним сопротивлением соответственно 1,0 и 0,50 Ом соединены, как показано на рисунке, и подключены к резистору сопротивлением 0,60 Ом. Определить силу тока во всех ветвях. Сопротивлением соединительных проводов пренебречь.

**Дано:**  $\mathcal{E}_1 = 1,6 \text{ В}$  — ЭДС первого элемента;  $\mathcal{E}_2 = 1,3 \text{ В}$  — ЭДС второго элемента;  $r_1 = 1,0 \text{ Ом}$  и  $r_2 = 0,50 \text{ Ом}$  — внутреннее сопротивление соответственно первого и второго элементов;  $R = 0,60 \text{ Ом}$  — сопротивление резистора.

**Найти:**  $I_1$  — силу тока в первом элементе;  $I_2$  — силу тока во втором элементе;  $I_3$  — силу тока на участке с резистором  $R$ .

**Решение. Первый метод.** Пользуясь законами Кирхгофа и учитывая условно выбранные направления токов (см. рисунок), составляем уравнения для различных участков цепи.



К примеру 50

Для узла  $A$ :

$$I_1 + I_2 = I_3.$$

Для замкнутого контура  $KCDM$ :

$$\mathcal{E}_1 - \mathcal{E}_2 = I_1 r_1 - I_2 r_2.$$

Для замкнутого контура  $KABM$ :

$$\mathcal{E}_1 = I_1 r_1 + I_3 R.$$

Исключив из последнего уравнения значение силы тока  $I_3$  и решив систему уравнений относительно  $I_1$  и  $I_2$ , получим

$$I_1 = \frac{\mathcal{E}_1 r_2 + (\mathcal{E}_1 - \mathcal{E}_2)R}{r_1 R + r_1 r_2 + R r_2}, \quad I_2 = \frac{I_1 r_1 + \mathcal{E}_2 - \mathcal{E}_1}{r_2}.$$

Подставляя числовые значения, находим

$$I_1 = \frac{1,6 \cdot 0,50 + (1,6 - 1,3) \cdot 0,60}{1,0 \cdot 0,60 + 1,0 \cdot 0,50 + 0,60 \cdot 0,50} \frac{\text{В} \cdot \text{Ом}}{\text{Ом}^2} = 0,7 \text{ А},$$

$$I_2 = \frac{0,7 \cdot 1,0 - 0,3}{0,50} \frac{\text{В}}{\text{Ом}} = 0,8 \text{ А},$$

$$I_3 = 0,7 \text{ А} + 0,8 \text{ А} = 1,5 \text{ А}.$$

*Второй метод.* Для решения задачи воспользуемся методом узловых потенциалов. Обозначим потенциал узла  $A$  через  $\varphi_A$ , а потенциал узла  $B$  через  $\varphi_B$  и примем его равным нулю. Тогда  $\varphi_A - \varphi_B = U_{AB}$ . Запишем выражения для силы тока (выбранные направления тока показаны на рисунке), основываясь на законе Ома для участка цепи с ЭДС и без ЭДС:

$$I_1 = \frac{\mathcal{E}_1 - U_{AB}}{r_1}, \quad I_2 = \frac{\mathcal{E}_2 - U_{AB}}{r_2}, \quad I_3 = \frac{U_{AB}}{R}.$$

Так как  $I_1 + I_2 = I_3$ , имеем

$$\frac{\mathcal{E}_1 - U_{AB}}{r_1} + \frac{\mathcal{E}_2 - U_{AB}}{r_2} = \frac{U_{AB}}{R}.$$

Определим  $U_{AB}$ :

$$U_{AB} = \frac{(\mathcal{E}_1 r_2 + \mathcal{E}_2 r_1)R}{r_1 r_2 + (r_1 + r_2)R} = \frac{(1,6 \cdot 0,50 + 1,3 \cdot 1,0) \cdot 0,60}{1,0 \cdot 0,50 + (1,0 + 0,50) \cdot 0,60} \frac{\text{В} \cdot \text{Ом}^2}{\text{Ом}^2} = 0,9 \text{ В}.$$

Теперь находим силу тока в ветвях.

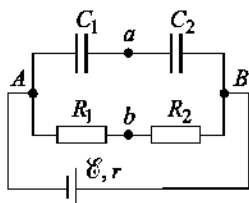
*Ответ:*  $I_1 = 0,7 \text{ А}$ ;  $I_2 = 0,8 \text{ А}$ ;  $I_3 = 1,5 \text{ А}$ .

**Пример 51.** Электрическая цепь, изображенная на рисунке, состоит из источника электрической энергии с ЭДС 12 В и внутренним сопротивлением 1,0 Ом, двух резисторов сопротивлением  $R_1 = 3,0 \text{ Ом}$  и  $R_2 = 6,0 \text{ Ом}$  и двух конденсаторов емкостью  $C_1 = 1,0 \text{ мкФ}$  и  $C_2 = 2,0 \text{ мкФ}$ . Определить разность потенциалов между точками  $a$  и  $b$  и заряд, накопленный каждым конденсатором.

Дано:  $\mathcal{E} = 12 \text{ В}$ ,  $r = 1,0 \text{ Ом}$  — ЭДС и внутреннее сопротивление источника электрической энергии;  $R_1 = 3,0 \text{ Ом}$ ,  $R_2 = 6,0 \text{ Ом}$  — сопротивления резисторов;  $C_1 = 1,0 \cdot 10^{-6} \text{ Ф}$ ,  $C_2 = 2,0 \cdot 10^{-6} \text{ Ф}$  — электрические емкости конденсаторов.

Найти:  $\Delta\varphi$  — разность потенциалов между точками  $a$  и  $b$ ,  $Q$  — электрический заряд, накопленный каждым конденсатором.

Решение. Условимся считать потенциал точки  $A$  равным нулю, а потенциалы точек  $a$  и  $b$  обозначим через  $\varphi_a$  и  $\varphi_b$ , тогда  $\Delta\varphi = \varphi_a - \varphi_b$ . Решение задачи сводится к нахождению  $\varphi_a$  и  $\varphi_b$ . Найдем силу тока в цепи:  $I = \mathcal{E} / (R_1 + R_2 + r)$ . Потенциал точки  $b$  будет выше потенциала точки  $A$  (последний равен нулю), на величину падения напряжения на резисторе  $R_1$ :



К задаче 51

$$\varphi_b = IR_1 = \frac{\mathcal{E}R_1}{R_1 + R_2 + r}.$$

Падение напряжения на участке  $AB$ :

$$U_{AB} = \mathcal{E} - Ir = \frac{\mathcal{E}(R_1 + R_2)}{R_1 + R_2 + r}.$$

Разность потенциалов на двух конденсаторах, соединенных последовательно, будет равна  $U_{AB}$ . Учитывая способ соединения конденсаторов, заметим, что заряд у них будет одинаков и равен:

$$Q = U_{AB} \frac{C_1 C_2}{C_1 + C_2} = \frac{\mathcal{E}(R_1 + R_2)C_1 C_2}{(R_1 + R_2 + r)(C_1 + C_2)}.$$

Зная заряд и емкость первого конденсатора, можно определить разность потенциалов на его обкладках, а следовательно,  $\varphi_a$ .

Выразим  $\Delta\varphi$  и найдем его числовое значение:

$$\begin{aligned} \Delta\varphi &= \frac{\mathcal{E}(R_1 + R_2)C_2}{(R_1 + R_2 + r)(C_1 + C_2)} - \frac{\mathcal{E}R_1}{R_1 + R_2 + r} = \mathcal{E} \frac{R_2 C_2 - R_1 C_2}{(R_1 + R_2 + r)(C_1 + C_2)} = \\ &= 12 \cdot \frac{6,0 \cdot 2,0 \cdot 10^{-6} - 3,0 \cdot 1,0 \cdot 10^{-6}}{(3,0 + 6,0 + 1,0) \cdot 3,0 \cdot 10^{-6}} \frac{\text{В} \cdot \text{Ом} \cdot \text{Ф}}{\text{Ом} \cdot \text{Ф}} = 3,6 \text{ В}. \end{aligned}$$

Найдем электрический заряд, накопленный конденсатором:

$$Q = \frac{12 \cdot 9,0 \cdot 1,0 \cdot 10^{-6} \cdot 2,0 \cdot 10^{-6}}{10,0 \cdot 3,0 \cdot 10^{-6}} \frac{\text{В} \cdot \text{Ом} \cdot \text{Ф}^2}{\text{Ом} \cdot \text{Ф}} = 7,2 \cdot 10^{-6} \text{ Кл} = 7,2 \text{ мКл}.$$

Ответ:  $\Delta\varphi = 3,6 \text{ В}$ ;  $Q = 7,2 \text{ мКл}$ .

**11.1.** Что покажет гальванометр, если через него за 10 мин пройдет 18 Кл электричества? Сколько электронов должно пройти за 1,0 с через поперечное сечение проводника, чтобы включенный в цепь гальванометр показал 1,0 мА?

**11.2.** Электрический камин работает от сети напряжением 120 В. Какое количество электричества проходит через поперечное сечение его нагревательного элемента за 1,0 ч, если при этом выделяется энергия 0,60 МДж? При какой силе тока работает камин?

**11.3.** Электрический нагреватель работает от сети напряжением 120 В. Какая энергия расходуется в нагревателе, если за 18 мин через него проходит  $3,0 \cdot 10^{22}$  электронов? Определить силу тока в цепи и сопротивление нагревательного элемента в рабочем состоянии.

**11.4.** Электрический утюг работает от сети напряжением 220 В при силе тока 1,5 А. Какой электрический заряд проходит через поперечное сечение его нагревательного элемента за 15 мин и какая энергия при этом расходуется?

**11.5.** Определить электрическую емкость одного конденсатора, если зарядка батареи, составленной из четырех одинаковых, соединенных параллельно конденсаторов, до напряжения 1 кВ при силе тока 0,2 А продолжалась 0,4 мс. Силу тока в процессе зарядки считать неизменной.

**11.6.** Сила тока на участке цепи равномерно возрастает от 0 до 1,5 А за 6,0 с. Построить график зависимости силы тока от времени и по нему определить количество электричества, протекающего через поперечное сечение проводника за то же время.

**11.7.** Сила тока на участке цепи меняется по закону  $I = 1,5 + 0,5t$ . Построить график, соответствующий этому закону, и по нему определить количество электронов, прошедших по цепи за первые 5,0 с.

**11.8.** При получении электролитической меди в качестве катода используется пластина, рабочая площадь которой 80 дм<sup>2</sup>. При какой плотности тока протекает процесс, если сила тока в цепи равна 160 А?

**11.9.** Определить плотность электрического тока, если за 0,40 с через проводник поперечным сечением 1,2 см<sup>2</sup> проходит  $6,0 \cdot 10^{18}$  свободных электронов.

**11.10.** Сила электрического тока в проводнике поперечным сечением 1,5 мм<sup>2</sup> равна 0,36 А. Определить среднюю скорость направленного движения свободных электронов, если их концентрация в веществе  $6,0 \cdot 10^{27}$  м<sup>-3</sup>.

**11.11.** Средняя скорость упорядоченного движения свободных электронов в медном проводнике поперечным сечением 1,0 мм<sup>2</sup> равна  $7,4 \cdot 10^{-3}$  см/с. Какова сила тока в проводнике при условии, что из каждого атома меди освобождаются два свободных электрона.

**11.12.** Определить силу тока, создаваемого электроном в атоме водорода при движении электрона по орбите радиусом  $5,29 \cdot 10^{-9}$  см.

**11.13.** При средней скорости дрейфа свободных электронов 0,14 мм/с плотность тока в металлическом проводнике равна 1,32 А/дм<sup>2</sup>. Определить концентрацию свободных электронов.

**11.14.** Определить напряженность поля в железном проводнике поперечным сечением 3,3 мм<sup>2</sup> при силе тока в нем 1,0 А.



**11.15.** На участке цепи сопротивлением  $2,5 \text{ Ом}$  напряжение линейно возрастает от  $1,5$  до  $7,5 \text{ В}$ . Начертить график изменения силы тока  $I = f(U)$ .

**11.16.** С какой целью на стыках рельсов электрифицированных железных дорог делают толстые перемычки из медного провода?

**11.17.** Для изготовления нагревательного элемента электрической печи взят константановый провод длиной  $24,2 \text{ м}$  и диаметром  $0,85 \text{ мм}$ . Определить его сопротивление.

**11.18.** Какой длины необходимо взять нихромовый провод диаметром  $0,50 \text{ мм}$ , чтобы его сопротивление было  $18,3 \text{ Ом}$ ?

**11.19.** Электрическая проводка выполнена медным проводом длиной  $240 \text{ м}$  и поперечным сечением  $8,0 \text{ мм}^2$ . Каково сопротивление проводки? Какой площади поперечного сечения должен быть провод из алюминия, чтобы сопротивление проводки не изменилось?

**11.20.** Эталоном сопротивления в  $1,0 \text{ Ом}$  является катушка, в которой на цилиндрический каркас диаметром  $2,0 \text{ см}$  намотан манганиновый провод поперечным сечением  $0,70 \text{ мм}^2$ . Определить число витков в катушке.

**11.21.** Найти отношение сопротивлений двух железных проволок одинаковой массы с диаметром первой в два раза большим, чем у второй, и двух проводников — медного и алюминиевого — одинаковых массы и диаметра.

**11.22.** Сколько витков никелинового провода необходимо намотать на керамический цилиндр диаметром  $3,0 \text{ см}$ , чтобы изготовить реостат с максимальным сопротивлением  $6,0 \text{ Ом}$ ? Диаметр провода  $0,6 \text{ мм}$ .

**11.23.** На изготовление провода поперечным сечением  $6,0 \text{ мм}$  израсходовано  $540 \text{ г}$  алюминия. Определить длину и сопротивление провода.

**11.24.** Сколько по весу меди потребуется для изготовления провода поперечным сечением  $0,50 \text{ мм}^2$ , чтобы его сопротивление было  $1,72 \text{ Ом}$ ?

**11.25.** Медный провод длиной  $5,0 \text{ км}$  имеет сопротивление  $12 \text{ Ом}$ . Сколько килограммов меди потребовалось для его изготовления?

**11.26.** Определить падение напряжения в линии электропередачи длиной  $500 \text{ м}$  при силе тока в ней  $15 \text{ А}$ . Проводка выполнена алюминиевым проводом поперечным сечением  $14 \text{ мм}^2$ .

**11.27.** Падение напряжения на полностью введенном реостате при силе тока в цепи  $1,5 \text{ А}$  составляет  $9,0 \text{ В}$ . Определить максимальное сопротивление реостата и длину никелинового провода диаметром  $0,80 \text{ мм}$ , пошедшего на его изготовление.

**11.28.** Определить падение напряжения на полностью введенном реостате, изготовленном из никелинового провода длиной  $7,5 \text{ м}$ , если плотность тока в цепи равна  $1,5 \text{ А/мм}^2$ .

**11.29.** Какого диаметра следует взять алюминиевый провод длиной  $2,1 \text{ км}$ , чтобы падение напряжения на нем было  $1,5 \text{ В}$  при силе тока  $1,0 \text{ А}$ ?

**11.30.** Сопротивление провода из фехраля (дешевый заменитель нихрома) длиной 2,5 м и поперечным сечением  $0,50 \text{ мм}^2$  равно 5,47 Ом. Определить удельное сопротивление фехраля. Сколько метров такого провода потребуется для изготовления электрического нагревателя, работающего при силе тока 3,0 А от сети с напряжением 220 В?

**11.31.** Не сматывая с катушки, покрытой изоляцией, нихромовый провод, определить его длину, если при подключении катушки к сети напряжением 120 В в ней возникает сила тока 1,2 А. Площадь поперечного сечения провода  $0,55 \text{ мм}^2$ .

**11.32.** При включении в электрическую цепь проводника диаметром 0,50 мм и длиной 4,5 м разность потенциалов на его концах оказалась равной 1,2 В при силе тока 1,0 А. Каково удельное сопротивление материала проводника?

**11.33.** Реостат сделан из никелинового провода длиной 15 м и поперечным сечением  $1,0 \text{ мм}^2$ . Какая сила тока будет в полностью включенном реостате, если напряжение на его зажимах поддерживать равным 12 В? Каково сопротивление реостата?

**11.34.** Почему на электростанциях для подводки тока от генератора к повышающим трансформаторам используют не круглые провода, а специальные плоские шины?

**11.35.** Почему пусковой ток в лампе накаливания больше рабочего?

**11.36.** Для изготовления эталонов сопротивления используются такие сплавы, как константан и манганин. Почему?

**11.37.** Почему в таблицах для температурных коэффициентов сопротивления некоторых веществ нет чистых металлов?

**11.38.** Вольфрамовая нить электрической лампы накаливания при комнатной температуре ( $20^\circ\text{C}$ ) имеет сопротивление 46 Ом. Каким будет сопротивление нити в рабочем состоянии лампы, если температура накала  $2100^\circ\text{C}$ ?

**11.39.** Нагревательный элемент из фехраля при температуре  $18^\circ\text{C}$  имеет сопротивление 15 Ом. При какой температуре его сопротивление станет равным 15,3 Ом?

**11.40.** Сопротивление реостата при температуре  $20^\circ\text{C}$  равно 15 Ом. Его обмотка выполнена из реотана (сплав цинка, меди, марганца). На сколько увеличится сопротивление реостата, если он нагреется до температуры  $100^\circ\text{C}$ ?

**11.41.** Лампочка накаливания с вольфрамовой нитью работает при силе тока 0,40 А от сети напряжением 120 В. Определить температуру нити лампы в рабочем состоянии, если при температуре  $20^\circ\text{C}$  ее сопротивление равно 30 Ом.

**11.42.** На лампочке для карманного фонаря написано: 3,5 В, 0,28 А. Температура накала нити  $425^\circ\text{C}$ , а сопротивление в холодном состоянии 4,0 Ом. Каков температурный коэффициент сопротивления материала, из которого изготовлена нить?

**11.43.** Сопротивление угольного стержня уменьшилось от 5,0 до 4,5 Ом при повышении температуры от  $50$  до  $545^\circ\text{C}$ . Каков темпе-

ратурный коэффициент сопротивления угля? На что указывает знак в ответе?

**11.44.** Железный провод длиной 9,7 м, навитый на фарфоровый цилиндр, при подключении в цепь с напряжением 1,2 В нагрелся на 60 °С. Определить плотность тока при этой температуре.  $\alpha = 4 \cdot 10^{-3} \text{ K}^{-1}$ .

**11.45.** Константовый провод, предназначенный для изготовления термопары, имеет массу 89 г и поперечное сечение 0,10 мм<sup>2</sup>. Определить сопротивление провода при температуре 100 °С. Зависимость длины провода от температуры не учитывать.

**11.46.** Сопротивление вольфрамовой нити электрической лампы в накаливаемом состоянии в 10 раз больше, чем при температуре 15 °С. Найти температурный коэффициент сопротивления вольфрама, если температура накала нити равна 1950 °С.

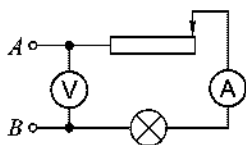
**11.47.** Вольфрамовая нить электрической лампочки накаливается до температуры 2000 °С при плотности тока  $6,0 \cdot 10^8 \text{ A/m}^2$ . Определить напряженность электрического поля в раскаленной нити.

**11.48.** В сеть с напряжением 120 В последовательно включены три резистора: 5,0, 7,0 и 18 Ом. Определить общее (эквивалентное) сопротивление цепи и силу тока в ней. Сопротивление соединительных проводов не учитывать.

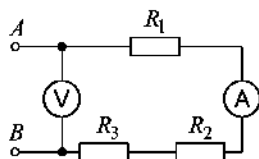
**11.49.** Елочная гирлянда, в которой лампочки соединены последовательно, подключена к сети напряжением 126 В. Сопротивление одной лампочки 6,2 Ом, сила тока в ней 0,5 А; падение напряжения в соединительных проводах 2,0 В. Из скольких лампочек состоит гирлянда?

**11.50.** Цепь составлена, как показано на рисунке, и подключена к источнику постоянного напряжения 24 В. Определить сопротивление лампочки и реостата, если наименьшее и наибольшее значения силы тока в цепи соответственно равны 0,30 и 0,32 А. Сопротивление соединительных проводов не учитывать.

**11.51.** Проекционная лампа, рассчитанная на напряжение 110 В и силу тока 3,0 А, подключается к сети с постоянным напряжением 127 В (см. рисунок к задаче 11.50) через полностью включенный реостат. Определить сопротивление реостата и длину медных подводящих проводов поперечным сечением 1,8 мм<sup>2</sup>, если падение напряжения в них составляет 2 % напряжения в сети.



К задаче 11.50



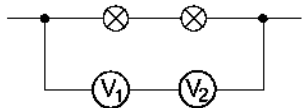
К задаче 11.52

**11.52.** В цепи, составленной по схеме, изображенной на рисунке, амперметр показывает 1,5 А. Падение напряжения на первом резисторе 4,2 В, а сопротивление второго и третьего соответственно 2,0 и 3,2 Ом.

Определить сопротивление первого резистора, общее сопротивление цепи и падение напряжения на ней. Сопротивление амперметра и соединительных проводов пренебрежимо мало.

**11.53.** На рисунке к задаче 11.52 изображена схема цепи, в которой резисторы имеют сопротивления:  $R_1 = 5,0$ ,  $R_2 = 7,0$  и  $R_3 = 18$  Ом. Вольтметр, подключенный к точкам  $A$  и  $B$ , показывает 120 В. Каково сопротивление всей цепи? Как распределилось напряжение на резисторах? Сопротивление соединительных проводов и амперметра не учитывать.

**11.54.** К двум последовательно соединенным лампам подключили вольтметры, как показано на рисунке. Первый из них показал 6,0 В, а второй — 20 В. Сопротивление первого вольтметра равно 4,0 кОм. Каково сопротивление второго вольтметра?



К задаче 11.54

**11.55.** Электродвигатель удален от генератора на 1,57 км и работает при напряжении 220 В и силе тока 15 А. Сколько по весу меди потребуется для подводящих проводов и каким должно быть напряжение на зажимах генератора? Диаметр провода 5,0 мм. Годится ли такая проводка, если учесть, что падение напряжения в силовых линиях не должно превышать 10% напряжения на зажимах генератора?

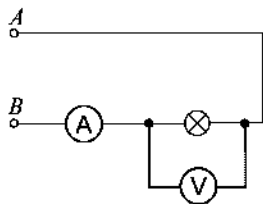
**11.56.** Три проводника, изготовленные из одного материала, имеют одинаковую длину, соединены последовательно и подключены к источнику напряжения 120 В. Площади их поперечного сечения относятся, как 1 : 1,5 : 3. Определить падение напряжения на каждом проводнике.

**11.57.** Во сколько раз изменится цена деления шкалы вольтметра, сопротивление которого 2,0 кОм, если последовательно с ним включить сопротивление 8,0 кОм?

**11.58.** Вольтметр, изготовленный для измерения напряжений до 5,0 В, включается в сеть напряжением 24 В последовательно с дополнительным сопротивлением. Определить это сопротивление, если максимальная сила тока через вольтметр не должна превышать 5,0 мА.

**11.59.** Вольтметр, включенный последовательно с дополнительным сопротивлением 1,4 кОм в цепь напряжением 12 В, показывает 5,0 В. Что покажет вольтметр, если в той же цепи дополнительное сопротивление заменить на другое, равное 3,0 кОм? Какая потребуется поправка для определения цены деления шкалы прибора?

**11.60.** Вольтметр, включенный параллельно с лампочкой от карманного фонаря (см. рисунок), показал 3,6 В. Сопротивление вольтметра 60 Ом, а лампочки 12 Ом. Что показывает амперметр?



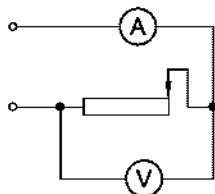
К задаче 11.60

**11.61.** К потенциометру <sup>\*</sup>), сопротивление которого  $6,0 \text{ кОм}$ , приложено напряжение  $120 \text{ В}$ . Между движком и одним концом потенциометра включен вольтметр (см. рисунок), сопротивление которого равно  $10 \text{ кОм}$ . Что покажет вольтметр, когда движок будет стоять посредине потенциометра?

**11.62.** Для измерения напряжения в сети в нее включают вольтметр с сопротивлением  $450 \text{ Ом}$ . Если последовательно с вольтметром включить дополнительное сопротивление, он покажет  $100 \text{ В}$ ; если включить еще одно дополнительное сопротивление, большее первого на  $60 \text{ Ом}$ , вольтметр покажет  $90 \text{ В}$ . Определить напряжение в сети и дополнительные сопротивления.

**11.63.** Какой резистор и как его нужно подключить к резистору  $15 \text{ Ом}$ , чтобы получить сопротивление  $10 \text{ Ом}$ ?

**11.64.** Цепь составлена, как показано на рисунке. Сила тока в цепи  $0,48 \text{ А}$ , а вольтметр, внутреннее сопротивление которого  $120 \text{ Ом}$ , показывает  $9,6 \text{ В}$ . Определить сопротивление реостата.



К задаче 11.64

**11.65.** Доказать, что общее (эквивалентное) сопротивление при параллельном соединении  $n$  различных резисторов всегда меньше наименьшего сопротивления резистора.

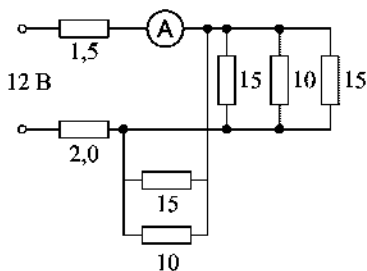
**11.66.** Как и во сколько раз изменится сопротивление проводника, если его разрезать на  $n$  равных частей, после чего соединить их параллельно?

**11.67.** Какие сопротивления можно получить, имея три резистора по  $3,0 \text{ Ом}$  каждый?

**11.68 \*\*).** Цепь составлена по схеме, изображенной на рисунке. Найти общее (эквивалентное) сопротивление и показание амперметра. Сопротивление соединительных проводов не учитывать.

**11.69.** Каково сопротивление каждого из двух резисторов, если при их последовательном соединении получается сопротивление  $20 \text{ Ом}$ , а при параллельном —  $5,0 \text{ Ом}$ ?

**11.70.** Сопротивление резисторов, соединенных последовательно, равно  $15 \text{ Ом}$ . Если два этих резистора соединить параллельно, получается сопротивление  $3,6 \text{ Ом}$ . Определить их сопротивления.

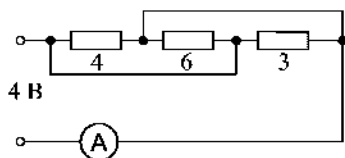


К задаче 11.68

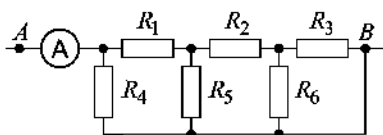
<sup>\*</sup>) Потенциометр предназначен для измерения ЭДС и напряжения, а также величин, функционально с ними связанных.

<sup>\*\*</sup>) Здесь и далее в этом параграфе цифры на рисунках обозначают сопротивления элементов схем, выраженные в омах.

**11.71.** Электрическая цепь составлена по схеме, изображенной на рисунке. Не учитывая сопротивления соединительных проводов, определить эквивалентное сопротивление и показание амперметра.



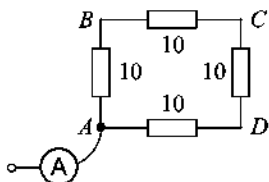
К задаче 11.71



К задаче 11.72

**11.72.** Электрическая цепь составлена по схеме, изображенной на рисунке. Сопротивление резисторов:  $R_1 = 1,6 \text{ Ом}$ ,  $R_2 = 3,0 \text{ Ом}$ ,  $R_3 = R_6 = 2,0 \text{ Ом}$ ,  $R_4 = 1,0 \text{ Ом}$ ,  $R_5 = 6,0 \text{ Ом}$ . Напряжение  $U_{AB} = 2,0 \text{ В}$ . Определить общее сопротивление цепи, силу тока в резисторах  $R_1$  и  $R_4$ , падение напряжения на резисторе  $R_5$ .

**11.73.** Электрическая цепь составлена по схеме, изображенной на рисунке к задаче 11.72. Амперметр показывает  $1,8 \text{ А}$ . Сила тока в резисторах  $R_4$  и  $R_5$  одинакова и равна  $0,6 \text{ А}$ . Падение напряжения на резисторе  $R_1$  равно  $2,4 \text{ В}$ , на  $R_2 - 1,8 \text{ В}$ . Сопротивление резистора  $R_4$  равно  $10 \text{ Ом}$ . Определить напряжение в сети  $U_{AB}$  и сопротивления резисторов  $R_1$ ,  $R_2$ ,  $R_5$  и  $R_3 = R_6$ .



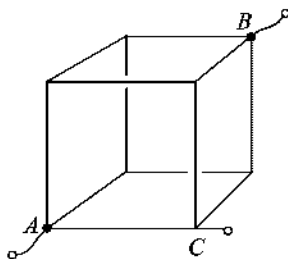
К задаче 11.74

**11.74.** Четыре одинаковых резистора по  $10 \text{ Ом}$  каждый соединены, как показано на рисунке. Сила тока, показанная амперметром, равна  $2,0 \text{ А}$ . Определить общее сопротивление и падение напряжения в цепи, если ток подведен к точкам  $A$  и  $C$ , к точкам  $A$  и  $D$ .

**11.75.** Определить напряжение между точками  $A$  и  $B$  (см. рисунок) проволочного каркаса, имеющего форму куба, ребро которого имеет сопротивление  $6,0 \text{ Ом}$ , если сила тока в подводящем проводе составляет  $2,0 \text{ А}$ . Найти сопротивление куба.

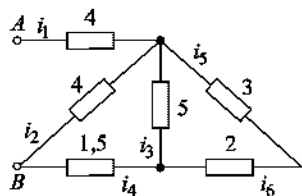
**11.76.** Определить сопротивление проволочного каркаса, имеющего форму куба (см. рисунок к задаче 11.75), если ток будет подведен к точкам  $A$  и  $C$ .

**11.77.** Найти общее сопротивление и силу тока в отдельных резисторах, соединенных по схеме, приведенной на рисунке, если напряжение на зажимах  $A$  и  $B$  равно  $12 \text{ В}$ .  $R_1 = R_2 = 4 \text{ Ом}$ ;  $R_3 = 5 \text{ Ом}$ ;  $R_4 = 1,5 \text{ Ом}$ ;  $R_5 = 3 \text{ Ом}$ ;  $R_6 = 2 \text{ Ом}$ .

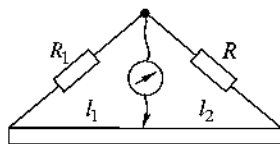


К задаче 11.75

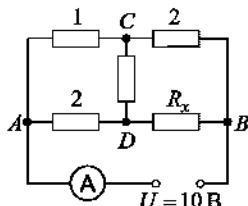
**11.78.** Определить сопротивление  $R$ , определяемое мостиком Уинстона (см. рисунок), если при  $R_1 = 1,5 \text{ Ом}$ ,  $l_1 = 20 \text{ см}$ ,  $l_2 = 80 \text{ см}$  ток через гальванометр не идет.



К задаче 11.77



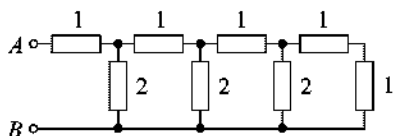
К задаче 11.78



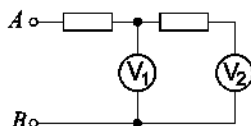
К задаче 11.79

**11.79.** Какое сопротивление должен иметь резистор  $R_x$ , чтобы в цепи, схема которой показана на рисунке, сила тока на участке  $CD$  была равна нулю? Что покажет амперметр?

**11.80.** Определить силу тока в неразветвленной части цепи, схема которой показана на рисунке, если напряжение в сети  $U_{AB} = 6 \text{ В}$ . Сопротивления резисторов показаны на схеме.



К задаче 11.80



К задаче 11.81

**11.81.** В схеме цепи, изображенной на рисунке, имеются два одинаковых резистора и два одинаковых вольтметра. Определить показание первого вольтметра, если второй показывает  $4,0 \text{ В}$ , а напряжение в точках  $A$  и  $B$  равно  $6,0 \text{ В}$ .

**11.82.** 60 ламп накаливания с сопротивлением  $225 \text{ Ом}$  каждая включены параллельно в сеть напряжением  $127 \text{ В}$ . Сопротивление подводящих проводов  $0,20 \text{ Ом}$ . Найти общую силу тока в лампах и падение напряжения в подводящих проводах.

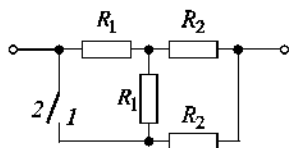
**11.83.** В сеть напряжением  $220 \text{ В}$  параллельно включены две группы ламп. В одной группе 8 ламп сопротивлением  $160 \text{ Ом}$  каждая; в другой — 10 ламп по  $200 \text{ Ом}$  каждая. Определить эквивалентное сопротивление цепи и общую силу тока.

**11.84.** Генератор тока, напряжение на зажимах которого  $140 \text{ В}$ , рассчитан на силу тока  $50 \text{ А}$ . Сколько нормально горящих ламп, соединенных параллельно, может питать генератор, если сопротивление одной лампы  $140 \text{ Ом}$ , а подводящие провода имеют сопротивление  $0,30 \text{ Ом}$ ? При каком напряжении горят лампы?

**11.85.** Определить силу тока в магистральном проводе, если амперметр, снабженный шунтом с сопротивлением  $0,04 \text{ Ом}$ , показывает  $5 \text{ А}$ . Сопротивление амперметра равно  $0,12 \text{ Ом}$ .

**11.86.** Чувствительность гальванометра, имеющего сопротивление 260 Ом, необходимо уменьшить в 10 раз. Каким в этом случае должно быть сопротивление шунта?

**11.87.** Амперметр, рассчитанный на измерение предельной силы тока 10 А, включают посредством шунта в цепь, где сила тока достигает 100 А. Сопротивление амперметра 0,90 Ом. Определить длину железного проводника поперечным сечением 0,28 мм<sup>2</sup>, необходимого для изготовления шунта.



К задаче 11.88

**11.88.** Каким будет сопротивление цепи, схема которой показана на рисунке, если ключ находится в положении 1? в положении 2? Сопротивления резисторов  $R_1 = 3,0$  Ом,  $R_2 = 6,0$  Ом.

**11.89.** К зажимам источника тока, ЭДС и внутреннее сопротивление которого 4,5 В и 1,5 Ом, присоединили резистор сопротивлением 7,5 Ом. Определить силу тока в цепи и падение напряжения внутри источника тока.

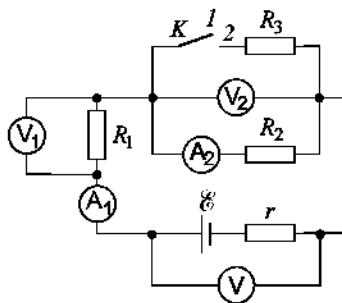
**11.90.** К генератору, ЭДС которого 120 В, присоединили нагревательный элемент сопротивлением 38 Ом. Определить внутреннее сопротивление генератора и напряжение на его зажимах, если сила тока в цепи 3,0 А.

**11.91.** К аккумулятору с ЭДС 2,0 В и внутренним сопротивлением 0,20 Ом подключили резистор. Определить сопротивление резистора и падение напряжения на нем, если сила тока в цепи 0,40 А.

**11.92.** При замыкании аккумулятора на резистор сопротивлением 9,6 Ом сила тока в цепи оказалась 0,2 А. После того как сопротивление внешней цепи уменьшили на 2,0 Ом, сила тока возросла до 0,25 А. Определить ЭДС и внутреннее сопротивление аккумулятора.

**11.93.** С подключением гальванического элемента к цепи с сопротивлением 1,0 Ом напряжение на его зажимах оказалось 1,0 В. Когда сопротивление внешней цепи увеличили в 2,5 раза, напряжение увеличилось на 0,25 В. Чему равны ЭДС и внутреннее сопротивление элемента?

**11.94.** Дана схема цепи, изображенная на рисунке. Какие произойдут изменения в показаниях приборов после замыкания ключа  $K$ ?



К задаче 11.94

**11.95.** При каких условиях напряжение на зажимах источника тока будет составлять 50 % его ЭДС?

**11.96.** Источник тока с ЭДС  $\mathcal{E}$  и внутренним сопротивлением  $r$  замкнут на резистор сопротивлением  $R$ . Показать на графиках зависи-



мость силы тока в цепи и напряжения на зажимах источника тока от нагрузки  $R$ .

**11.97.** Батарейка от карманного фонаря с ЭДС 4,5 В при замыкании на сопротивление 7,5 Ом создает в цепи силу тока 0,50 А. Определить силу тока при коротком замыкании.

**11.98.** ЭДС источника тока равна 1,5 В. Определить сопротивление нагрузки, при которой сила тока в цепи будет 0,6 А, если при коротком замыкании она равна 2,5 А.

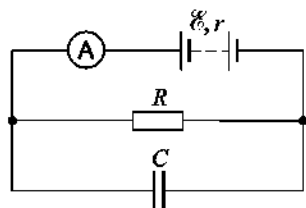
**11.99.** Вольтметр, подключенный к зажимам источника тока, показывает 1,8 В при силе тока в цепи 2,0 А и 1,83 В при силе тока 1,4 А. Определить внутреннее сопротивление источника тока, его ЭДС и силу тока при коротком замыкании.

**11.100.** Вольтметр, подключенный к зажимам источника тока, показывает 7,0 В, если сопротивление внешней цепи  $R$ , и 9,0 В, когда оно возрастает в три раза. Определить внутреннее сопротивление источника тока, его ЭДС и сопротивление  $R$ , если сила тока при коротком замыкании равна 21 А.

**11.101.** Источник электрической энергии с внутренним сопротивлением 0,50 Ом замкнут никелиновым проводником длиной 12,5 м и поперечным сечением 0,50 мм<sup>2</sup>. Определить силу тока в цепи и ЭДС источника тока, если напряжение на его зажимах равно 5,25 В.

**11.102.** Каким должен быть диаметр железного проводника длиной 5,0 м, чтобы, замкнув им гальванический элемент с ЭДС 1,5 В и внутренним сопротивлением 0,20 Ом, получить силу тока 0,60 А?

**11.103.** Источник тока с ЭДС 6,0 В и внутренним сопротивлением 1,2 Ом включен в цепь, схема которой показана на рисунке. Амперметр показывает 1,0 А. Определить сопротивление резистора  $R$  и напряженность поля внутри плоского конденсатора, расстояние между пластинами которого 0,32 см.



К задаче 11.103

**11.104.** Плоский конденсатор емкостью 0,20 мкФ и резистор сопротивлением 4,0 Ом соединены параллельно и подключены к источнику тока с ЭДС 4,0 В и внутренним сопротивлением 1,0 Ом (см. рисунок к задаче 11.103). Определить электрический заряд конденсатора.

**11.105.** Каков КПД гальванического элемента с ЭДС 1,5 В и внутренним сопротивлением 0,3 Ом, если создаваемая им сила тока в цепи составляет 2,0 А?

**11.106.** С каким КПД работает гальванический элемент с внутренним сопротивлением 0,80 Ом, если он замкнут на резистор 4,0 Ом?

**11.107.** При увеличении внешнего сопротивления от 4,0 до 12 Ом КПД источника возрастает в 1,5 раза. Определить внутреннее сопротивление источника тока.

**11.108.** КПД источника тока при замыкании на резистор сопротивлением  $R$  равен  $\eta$ . Как и на сколько изменится КПД источника, если сопротивление резистора увеличить в  $n$  раз?

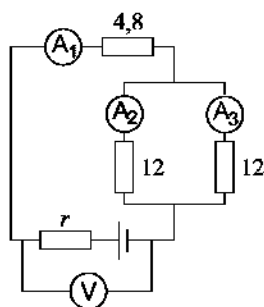
**11.109.** Цепь, схема которой показана на рисунке к задаче 11.94, питается от источника тока с ЭДС 6,0 В. Определить сопротивление резистора  $R_3$ , общее сопротивление внешней цепи и внутреннее сопротивление источника тока, если ключ  $K$  находится в положении 2, а  $I_1 = 1,2$  А,  $I_2 = 0,48$  А,  $R_1 = 2,0$  Ом и  $R_2 = 6,0$  Ом.

**11.110.** В цепи, схема которой показана на рисунке к задаче 11.94, ключ находится в положении 1. Определить общее сопротивление внешней части цепи, показания амперметра  $A_1$  и вольтметра  $V_1$ . Необходимые данные использовать из условия задачи 11.109 и ответов к ней.

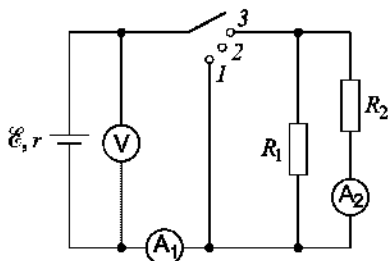
**11.111.** Генератор тока с ЭДС 132 В и внутренним сопротивлением 0,40 Ом дает ток для питания 50 параллельно соединенных ламп сопротивлением 180 Ом каждая. Определить силу тока в цепи. Как и во сколько раз изменится сила тока, если нагрузку увеличить вдвое?

**11.112.** Внутреннее сопротивление генератора тока равно 0,20 Ом, а напряжение на его зажимах 110 В. Внешняя цепь состоит из 100 параллельно соединенных ламп сопротивлением 400 Ом каждая. Определить ЭДС генератора, не учитывая сопротивления подводящих проводов.

**11.113.** На рисунке изображена схема цепи, которую питает источник тока с  $\mathcal{E} = 6,0$  В и внутренним сопротивлением  $r = 1,2$  Ом. Сопротивления резисторов обозначены на схеме. Определить показания приборов и падение напряжения внутри источника тока.



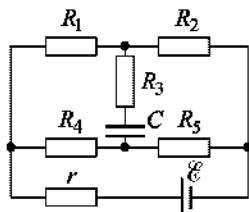
К задаче 11.113



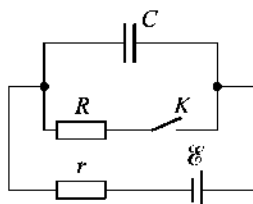
К задаче 11.114

**11.114.** Что покажут амперметры и вольтметр (см. рисунок) при положениях переключателя 1, 2, 3, если ЭДС источника  $\mathcal{E} = 6,0$  В, его внутреннее сопротивление  $r = 1,2$  Ом, сопротивление резисторов  $R_1 = 8,0$  Ом и  $R_2 = 4,8$  Ом. Сопротивление соединительных проводов и амперметров пренебрежимо мало, а у вольтметра очень велико.

**11.115.** Источник тока с ЭДС 14 В и внутренним сопротивлением 1,0 Ом питает цепь, схема которой показана на рисунке. Определить электрическую емкость конденсатора, если известно, что заряд, накопленный им, равен 40 мкКл, а резисторы имеют сопротивления  $R_1 = R_3 = R_5 = 15 \text{ Ом}$  и  $R_2 = R_4 = 25 \text{ Ом}$ .



К задаче 11.115



К задаче 11.116

**11.116.** Цепь собрана по схеме, изображенной на рисунке. Сопротивление резистора  $R = 6,0 \text{ Ом}$ . Определить внутреннее сопротивление источника тока, если после размыкания ключа  $K$  заряд конденсатора увеличился в 1,15 раза.

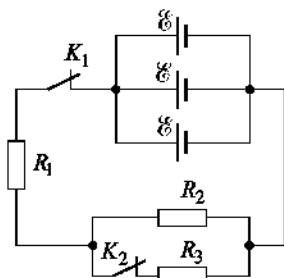
**11.117.** Плоский воздушный конденсатор с квадратными пластинами погружается в жидкий диэлектрик со скоростью 0,60 м/с так, что пластины перпендикулярны уровню жидкости. Конденсатор подключен к источнику тока с ЭДС 200 В. Расстояние между пластинами равно 1,5 мм, их площадь равна  $225 \text{ см}^2$ . Определить силу тока в соединительных проводах. Диэлектрическую проницаемость среды принять равной 39. Внутреннее сопротивление источника тока не учитывать.

**11.118.** Для определения ЭДС аккумулятора можно воспользоваться эталонным элементом. Если аккумулятор включить последовательно с эталонным элементом, ЭДС которого равна 2 В, сила тока в цепи становится равной 0,3 А. При последовательном включении того же аккумулятора навстречу эталонному элементу сила тока во внешней цепи уменьшается до 0,1 А и ток при этом направлен от положительного полюса аккумулятора к отрицательному. Определить ЭДС аккумулятора.

**11.119.** В батарейке для карманного фонаря каждый из трех последовательно соединенных элементов имеет ЭДС 1,5 В и внутреннее сопротивление 0,20 Ом. Батарейка питает лампочку сопротивлением 11,4 Ом. Определить силу тока в лампочке и напряжение на зажимах батарейки.

**11.120.** Три гальванических элемента с ЭДС 1,5 В и внутренним сопротивлением 0,40 Ом каждый соединены последовательно и замкнуты на резистор, изготовленный из никелинового провода поперечным сечением  $0,40 \text{ мм}^2$ . Чему равно сопротивление резистора и какова длина провода, пошедшего на его изготовление, если сила тока в цепи равна 1,2 А?

**11.121.** Батарея, составленная из трех параллельно соединенных элементов с ЭДС 1,4 В и внутренним сопротивлением 0,60 Ом каждый, питает цепь, схема которой показана на рисунке. Определить силу тока в резисторах  $R_1$ ,  $R_2$  и напряжение на зажимах источника тока, если  $R_1 = 2,0$  и  $R_2 = R_3 = 1,2$  Ом.



К задаче 11.121

**11.122.** Цепь составлена, как показано на рисунке к задаче 11.121. Определить силу тока в цепи после размыкания ключа  $K_2$  и падение напряжения внутри источника тока.

**11.123.** Несколько одинаковых источников тока питают электрическую цепь. При каких условиях более выгодно последовательное соединение источников тока в батарею и при каких параллельное?

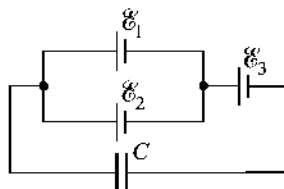
**11.124.** Имеется шесть одинаковых аккумуляторов. При каком соединении их в батарею сила тока при коротком замыкании будет в два, три, шесть раз больше, чем от одного аккумулятора?

**11.125.** При каком способе соединения трех одинаковых источников тока, ЭДС и внутреннее сопротивление каждого из которых равны 1,45 В и 0,90 Ом, сила тока во внешней цепи может быть максимальной? Внешняя цепь представлена резистором сопротивлением 2,4 Ом.

**11.126.** При каком соотношении сопротивлений внешней части цепи и источника тока сила тока не зависит от способа соединения элементов в батарею?

**11.127.** Батарея, состоящая из шести элементов, соединенных по три последовательно в две параллельные группы, присоединена к двум параллельно соединенным резисторам с сопротивлениями 3,0 и 6,0 Ом. ЭДС и внутренние сопротивления элементов одинаковы и равны 1,4 В и 0,30 Ом для каждого. Определить силу тока в резисторах и напряжение на зажимах батареи.

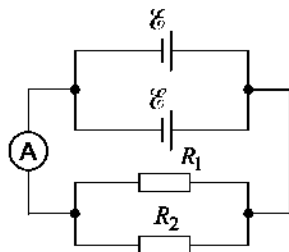
**11.128.** Три источника тока, ЭДС которых равны 5,0, 10,0 и 15 В, соединены, как показано на рисунке, и замкнуты на конденсатор с электрической емкостью 2,0 мкФ. Внутренние сопротивления всех источников тока одинаковы и равны по 1,0 Ом. Определить заряд, накопленный конденсатором.



К задаче 11.128

**11.129.** Плоский воздушный конденсатор, площадь пластин которого равна 100 см<sup>2</sup>, подключен к батарее из 15 последовательно соединенных аккумуляторов с ЭДС 2,0 В каждый. Не учитывая внутреннего сопротивления источника тока, определить среднее значение силы тока в батарее, возникающего в результате уменьшения расстояния между пластинами от 4,0 до 1,0 мм за время 1,0 с.

**11.130.** Два одинаковых гальванических элемента с ЭДС по 1,5 В и внутренним сопротивлением 0,50 Ом у каждого соединены параллельно и питают внешнюю цепь, схема которой дана на рисунке. Сопротивление резистора  $R_1$  равно 1,2 Ом. Определить сопротивление резистора  $R_2$  и падение напряжения на нем, если сопротивление соединительных проводов равно 4,0 Ом, а амперметр показывает 0,30 А.



К задаче 11.130

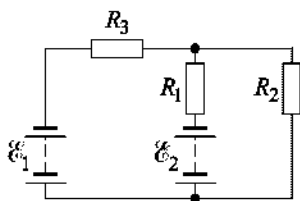
**11.131.** При какой силе тока осуществляется зарядка батареи аккумуляторов с внутренним сопротивлением 0,30 Ом и остаточной ЭДС 11,1 В, если при подключении ее к источнику тока с постоянным напряжением 15 В в цепь потребовалось дополнительно ввести сопротивление 1,0 Ом?

**11.132.** Батарея аккумуляторов с ЭДС 11,2 В и внутренним сопротивлением 0,30 Ом заряжается при силе тока 4,0 А. Что показывает вольтметр, подключенный к полюсам батареи?

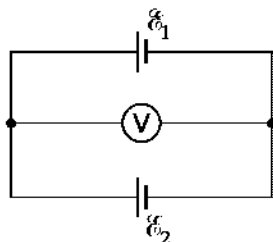
**11.133.** В конце зарядки аккумулятора амперметр показал 4,0 А, а подключенный к его полюсам вольтметр — 2,16 В. В начале разрядки приборы показали 5,0 А и 1,8 В. Каковы ЭДС и внутреннее сопротивление аккумулятора?

**11.134.** Электрический заряд, накопленный батареей из шести аккумуляторов, соединенных последовательно, соответствует емкости 55 А·ч. Определить заряд одного аккумулятора. Какой заряд будет иметь батарея, если аккумуляторы в ней соединить не последовательно, а параллельно?

**11.135.** При каком значении ЭДС  $\mathcal{E}_2$  сила тока через сопротивление  $R_3$  (см. рисунок) будет равна нулю? Сопротивления  $R_1$  и  $R_2$  известны; сопротивления соединительных проводов и источников тока не учитывать.



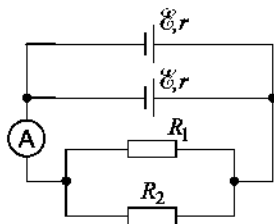
К задаче 11.135



К задаче 11.136

**11.136.** Два элемента с ЭДС  $\mathcal{E}_1 = 1,3$  В и  $\mathcal{E}_2 = 1,5$  В соединены по схеме, изображенной на рисунке. Вольтметр показывает 1,45 В. У какого элемента внутреннее сопротивление больше и во сколько раз? Сопротивление вольтметра считать очень большим.

**11.137.** Два одинаковых гальванических элемента питают внешнюю цепь (см. рисунок). ЭДС одного элемента  $1,5\text{ В}$ , его внутреннее сопротивление  $0,5\text{ Ом}$ . Амперметр показывает  $0,5\text{ А}$ .  $R_1 = 1,2\text{ Ом}$ ,  $R_2 = 2\text{ Ом}$ . Определить общее сопротивление всей цепи, напряжение на зажимах источника тока, сопротивление соединительных проводов и КПД установки.



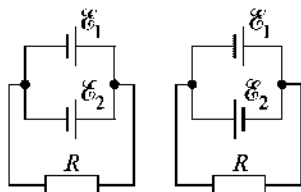
К задаче 11.137

**11.138.** Несколько одинаковых элементов с ЭДС  $1,5\text{ В}$  и внутренним сопротивлением  $0,60\text{ Ом}$  питают внешнюю цепь, сопротивление которой  $1,5\text{ Ом}$ . При их последовательном соединении в батарею сила тока в цепи равна  $2,0\text{ А}$ . Как следует соединить элементы для увеличения силы тока в той же цепи на  $0,50\text{ А}$ ?

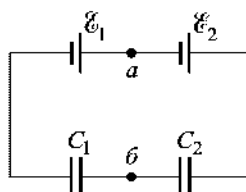
**11.139.** Максимальная сила тока в цепи, полученная при смешанном соединении одинаковых элементов в батарею, равна  $3,0\text{ А}$ . ЭДС одного элемента  $1,5\text{ В}$ , его внутреннее сопротивление  $0,40\text{ Ом}$ . Определить силу тока в той же цепи, если элементы в батарее будут соединены последовательно.

**11.140.** Два источника тока, ЭДС которых  $12$  и  $8,0\text{ В}$  и внутренние сопротивления соответственно  $1,0$  и  $2,0\text{ Ом}$ , подключены к резистору сопротивлением  $10\text{ Ом}$  (см. рисунок). Определить силу тока в резисторе, если источники тока к нему присоединены: одноименными полюсами; разноименными полюсами.

**11.141.** Два источника тока, ЭДС и внутреннее сопротивление которых  $\mathcal{E}_1 = 8,0\text{ В}$ ,  $r_1 = 1,0\text{ Ом}$  и  $\mathcal{E}_2 = 10\text{ В}$ ,  $r_2 = 2,0\text{ Ом}$ , замкнуты на параллельно соединенные резисторы  $R_1 = 15\text{ Ом}$ ,  $R_2 = 2,0\text{ Ом}$  (см. рисунок к задаче 11.137). Определить силу тока в резисторе  $R_2$ .



К задаче 11.140

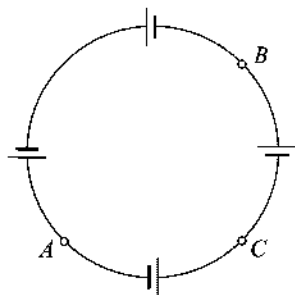


К задаче 11.142

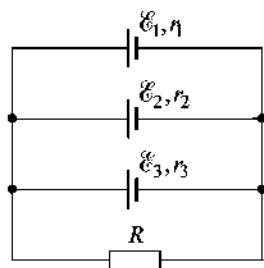
**11.142.** Два источника тока с ЭДС  $20$  и  $5,0\text{ В}$  присоединены к двум конденсаторам, электрические емкости которых  $4,0$  и  $1,0\text{ мкФ}$  (см. рисунок). Найти разность потенциалов между точками  $a$  и  $b$ ?

**11.143.** Несколько одинаковых элементов соединены, как показано на рисунке. Какова разность потенциалов между точками  $A$  и  $B$ ?  $A$  и  $C$ ?

**11.144.** Цепь составлена по схеме, изображенной на рисунке.  $\mathcal{E}_1 = 1,8 \text{ В}$ ,  $\mathcal{E}_2 = 1,7 \text{ В}$ ,  $\mathcal{E}_3 = 1,5 \text{ В}$ ,  $r_1 = 0,20 \text{ Ом}$ ,  $r_2 = r_3 = 0,10 \text{ Ом}$ . Определить сопротивление  $R$  и силу тока на всех участках цепи, если известно, что в третьем элементе сила тока равна нулю.



К задаче 11.143



К задаче 11.144

## § 12. Работа, мощность, тепловое действие электрического тока

**Пример 52.** Определить площадь поперечного сечения медного провода, необходимого для проводки линии от электростанции до потребителя общей длиной 100 км, чтобы передать потребителю мощность 100 кВт. Напряжение на шинах станции 10 кВ. Потери напряжения в проводах не должны превышать 4 %.

*Дано:*  $l = 100 \text{ км} = 10^5 \text{ м}$  — длина медных проводов;  $P = 100 \text{ кВт} = 10^5 \text{ Вт}$  — мощность потребителя;  $U = 10 \text{ кВ} = 10^4 \text{ В}$  — напряжение на шинах станции;  $\Delta U \leq 4\% = 0,04U$  — потери напряжения в проводах. Из таблиц:  $\rho = 1,68 \cdot 10^{-8} \text{ Ом} \cdot \text{м}$  — удельное сопротивление меди.

*Найти:*  $S$  — площадь поперечного сечения провода.

*Решение.* Используя закон Ома для участка цепи, можно определить потери напряжения на линии электропередачи:

$$\Delta U = IR_{\text{пр}} = I\rho \frac{l}{S}.$$

Отсюда

$$S = \frac{I\rho l}{\Delta U} = \frac{I\rho l}{0,04U}.$$

Напряжение у потребителя можно определить двумя путями:

$$U_{\text{потр}} = \frac{P}{I}, \quad U_{\text{потр}} = U - \Delta U.$$

Отсюда

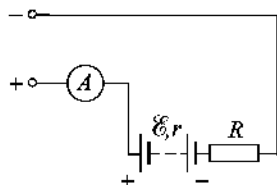
$$I = \frac{P}{U_{\text{потр}}} = \frac{P}{U - \Delta U} = \frac{P}{U - 0,04U} = \frac{P}{0,96U}.$$

Найденное выражение для силы тока используем для определения  $S$ :

$$S = \frac{P_{\text{пл}}}{0,96U \cdot 0,04U} = \frac{10^5 \cdot 1,68 \cdot 10^{-8} \cdot 10^5 \text{ Вт} \cdot \text{Ом} \cdot \text{м} \cdot \text{м}}{0,96 \cdot 10^4 \cdot 0,04 \cdot 10^4 \text{ В} \cdot \text{В}} \approx \approx 0,44 \cdot 10^{-4} \text{ м}^2 = 44 \text{ мм}^2.$$

Ответ:  $S \approx 44 \text{ мм}^2$ .

**Пример 53.** Аккумуляторная батарея с остаточной ЭДС 10,2 В и внутренним сопротивлением 0,90 Ом подключена для зарядки к источнику тока напряжением 14 В (см. рисунок). Какое дополнительное сопротивление необходимо включить последовательно с батареей, чтобы сила зарядного тока была не более 2,0 А? Определить количество теплоты, выделенной в батарее за 20 мин, и запасенную химическую энергию.



К примеру 53

Дано:  $\mathcal{E} = 10,2 \text{ В}$  — остаточная ЭДС батареи аккумуляторов;  $r = 0,90 \text{ Ом}$  — внутреннее сопротивление батареи;  $U = 14 \text{ В}$  — напряжение на зажимах источника электрического тока;  $I = 2,0 \text{ А}$  — сила тока при зарядке;  $t = 1200 \text{ с}$  — время зарядки.

Найти:  $R$  — дополнительное сопротивление;  $Q$  — количество теплоты, выделенной в батарее;  $W_x$  — запасенную химическую энергию.

Решение. Дополнительное сопротивление можно определить из закона Ома для участка цепи с ЭДС:  $I = (U - \mathcal{E}) / (R + r)$ . Отсюда  $R = (U - \mathcal{E} - Ir) / I$ .

Запасенную химическую энергию найдем по разности энергии, израсходованной в аккумуляторе:  $A = IU_{\text{ак}}t$ , и энергии, затраченной на его нагревание:  $Q = I^2rt$ :

$$W_x = A - Q = IU_{\text{ак}}t - I^2rt = I(U - IR)t - I^2rt.$$

Подставляя числовые данные, получаем

$$R = \frac{U - \mathcal{E} - Ir}{I} = \frac{14 - 10,2 - 2,0 \cdot 0,90}{2,0} \frac{\text{В}}{\text{А}} = 1,0 \text{ Ом},$$

$$Q = I^2Rt = 4,0 \cdot 0,90 \cdot 1200 \text{ А}^2 \cdot \text{Ом} \cdot \text{с} = 4300 \text{ Дж},$$

$$W_x = I(U - IR)t - I^2rt = 2,0 \cdot (14 - 2,0 \cdot 1) \cdot 1200 \text{ А} \cdot \text{В} \cdot \text{с} - 4300 \text{ А}^2 \cdot \text{Ом} \cdot \text{с} = 24\,500 \text{ Дж} = 24,5 \text{ кДж}.$$

Ответ:  $R = 1,0 \text{ Ом}$ ;  $Q = 4,3 \text{ кДж}$ ;  $W_x = 24,5 \text{ кДж}$ .

**Пример 54.** Сколько ламп накаливания мощностью 200 Вт каждая, рассчитанных на напряжение 127 В, можно установить в помещении, если напряжение на зажимах генератора поддерживать равным 133 В, а проводка от генератора до потребителя выполнена алюминиевым проводом общей длиной 150 м и поперечным сечением 15 мм<sup>2</sup>. Определить суммарную мощность тока у потребителя.



*Дано:*  $P_0 = 200$  Вт — мощность одной лампы;  $U_0 = 127$  В — напряжение на лампах;  $U = 133$  В — напряжение на зажимах генератора;  $l = 150$  м — длина подводящих проводов;  $S = 15 \text{ мм}^2 = 15 \times 10^{-6} \text{ м}^2$  — площадь поперечного сечения проводов. Из таблиц:  $\rho = 2,7 \cdot 10^{-8} \text{ Ом} \cdot \text{м}$  — удельное сопротивление алюминия.

*Найти:*  $n$  — число ламп;  $P$  — мощность тока у потребителя.

*Решение.* Число ламп, которые можно включить в данную цепь, определим, разделив силу тока в магистральном проводе на силу тока, проходящего через одну лампу:  $n = I/I_0$ .

Вычислив по формуле  $R = \rho l/S$  сопротивление подводящих проводов, найдем силу тока в них:

$$I = \frac{U - U_0}{R},$$

где  $U - U_0$  — падение напряжения в проводах. Силу тока в лампе вычислим по формуле  $I_0 = P_0/U_0$ , тогда

$$n = \frac{I}{I_0} = \frac{(U - U_0)/R}{P_0/U_0} = \frac{(U - U_0)SU_0}{\rho l P_0}.$$

Мощность тока у потребителя найдем из соотношения

$$P = P_0 n.$$

Подставляя числовые данные, получаем

$$n = \frac{(133 - 127) \cdot 15 \cdot 10^{-6} \cdot 127}{2,7 \cdot 10^{-8} \cdot 150 \cdot 200} \frac{\text{В} \cdot \text{м}^2 \cdot \text{В}}{\text{Ом} \cdot \text{м} \cdot \text{м} \cdot \text{Вт}} = 13,$$

$$P = 200 \cdot 13 \text{ Вт} = 2600 \text{ Вт} = 2,6 \text{ кВт}.$$

*Ответ:*  $n = 13$ ;  $P = 2,6$  кВт.

**Пример 55.** Параллельно с лампой мощностью 100 Вт включили электроплитку мощностью 400 Вт. Напряжение в сети равно 127 В. Найти напряжение на лампе до и после включения электроплитки, если сопротивление подводящих проводов составляет 3,0 Ом. Лампа и плитка рассчитаны на напряжение 127 В.

*Дано:*  $P_1 = 100$  Вт — мощность лампы;  $P_2 = 400$  Вт — мощность электроплитки;  $U = 127$  В — номинальное напряжение на лампе, плитке и в сети;  $R_0 = 3,0$  Ом — сопротивление подводящих проводов.

*Найти:*  $U'_1$  и  $U''_1$  — напряжение на лампе до и после включения электроплитки.

*Решение.* Для решения задачи необходимо вычислить силу тока в цепи до и после включения плитки. Для этого необходимо знать общее сопротивление цепи в том и другом случаях. Зная силу тока и сопротивление потребителей, находим искомые величины. Из выражения для мощности найдем сопротивления обоих потребителей:

$$R_1 = \frac{U^2}{P_1}, \quad R_2 = \frac{U^2}{P_2}.$$

Запишем общее сопротивление цепи и силу тока при различной нагрузке:

$$R'_{\text{общ}} = R_0 + R_1, \quad R''_{\text{общ}} = R_0 + \frac{R_1 R_2}{R_1 + R_2};$$

$$I' = \frac{U}{R'_{\text{общ}}}, \quad I'' = \frac{U}{R''_{\text{общ}}}.$$

Подставляя числовые значения, находим сопротивления цепи:

$$R_1 = \frac{127^2}{100} \frac{\text{В}^2}{\text{Вт}} = 161 \text{ Ом}, \quad R'_{\text{общ}} = 3,0 \text{ Ом} + 161 \text{ Ом} = 164 \text{ Ом},$$

$$R_2 = \frac{127^2}{400} \frac{\text{В}^2}{\text{Вт}} = 40,3 \text{ Ом}, \quad R''_{\text{общ}} = 3,0 \text{ Ом} + \frac{161 \cdot 40,3}{161 + 40,3} \frac{\text{Ом}^2}{\text{Ом}} = 35 \text{ Ом}.$$

Вычислим силу тока:

$$I' = \frac{127}{164} \frac{\text{В}}{\text{Ом}} = 0,70 \text{ А}, \quad I'' = \frac{127}{35} \frac{\text{В}}{\text{Ом}} = 3,6 \text{ А}.$$

Так как потребители и провода в обоих случаях соединены последовательно, то напряжение 127 В распределится пропорционально сопротивлениям:  $U = U'_1 + I' R_0$ ,  $U = U''_1 + I'' R_0$ . Тогда

$$U'_1 = 127 \text{ В} - 0,70 \text{ А} \cdot 3,0 \text{ Ом} = 125 \text{ В},$$

$$U''_1 = 127 \text{ В} - 3,6 \text{ А} \cdot 3,0 \text{ Ом} = 116 \text{ В}.$$

*Ответ:*  $U'_1 = 125 \text{ В}$ ;  $U''_1 = 116 \text{ В}$ .

**Пример 56.** Электродвигательная установка трамвая, имея КПД 60 %, работает от сети напряжением 550 В при силе тока 100 А и развивает силу тяги 3,0 кН. Определить скорость трамвая при равномерном движении на горизонтальном участке пути.

*Дано:*  $\eta = 60\%$  — КПД электродвигательной установки;  $U = 550 \text{ В}$  — напряжение в сети;  $I = 100 \text{ А}$  — сила тока;  $F_T = 3,0 \text{ кН} = 3 \cdot 10^3 \text{ Н}$  — сила тяги.

*Найти:*  $v$  — скорость равномерного движения трамвая.

**Решение.** Мощность, потребляемая электродвигателями, определяется по формуле  $P = IU$ . Часть этой мощности, ограниченная КПД, обеспечивает механическое движение

$$P_{\text{мех}} = \eta IU. \quad (1)$$

С другой стороны,  $P_{\text{мех}}$  может быть выражена через силу тяги и скорость:

$$P_{\text{мех}} = F_T v. \quad (2)$$

Решая совместно уравнения (1) и (2), определяем скорость:

$$\eta IU = F_T v, \\ v = \eta \frac{IU}{F_T} = \frac{0,6 \cdot 100 \cdot 550}{3 \cdot 10^3} \frac{\text{А} \cdot \text{В}}{\text{Н}} = 11 \text{ м/с} \approx 40 \text{ км/ч}.$$

*Ответ:*  $v \approx 40 \text{ км/ч}$ .

**Пример 57.** Свинцовый предохранитель, включенный в сеть, плавится, если соединительные медные провода, имеющие площадь поперечного сечения  $5,0 \text{ мм}^2$ , нагреваются на  $25 \text{ К}$ . Найти площадь поперечного сечения свинцовой проволоки предохранителя, начальная температура которой равна  $293 \text{ К}$ .

*Дано:*  $S_1 = 5,0 \text{ мм}^2 = 5,0 \cdot 10^{-6} \text{ м}^2$  — площадь поперечного сечения медных проводов;  $\Delta T = 25 \text{ К}$  — приращение температуры медных проводов;  $T_1 = 293 \text{ К}$  — начальная температура свинцовой проволоки. Из таблиц:  $\rho_1 = 1,68 \cdot 10^{-8} \text{ Ом} \cdot \text{м}$ ,  $\rho_2 = 2,07 \cdot 10^{-7} \text{ Ом} \cdot \text{м}$  — удельные сопротивления соответственно меди и свинца;  $c_1 = 3,8 \cdot 10^2 \text{ Дж}/(\text{кг} \cdot \text{К})$ ,  $c_2 = 1,27 \cdot 10^2 \text{ Дж}/(\text{кг} \cdot \text{К})$  — удельные теплоемкости соответственно меди и свинца;  $D_1 = 8,9 \cdot 10^3 \text{ кг}/\text{м}^3$ ,  $D_2 = 1,14 \cdot 10^4 \text{ кг}/\text{м}^3$  — плотности соответственно меди и свинца;  $T_{\text{пл}} = 600 \text{ К}$  — температура плавления свинца;  $\lambda = 2,5 \cdot 10^4 \text{ Дж}/\text{кг}$  — удельная теплота плавления свинца.

*Найти:*  $S_2$  — площадь поперечного сечения свинцовой проволоки предохранителя.

**Решение.** Количество теплоты  $Q_1$ , затраченное на нагревание медного провода, можно выразить в виде

$$Q_1 = c_1 S_1 l_1 D_1 \Delta T.$$

Это количество теплоты получено в результате прохождения электрического тока, и оно равно

$$Q_1 = I^2 R_1 t = \frac{I^2 \rho_1 l_1}{S_1}.$$

Приравняв правые части написанных выражений для  $Q_1$ , получаем

$$\frac{I^2 \rho_1 l_1}{S_1} = c_1 S_1 l_1 D_1 \Delta T.$$

На основании тех же рассуждений запишем выражение для  $Q_2$  — количества теплоты, выделенного током в свинцовом проводнике:

$$Q_2 = I^2 R_2 t = \frac{I^2 \rho_2 l_2}{S_2}.$$

Это количество теплоты было затрачено на нагревание свинцового проводника до температуры плавления и на его плавление:

$$Q_2 = S_2 l_2 D_2 [c_2 (T_{\text{пл}} - T_1) + \lambda].$$

Приравняв правые части, получим

$$\frac{I^2 \rho_2 l_2}{S_2} = S_2 l_2 D_2 [c_2 (T_{\text{пл}} - T_1) + \lambda].$$

Учитывая, что сила тока и время протекания процесса в обоих случаях одинаковы, исключим эти величины путем деления  $Q_1$  на  $Q_2$ .

$$\frac{\rho_1 S_2}{\rho_2 S_1} = \frac{c_1 S_1 D_1 \Delta T}{S_2 D_2 [c_2 (T_{\text{пл}} - T_1) + \lambda]}.$$

Полученное выражение позволяет определить площадь  $S_2$  поперечного сечения свинцовой проволочки:

$$S_2 = S_1 \sqrt{\frac{\rho_2 c_1 D_1 \Delta T}{\rho_1 D_2 [c_2 (T_{\text{пл}} - T_1) + \lambda]}}.$$

Подставляя в него числовые данные, находим

$$\begin{aligned} S_2 &= 5,0 \cdot 10^{-6} \sqrt{\frac{2,07 \cdot 10^{-7} \cdot 3,8 \cdot 10^2 \cdot 8,9 \cdot 10^3 \cdot 25}{1,68 \cdot 10^{-8} \cdot 1,14 \cdot 10^4 \cdot (1,27 \cdot 10^2 \cdot 307 + 2,5 \cdot 10^4)}} \text{ м}^2 = \\ &= 2,5 \cdot 10^{-6} \text{ м}^2 = 2,5 \text{ мм}^2. \end{aligned}$$

Ответ:  $S_2 = 2,5 \text{ мм}^2$ .

**12.1.** Вычислить энергию, запасенную стартерной аккумуляторной батареей, предназначенной для легкового автомобиля, ЭДС которой 12 В, а накопленный заряд равен  $1,98 \cdot 10^5 \text{ Кл}$ .

**12.2.** Лампочка мощностью 40 Вт подключена к сети напряжением 220 В. Сколько электронов пройдет через поперечное сечение нити накала за 1 мин 20 с и какая энергия при этом будет израсходована?

**12.3.** Какая энергия расходуется при одном разряде молнии в атмосфере, если известно, что за 0,001 с при разности потенциалов на концах молнии 9,0 ГВ сила тока в ней достигает 20 000 А? Определить стоимость этой энергии по действующим расценкам.

**12.4.** Сварочным аппаратом, работающим от сети напряжением 45 В, за 20 мин было израсходовано 5,4 кВт·ч энергии. При какой силе тока протекала дуговая сварка?

**12.5.** Электрическая лампа мощностью 100 Вт, рассчитанная на напряжение 220 В, включается в сеть с тем же напряжением. Определить сопротивление нити накала лампы в рабочем состоянии, силу тока в лампе и месячный расход энергии при условии, что в день лампа горит 5 ч, а количество дней в месяце считать равным 30.

**12.6.** Электрический утюг мощностью 800 Вт работает от сети напряжением 220 В. Определить силу тока в нагревательном элементе и его сопротивление в рабочем состоянии утюга. Сколько энергии будет израсходовано за 1,5 ч непрерывной работы утюга?

**12.7.** Резистор подключен к источнику тока, напряжение на зажимах которого 6,0 В. Какая работа совершается током, если за 0,50 мин через резистор проходит заряд 24 Кл? Определить мощность тока и сопротивление резистора.

**12.8.** Какая мощность потребляется дуговой сталеплавильной печью, работающей от источника напряжением 220 В при силе тока  $3,0 \cdot 10^4 \text{ А}$ ? Определить стоимость электрической энергии, израсходованной за 5 ч работы печи, по действующему тарифу.

**12.9.** Телевизор «Рубин Ц-208» потребляет от сети мощность не более 145 Вт. Определить энергию, израсходованную за 30 дней, если

в день телевизор включался на 5,0 ч, и ее стоимость по действующему тарифу.

**12.10.** Показать на графике зависимость мощности, развиваемой источником тока во внешней цепи, от силы тока.

**12.11.** При каких значениях силы тока в цепи мощность, развиваемая источником тока во внешней цепи, будет максимальной? равной нулю?

**12.12.** Аккумулятор, ЭДС и внутреннее сопротивление которого равно 2 В и 0,02 Ом, питает внешнюю цепь. Используя график, устанавливающий зависимость мощности, выделяемой на внешнем участке цепи, от силы тока, определить силу тока во внешней цепи и ее сопротивление, для которых выделенная мощность будет максимальной.

**12.13.** Гальванический элемент с ЭДС 1,6 В и внутренним сопротивлением 0,80 Ом питает внешнюю цепь. При какой силе тока внешней цепью потребляется мощность 0,512 Вт?

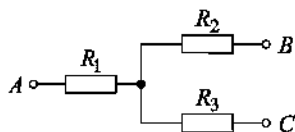
**12.14.** Лампа мощностью 500 Вт для эпидиаскопа рассчитана на напряжение 110 В. Определить сопротивление лампы в режиме горения. Какое потребуется дополнительное сопротивление, чтобы включить лампу в сеть напряжением 127 В?

**12.15.** Лампу накаливания мощностью 60 Вт, рассчитанную на напряжение 120 В, необходимо включить в сеть напряжением 220 В. Какое добавочное сопротивление надо последовательно соединить с лампой, чтобы она давала нормальный накал? Какой длины нихромовый проводник потребуется для изготовления этого сопротивления при поперечном сечении 0,20 мм<sup>2</sup>?

**12.16.** В мастерской работают четыре электродвигателя мощностью 3,5 кВт каждый. Продолжительность их работы в течение дня составляет 5,0 ч. Определить израсходованную за 22 рабочих дня электрическую энергию и ее стоимость при действующем за 1 кВт·ч тарифе.

**12.17.** В сеть напряжением 120 В последовательно с электрической дугой включен реостат. Падение напряжения на электродах дуги 45 В, а сила тока в цепи 12 А. Определить мощность, потребляемую дугой, и КПД установки.

**12.18.** На участке цепи (см. рисунок), состоящем из трех резисторов ( $R_1 = 1,0$  Ом,  $R_2 = 4,0$  Ом и  $R_3 = 2,0$  Ом), известны потенциалы трех его конечных точек  $\varphi_A = 12$  В,  $\varphi_B = 8,0$  В и  $\varphi_C = 7,0$  В. Определить мощность, выделяемую в каждом из трех резисторов.



К задаче 12.18

**12.19.** Лампа накаливания с вольфрамовой нитью, рассчитанная на напряжение 220 В, имеет мощность 100 Вт. Определить сопротивление нити накала при температуре 20 °С, если известно, что при нормальных условиях работы ее нить разогревается до 2500 °С.

**12.20.** Найти внутреннее сопротивление источника тока, если при поочередном замыкании его на резисторы 4 и 9 Ом в них выделяется одинаковая мощность.

**12.21.** Батарея аккумуляторов поочередно замыкается на резисторы сопротивлением 10 и 6,0 Ом. В первом случае в резисторе выделяется мощность 10 Вт, во втором 13,5 Вт. Найти силу тока при коротком замыкании.

**12.22.** Две лампочки накаливания, рассчитанные на одинаковое напряжение, имеют мощности 40 и 100 Вт. Какая из лампочек в рабочем режиме имеет большее сопротивление? Во сколько раз?

**12.23.** Три лампочки накаливания мощностью  $P_1 = P_2 = 40$  Вт и  $P_3 = 80$  Вт рассчитаны на напряжение 110 В. Вычертить схему их включения в сеть напряжением 220 В так, чтобы накал был нормальным. Определить силу тока в лампочках, когда они работают в рабочем режиме.

**12.24.** Напряжение на зажимах генератора 132 В, а у потребителя оно составляет 127 В. Определить падение напряжения в магистральных проводах и их сопротивление, если мощность тока у потребителя равна 5,0 кВт.

**12.25.** Генератор тока с ЭДС, равной 138 В, имеет внутреннее сопротивление 0,050 Ом и питает параллельно соединенные лампы. Сопротивление каждой лампы равно 300 Ом, напряжение на лампах 120 В. Сопротивление соединительных проводов 0,25 Ом. Сколько ламп включено в цепь? Определить полезную мощность и КПД всей установки.

**12.26.** Электродвигатель работает от сети напряжением 250 В при силе тока 20 А. Сопротивление обмотки двигателя 0,40 Ом. Определить энергию, израсходованную за 2 ч, механическую работу и потери энергии на нагревание обмотки.

**12.27.** От генератора, напряжение на зажимах которого 132 В, необходимо передать потребителю мощность 6,0 кВт. Определить площадь поперечного сечения медных проводов общей длиной 1,0 км для линии электропередачи, если допустимые потери напряжения не должны превышать 8%.

**12.28.** От генератора напряжением 20 кВ требуется передать потребителю мощность 1,0 МВт на расстояние 2,5 км. Определить минимальную площадь поперечного сечения медных проводов линии передачи, если потери напряжения в ней не должны превышать 2%. Найти плотность тока на линии.

**12.29.** Электрический моторчик работает от источника тока напряжением 6,0 В. Если якорь моторчика полностью заторможен, то в цепи возникает сила тока  $I_1 = 4,0$  А. Определить мощность на валу моторчика, когда сила тока, проходящего по обмотке якоря, равна  $I_2 = 2,0$  А.

**12.30.** Электрический двигатель, механическая мощность которого 3,3 кВт и КПД 85 %, работает от сети напряжением 220 В. Определить силу тока в цепи и сопротивление обмотки якоря электродвигателя.

**12.31.** Электромотор работает от сети напряжением 120 В при силе тока 7,5 А. Сопротивление обмотки якоря электромотора 1,8 Ом. Определить мощность, потребляемую от сети, механическую мощность и КПД мотора.

**12.32.** От генератора с ЭДС 260 В и внутренним сопротивлением 0,20 Ом до потребителя 100 м. Определить массу алюминия, необходимого для изготовления подводящих проводов, если потребитель работает при напряжении 220 В и потребляет мощность 16,5 кВт.

**12.33.** Электровоз движется с постоянной скоростью 43,2 км/ч, развивая при этом среднюю силу тяги 43,7 кН. Определить силу тока в двигателях электровоза, если напряжение на коллекторе двигателей равно 1,5 кВ, а их КПД составляет 92 %.

**12.34.** В сеть напряжением 220 В параллельно включены пять электродвигателей. Длина подводящих к сети медных проводов равна 250 м, их площадь поперечного сечения составляет 25 мм<sup>2</sup>. Определить силу тока в цепи, напряжение на зажимах генератора и потерю мощности в подводящих проводах, если электрическая мощность каждого электродвигателя равна 1,5 кВт.

**12.35.** Электродвигатели трамвайных вагонов работают при силе тока 112 А и напряжении 550 В. С какой скоростью движется трамвай, если двигатели создают силу тяги 3,6 кН, а их КПД равен 70 %?

**12.36.** Скоростной лифт массой 1,4 т поднимается равномерно со скоростью 1,0 м/с. При какой силе тока работает электродвигатель, приводящий в движение лифт, и какая при этом потребляется мощность, если напряжение в сети 380 В, а КПД двигателя 98 %? Принять  $g = 9,8 \text{ м/с}^2$ . Сопротивление соединительных проводов не учитывать.

**12.37.** Электрический двигатель, приводящий в движение шахтную клеть, работает от сети напряжением 380 В при силе тока 19 А. Определить сопротивление обмотки электродвигателя, если за 40 с шахтная клеть массой 0,8 т поднимается на высоту 16 м. Принять  $g = 10 \text{ м/с}^2$ .

**12.38.** Тяговый электродвигатель подъемного крана работает от сети 380 В при силе тока 25 А и за 25 мин поднимает на высоту 30 м груз массой 29 т. Определить мощность тока, потери мощности установки и ее КПД.

**12.39.** Какое максимальное тяговое усилие развивает тяговый электротрактор при скорости передвижения 2,0 км/ч, если его тяговый электродвигатель с КПД 72 % работает при напряжении 470 В и силе тока 360 А?

**12.40.** Какой наибольший груз приходится на каждую из двух катушек электромагнитного подъемного механизма, если напряжение на катушках равно 380 В при силе тока 17 А, а общий КПД механизма составляет 80 %? Скорость подъема груза постоянна и равна 0,50 м/с.

**12.41.** Шахтная клеть массой 1,8 т поднимается равномерно на высоту 25 м за 1,0 мин. Клеть приводится в движение двигателем с КПД 81 % и напряжением на зажимах 380 В. Определить мощность тока, потребляемую от сети; энергию, затраченную на один подъем. При какой силе тока работает двигатель?

**12.42.** На электровозе установлено 8 тяговых двигателей с КПД, равным 92 %, включенных по два последовательно. Напряжение в контактной сети равно 3,0 кВ, а сила тока, проходящего через электродвигатель, составляет 380 А. Определить среднее тяговое усилие при средней скорости движения электровоза 54 км/ч.

**12.43.** Сельская электростанция питает 100 ламп накаливания мощностью по 60 Вт при напряжении 220 В и 5 электродвигателей по 1,5 кВт при том же напряжении. Все потребители энергии включаются в среднем на 10 ч в сутки. Какую полезную мощность должен развивать генератор и каким должно быть напряжение на его зажимах, если сопротивление линии передачи энергии 1,0 Ом? Определить суточный расход энергии и ее стоимость при действующем тарифе.

**12.44.** Мощность Куйбышевской гидроэлектростанции на Волге составляет  $2,0 \cdot 10^6$  кВт. Сколько каменного угля потребовалось бы, чтобы тепловая электростанция с КПД 24 % за 1 ч выработала энергию, равноценную Куйбышевской ГЭС за то же время?

**12.45.** Для чего служат плавкие предохранители? Что выдерживает большую силу тока: плавкий предохранитель или цепь, в которую он включен?

**12.46.** Как изменится количество выделяемой теплоты, если сопротивление спирали электронагревательного прибора уменьшить в два раза, а силу тока в два раза увеличить?

**12.47.** Когда в помещении включается прибор, потребляющий большую мощность, накал включенных ламп становится слабее. Почему?

**12.48.** Две лампы, рассчитанные на одинаковое напряжение, но потребляющие различные мощности, включены в электрическую сеть последовательно. Какая из ламп будет гореть ярче?

**12.49.** Почему при включении электроплитки в сеть на длительное время температура накала спирали не повышается безгранично, хотя электрическая энергия расходуется непрерывно?

**12.50.** Отразится ли на работе электроплитки небольшое укорочение перегоревшей спирали?

**12.51.** Какое количество теплоты выделится в реостате, сопротивление которого 6,0 Ом, если за 5,0 мин через него прошел электрический заряд, равный 600 Кл?

**12.52.** Сколько потребуется времени, чтобы кипятильником, работающим от сети напряжением 220 В при силе тока 1,2 А, нагреть 300 г воды на 80 К? Потери энергии не учитывать.

**12.53.** Сколько воды можно вскипятить электрическим кипятильником, затратив 350 Вт·ч электрической энергии? Начальная темпера-



тура воды  $10^{\circ}\text{C}$ . Определить мощность кипятильника, если нагревание воды продолжалось 35 мин. Потерями энергии пренебречь.

**12.54.** Для нагревания 2,0 л воды от  $19^{\circ}\text{C}$  до температуры кипения было израсходовано 225 Вт · ч энергии. Каков КПД нагревателя? Определить сопротивление его нагревательного элемента, если напряжение в сети 120 В и нагревание продолжалось 18 мин.

**12.55.** По алюминиевому проводнику 40 с пропускали электрический ток. На сколько повысилась температура проводника, если плотность тока в нем была постоянной и равной  $3\text{ А/мм}^2$ ?

**12.56.** Электрический нагреватель имеет две одинаковые обмотки, которые можно включать в сеть порознь и вместе. Как следует соединить обмотки, чтобы нагревание происходило быстрее?

**12.57.** В электрической кастрюле, имеющей две одинаковые спирали, нагревается вода. При включении в сеть одной спирали выделяется мощность 400 Вт. Сколько будет затрачено времени для нагревания на 80 К 1,0 л воды, если включена одна спираль? Две, соединенные параллельно? Две, соединенные последовательно и включенные в ту же сеть? Потери энергии не учитывать.

**12.58.** На какую мощность изготовлен нагреватель, если им можно довести до кипения 1,2 л воды с начальной температурой  $19^{\circ}\text{C}$  за 15 мин? КПД нагревателя 84%;  $c = 4200\text{ Дж/(кг} \cdot \text{K)}$ .

**12.59.** Электрическую печь мощностью 800 Вт подключили к сети напряжением 220 В медными проводами общей длиной 50 м и поперечным сечением  $2,5\text{ мм}^2$ . Определить сопротивление нагревательного элемента печи и количество теплоты, которое она отдает за 1 ч работы.

**12.60.** Какое сопротивление должен иметь нагревательный элемент электрического камина, чтобы при включении его в сеть напряжением 120 В температуру воздуха в помещении можно было поддерживать неизменной? Потери тепла воздухом комнаты за 1 ч составляют 3,45 МДж.

**12.61.** Электрический чайник имеет две секции. При включении одной секции вода в чайнике закипает через 12 мин, при включении другой — через 24 мин. Через сколько времени закипит вода, если обе секции будут включены в ту же сеть последовательно? параллельно?

**12.62.** Электрический нагреватель работает от сети напряжением 120 В при силе тока 5,0 А и за 20 мин нагревает 1,5 л воды на 84 К. Определить потери энергии и КПД нагревателя. Сколько метров никелинового провода пошло на изготовление спирали для нагревателя, если ее площадь поперечного сечения равна  $0,10\text{ мм}^2$ ?

**12.63.** Сколько льда, имеющего температуру 263 К, можно растопить за 10 мин на электрической плитке, работающей от сети напряжением 220 В при силе тока 3,0 А, если общий КПД установки равен 80 %?

**12.64.** В электрической кастрюле мощностью 600 Вт и с КПД 84 % нагреваются 1,5 л воды и 0,5 кг льда при общей температуре  $0^{\circ}\text{C}$ . Какая температура установится в кастрюле через 20 мин после включения в сеть?

**12.65.** В электрической кастрюле необходимо за 10 мин довести до кипения и полностью испарить 1,0 л воды, начальная температура которой 20 °С. Какой длины нихромовый проводник нужно использовать в нагревательном элементе кастрюли, если площадь его поперечного сечения равна 0,50 мм<sup>2</sup>? Электрическая кастрюля имеет КПД 80 % и работает от сети напряжением 120 В.

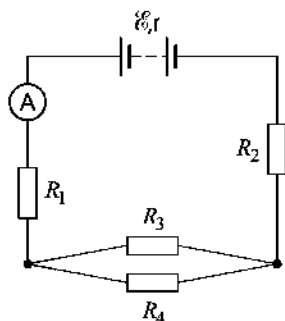
**12.66.** В калориметр налито 0,30 кг керосина и опущена спираль сопротивлением 3,0 Ом. В течение какого времени следует пропускать через спираль ток, чтобы температура в калориметре повысилась на 2,5 К? Масса калориметра 0,13 кг, а его удельная теплоемкость составляет 378 Дж/(кг·К), сила тока в цепи равна 2,0 А.

**12.67.** В алюминиевый калориметр налито 180 г воды и опущена спираль сопротивлением 2,0 Ом, подключенная к источнику напряжением 4,8 В. На сколько кельвин нагреется вода за 5,0 мин? Масса калориметра равна 46 г. Потери энергии не учитывать.

**12.68.** В калориметр налито 0,30 кг спирта и опущена спираль сопротивлением 5,7 Ом, подключенная к батарее из трех последовательно соединенных одинаковых аккумуляторов. Какова удельная теплоемкость спирта, если за 3 мин он нагрелся на 1,4 К? ЭДС одного аккумулятора 2 В, а его внутреннее сопротивление 0,10 Ом.

**12.69.** Сколько витков никелиновой проволоки надо намотать на фарфоровый цилиндр диаметром 1,5 см, чтобы изготовить электрический нагреватель, который за 10 мин может нагреть 120 г воды от 10 до 100 °С? Диаметр проволоки равен 0,20 мм, напряжение в сети 110 В, и общие потери составляют 40 %.

**12.70.** Две железные проволоки, сопротивления которых при 0 °С равны 1,0 и 2,5 Ом, соединили последовательно и подключили к источнику тока. Первую проволоку нагрели до 847 °С, при этом выделяющая мощность в ней не изменилась. Температуру второй проволоки не изменяли. Найти температурный коэффициент сопротивления железа. Внутреннее сопротивление источника тока считать пренебрежимо малым.



К задаче 12.72

**12.71.** В сеть напряжением 220 В одновременно включены электродвигатель мощностью 0,30 кВт и КПД 90 %, электрическая печь мощностью 1,0 кВт и десять ламп мощностью 150 Вт каждая. Определить силу тока в двигателе, печи и лампах, общую силу тока и потребляемую мощность.

**12.72.** Батарея аккумуляторов с ЭДС  $\mathcal{E} = 24,8$  В и внутренним сопротивлением  $r = 0,40$  Ом включена в цепь, как показано на рисунке. Амперметр показывает 2,0 А,  $R_1 = 4,2$  Ом,  $R_2 = 4,8$  Ом и  $R_3 = 6,0$  Ом. Определить сопротивление  $R_4$ , силу тока в нем и напря-

жение на зажимах батареи. Чему равна полная мощность и мощность тока во внешней цепи?

**12.73.** Элемент в одном случае замыкают сопротивлением  $0,64 \text{ Ом}$ , а в другом — сопротивлением  $2,25 \text{ Ом}$ . В обоих случаях выделенное количество теплоты в проводниках оказалось одинаковым. Каково внутреннее сопротивление элемента?

**12.74.** Источник тока с ЭДС  $1,6 \text{ В}$  и внутренним сопротивлением  $0,80 \text{ Ом}$  замыкают проводником, при этом во внешней цепи выделяется мощность  $0,60 \text{ Вт}$ . Определить силу тока и сопротивление внешней цепи.

**12.75.** Сила тока при коротком замыкании источника тока равна  $1,5 \text{ А}$ . При замыкании источника тока на резистор сопротивлением  $4,0 \text{ Ом}$  в нем выделяется мощность  $1,0 \text{ Вт}$ . Найти ЭДС и внутреннее сопротивление источника тока.

**12.76.** На сколько нагреется алюминиевый провод при пропускании по нему тока  $3,0 \text{ А}$  в течение  $20 \text{ с}$ ? Площадь поперечного сечения провода равна  $18 \text{ мм}^2$ . Считать, что вся выделенная энергия идет на нагревание провода.

**12.77.** На сколько повысится температура медных проводов при пропускании по ним электрического тока до тех пор, пока не расплавится свинцовый предохранитель поперечным сечением  $1,0 \text{ мм}^2$ ? Начальная температура свинца равна  $15^\circ \text{C}$ , а поперечное сечение медных проводов  $3,0 \text{ мм}^2$ .

**12.78.** Что называется термоэлектродвижущей силой и от каких условий она зависит? Кому принадлежит открытие термо-ЭДС?

**12.79.** Для небольшого интервала температур  $0\text{--}100^\circ \text{C}$  термо-ЭДС определяется по формуле  $\mathcal{E} = \alpha(T_2 - T_1)$ , где  $\alpha$  — удельная термо-ЭДС, или коэффициент термо-ЭДС. Каков физический смысл этого коэффициента?

**12.80.** Коэффициент термо-ЭДС по отношению к свинцу для железа равен  $+15 \text{ мкВ/К}$ , а для никеля  $-20,8 \text{ мкВ/К}$ . На что указывают знаки?

**12.81.** Определить коэффициент  $\alpha$  для термопары железо–никель, если по отношению к свинцу для железа  $\alpha = +15 \text{ мкВ/К}$ , а для никеля  $\alpha = -20,8 \text{ мкВ/К}$ .

**12.82.** Термопара сурьма–свинец, имеющая сопротивление  $4,0 \text{ Ом}$ , присоединена к гальванометру сопротивлением  $84 \text{ Ом}$ . Чему равен коэффициент термо-ЭДС, если при разности температур на спаях  $45 \text{ К}$  гальванометр показывает  $22 \text{ мкА}$ ?

**12.83.** Термопара медь–константан, для которой  $\alpha = 3,6 \cdot 10^{-5} \text{ В/К}$ , соединена последовательно с гальванометром. Общее сопротивление цепи  $360 \text{ Ом}$ . Определить разность температур спаев термопары, если сила тока, показанная гальванометром, равна  $7,2 \cdot 10^{-3} \text{ мА}$ .

**12.84.** Французский физик Пельтье открыл в 1834 г. явление, которое получило название эффект Пельтье. В чем его суть и где он используется?

### § 13. Электрический ток в электролитах. Гальванические элементы и аккумуляторы

**Пример 58.** Для получения матриц грампластинок пользуются гальванопластикой. Восковая форма первоначально покрывается медью при плотности тока  $0,80 \text{ А/дм}^2$  в течение 30 мин. При этом выход меди по току составляет 90 %. Последующее покрытие производится 20 ч при плотности тока  $5,0 \text{ А/дм}^2$  с выходом меди по току 95 %. Напряжение на электродах ванны в процессе электролиза поддерживается постоянным и равным 6,0 В. Определить электрическую энергию и массу меди, необходимые для изготовления одной матрицы грампластины, если площадь ее поверхности составляет  $3,0 \text{ дм}^2$ .

*Дано:*  $j_1 = 0,80 \text{ А/дм}^2 = 80 \text{ А/м}^2$  — плотность электрического тока при первичном покрытии;  $t_1 = 30 \text{ мин} = 1,8 \cdot 10^3 \text{ с}$  — время первичного покрытия;  $\eta_1 = 90\% = 0,90$  — первоначальный выход меди по току;  $j_2 = 5,0 \text{ А/дм}^2 = 5,0 \cdot 10^2 \text{ А/м}^2$  — плотность тока при повторном покрытии;  $t_2 = 20 \text{ ч} = 7,2 \cdot 10^4 \text{ с}$ ,  $\eta_2 = 95\% = 0,95$  — время и выход меди по току при повторном покрытии;  $U = 6,0 \text{ В}$  — напряжение на зажимах (электродах) ванны;  $S = 3,0 \text{ дм}^2 = 3,0 \cdot 10^{-2} \text{ м}^2$  — площадь поверхности формы. Из таблиц:  $k = 3,3 \cdot 10^{-7} \text{ кг/Кл}$  — электрохимический эквивалент меди.

*Найти:*  $W$  — электрическую энергию, необходимую для изготовления одной матрицы;  $m$  — массу меди для ее изготовления.

**Решение.** Учитывая, что электролиз протекает при разной плотности электрического тока, напомним  $W = W_1 + W_2$ , где  $W_1 = j_1 S U t_1$  и  $W_2 = j_2 S U t_2$ , откуда

$$W = SU(j_1 t_1 + j_2 t_2) = 3,0 \cdot 10^{-2} \cdot 6,0 \cdot (80 \cdot 0,50 + 500 \cdot 20) \frac{\text{м}^2 \cdot \text{В} \cdot \text{А} \cdot \text{ч}}{\text{м}^2} \approx \\ \approx 1,8 \cdot 10^3 \text{ Вт} \cdot \text{ч} = 1,8 \text{ кВт} \cdot \text{ч}.$$

Для определения массы меди учтем, что выход меди по току показывает, какую часть от расчетной (по току) составляет медь, выделившаяся при электролизе:

$$\eta = \frac{m}{m_{\text{расч}}},$$

где  $m_{\text{расч}}$  определяется по формуле первого закона Фарадея  $m = \eta m_{\text{расч}} = \eta k I t$ . По условию процесс электролиза протекал при различных токах,  $m_1 = \eta_1 k I_1 t_1$  и  $m_2 = \eta_2 k I_2 t_2$ ;  $m = m_1 + m_2$ . Заменяя силы тока через плотность тока  $j$  и площадь поверхности  $S$ , находим выражение для  $m$ :

$$m = k S (\eta_1 j_1 t_1 + \eta_2 j_2 t_2) = 3,3 \cdot 10^{-7} \cdot 3,0 \cdot 10^{-2} \times \\ \times (0,90 \cdot 80 \cdot 1,8 \cdot 10^3 + 0,95 \cdot 500 \cdot 7,2 \cdot 10^4) \text{ кг/Кл} \cdot \text{м}^2 \cdot \text{А/м}^2 \cdot \text{с} \approx 0,34 \text{ кг}.$$

**Ответ:**  $W = 1,8 \text{ кВт} \cdot \text{ч}$ ;  $m \approx 0,34 \text{ кг}$ .

**Пример 59.** В процессе электролиза раствора  $\text{HCl}$  по цепи прошел электрический заряд  $8,32 \cdot 10^4$  Кл; выделенным при этом свободным хлором, имеющим температуру 300 К, заполнили пустой баллон вместимостью 5,0 л. Определить давление газа в баллоне.

*Дано:*  $Q = 8,32 \cdot 10^4$  Кл — электрический заряд;  $V = 5,0$  л =  $5,0 \times 10^{-3}$  м<sup>3</sup> — вместимость баллона;  $T = 300$  К — температура газа в баллоне. Из таблиц:  $n = 1$  — валентность хлора;  $F = 9,65 \cdot 10^4$  Кл/моль — постоянная Фарадея;  $R = 8,31$  Дж/(моль · К) — универсальная газовая постоянная;  $k = 1,38 \cdot 10^{-23}$  Дж/К — постоянная Больцмана,  $e = 1,6 \times 10^{-19}$  Кл — заряд электрона.

*Найти:*  $p$  — давление газа (хлора) в баллоне.

**Решение.** Давление  $p$  можно определить из уравнения Клапейрона–Менделеева

$$pV = \frac{m}{M} RT, \quad \text{или} \quad p = \frac{m}{MV} RT. \quad (1)$$

Неизвестную массу хлора  $m$  найдем, используя объединенный закон электролиза (Фарадея):

$$m = \frac{1}{F} \frac{A}{n} Q. \quad (2)$$

Принимая во внимание, что для одноатомных газов  $A = M$ , после совместного решения уравнений (1) и (2) получим

$$p = \frac{Q}{FnV} RT,$$

или в числовом выражении

$$p = \frac{8,32 \cdot 10^4 \cdot 8,31 \cdot 300}{9,65 \cdot 10^4 \cdot 15,0 \cdot 10^{-3}} \frac{\text{Кл} \cdot \text{Дж}/(\text{моль} \cdot \text{К}) \cdot \text{К}}{\text{Кл}/\text{моль} \cdot \text{м}^3} \approx \approx 4,30 \cdot 10^5 \frac{\text{Дж}}{\text{м}^3} = 4,30 \cdot 10^5 \text{ Па}.$$

Задачу можно решить без применения законов электролиза. Воспользуемся уравнением состояния идеального газа

$$p = nkT,$$

где  $n$  — концентрация нейтрализовавшихся одновалентных ионов,  $k$  — постоянная Больцмана.

Так как  $n = Q/(eV)$ , получим

$$p = \frac{Q}{eV} kT = \frac{8,32 \cdot 10^4 \cdot 1,38 \cdot 10^{-23} \cdot 300}{1,6 \cdot 10^{-19} \cdot 5,0 \cdot 10^{-3}} \frac{\text{Кл} \cdot \text{Дж}/\text{К} \cdot \text{К}}{\text{Кл} \cdot \text{м}^3} \approx 4,30 \cdot 10^5 \text{ Па}.$$

**Ответ:**  $p \approx 430$  кПа.

**Пример 60.** Определить массу цинка, выделенного на катоде при электролизе водного раствора  $\text{ZnSO}_4$  за 90 с, если сила тока в цепи за это время равномерно возрастала от 0 до 3,0 А (см. рисунок).

*Дано:*  $t_1 = 0$  — начальный момент времени,  $t_2 = 90$  с — время протекания электролиза,  $I_1 = 0$  А и  $I_2 = 3,0$  А — сила тока в начальный момент и в конце процесса. Из таблиц:  $A = 65 \cdot 10^{-3}$  кг/моль — атомная

масса цинка,  $n = 2$  — валентность цинка,  $F = 9,65 \cdot 10^4$  Кл/моль — постоянная Фарадея.

*Найти:*  $m$  — массу цинка, выделенного на катоде.

**Решение.** Решение задачи основано на использовании объединенного закона Фарадея

$$m = \frac{A}{nF} Q, \quad (1)$$

здесь  $Q$  — заряд, протекающий за время от  $t_1$  до  $t_2$ .

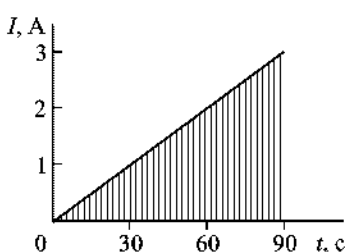
Из графика, приведенного на рисунке, следует, что неизвестный заряд численно равен площади заштрихованной фигуры (в данном примере треугольника):

$$Q = \frac{I_2 t_2}{2}. \quad (2)$$

Решая совместно уравнения (1) и (2) относительно  $m$ , найдем массу выделенного цинка:

$$m = \frac{A I_2 t_2}{2 n F} = \frac{65 \cdot 10^{-3} \cdot 3,0 \cdot 90}{2 \cdot 2 \cdot 9,65 \cdot 10^4} \frac{\text{кг/моль} \cdot \text{А} \cdot \text{с}}{\text{Кл/моль}} \approx \\ \approx 45,4 \cdot 10^{-6} \frac{\text{кг} \cdot \text{А} \cdot \text{с}}{\text{Кл}} = 45,4 \cdot 10^{-6} \text{ кг} = 45 \text{ мг}.$$

Для решения задачи можно использовать не графический метод, а определить неизвестный заряд методом интегрирования:



К примеру 60

$$Q = \int_{t_1}^{t_2} I dt. \quad (3)$$

По условию задачи сила тока изменялась в прямой зависимости от времени  $I = kt$  (здесь  $k$  — коэффициент пропорциональности), поэтому можно написать  $k = I_2/t_2$ , и, следовательно,

$$I = \frac{I_2}{t_2} t. \quad (4)$$

Подставляя в (3) выражение для силы тока из (4) и производя интегрирование, получаем

$$Q = \int_{t_1}^{t_2} \frac{I_2}{t_2} t dt = \frac{I_2}{t_2} \left| \frac{t^2}{2} \right|_{t_1}^{t_2} = \frac{I_2 t_2}{2}.$$

**Ответ:**  $m \approx 45$  мг.

### Электролитическая диссоциация. Электролиз. Законы Фарадея

**13.1.** Какое явление называется электролитической диссоциацией? Какие условия необходимы для его возникновения?

**13.2.** Что такое степень диссоциации и как она зависит от температуры?

**13.3.** Раствор электролита в целом электрически нейтрален. Чем это объясняется?

**13.4.** Образуются ли в электролитах в процессе диссоциации свободные электроны?

**13.5.** При электролизе слабого водного раствора серной кислоты происходит разложение воды на водород и кислород. Какую роль в этом процессе выполняет серная кислота?

**13.6.** Какая часть молекулы в процессе диссоциации всегда будет положительным ионом?

**13.7.** В каком случае опаснее дотрагиваться до проводов с электрическим током — когда руки сухие или когда влажные? Почему?

**13.8.** При электролизе к аноду и катоду за 1 с подходит по  $2,5 \cdot 10^{18}$  одновалентных ионов. Что покажет амперметр, включенный в эту цепь?

**13.9.** Две ванны с одинаковым электролитом, но с различной концентрацией соединены последовательно и подключены к источнику тока. Что можно сказать о массах веществ, выделенных на катодах этих ванн?

**13.10.** Как будет меняться концентрация ненасыщенного водного раствора сульфата меди при электролизе, если анодом будет угольный стержень? медная пластина?

**13.11.** Через водный раствор нитрата серебра при электролизе прошел заряд 268 Кл. Сколько серебра выделилось на катоде?

**13.12.** Электролизом получено 120 мг меди. Сколько серебра можно получить, если через соответствующий электролит пройдет то же количество электричества?

**13.13.** Электролиз проходил 5,0 мин при силе тока 1,5 А. При этом на катоде выделилось 137 мг некоторого вещества. Какое это вещество?

**13.14.** Для определения электрохимического эквивалента меди электрический ток пропускали через водный раствор сульфата меди. При силе тока 1,2 А за 5,0 мин масса катода увеличилась на 120 мг. Какое значение электрохимического эквивалента меди было получено на основании проведенного опыта? Определить относительную погрешность измерения путем сравнения с табличным значением  $k$ .

**13.15.** Амперметр, включенный в цепь последовательно с электролитической ванной, показывает 1,5 А. Какую поправку необходимо внести в показание амперметра, если за 10 мин протекания в цепи тока на катоде ванны выделилось 0,316 г меди?

**13.16.** С какой целью в гальванотехнике применяется реверсирование (изменение направления) тока?

**13.17.** За 5,0 мин электролиза водного раствора нитрата серебра на катоде выделилось 50 мг серебра. При этом амперметр, включенный в цепь, показал 0,150 А. Верно ли показание прибора?

**13.18.** Сколько двухвалентного никеля можно выделить электролитическим путем из водного раствора сульфата никеля за 1,2 ч? Напряжение на зажимах ванны 4 В; сопротивление электролита 2,5 Ом.

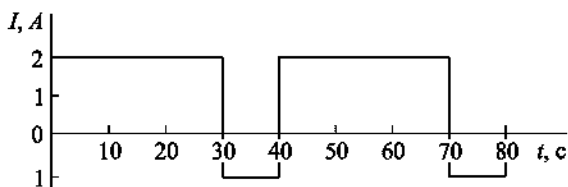
**13.19.** При электролизе водного раствора сульфата меди за 50 мин на катоде выделилось 3,0 г меди. Определить мощность, расходуемую на нагревание электролита, если его сопротивление 0,80 Ом.

**13.20.** За какое время полностью израсходуется медный анод размером  $100 \times 50 \times 2,0$  мм, если сила тока в цепи при электролизе была 3,0 А?

**13.21.** С какой целью в небольших гальванических ваннах используют не один, а два анода, между которыми помещается изделие?

**13.22.** Электролиз водного раствора нитрата серебра продолжался 2,0 мин так, что первые 30 с сила тока в цепи нарастала равномерно от 0 до 2,0 А, а оставшееся время не изменялась. Определить массу серебра, выделенного на катоде.

**13.23.** Пользуясь графиком зависимости силы тока от времени, показанным на рисунке, определить массу меди, выделенной при электролизе водного раствора сульфата меди.



К задаче 13.23

**13.24.** В процессе электролиза водного раствора сульфата меди сила тока в цепи изменялась во времени по закону  $I = 0,020 t$ . Сколько ионов меди нейтрализовалось у катода за 2,0 мин? На сколько увеличилась масса катода за это время?

**13.25.** Сколько серебра выделится из водного раствора серебряной соли за 2,0 мин, если в процессе электролиза сила тока в цепи изменяется по закону  $I = 6 - 0,030 t$ ?

**13.26.** При гальваническом покрытии чаще всего используют никель и хром. Почему?

**13.27.** Никелирование изделия проводилось 9,0 ч при плотности тока  $0,45$  А/дм<sup>2</sup>. Определить толщину слоя двухвалентного никеля на изделии, если выход по току составил 89 %.

**13.28.** Электролитическое серебрение изделия протекало при плотности тока  $0,50$  А/дм<sup>2</sup>. Сколько времени потребуется для того, чтобы на изделии образовался слой серебра толщиной 7,0 мкм, если выход по току равен 85 %?

**13.29.** К зажимам генератора, дающего напряжение 120 В, последовательно подключаются 25 электролитических ванн и реостат. В каждой ванне за 2,0 ч должно выделяться 4,0 г серебра. Напряжение на зажимах одной ванны равно 4,2 В. Определить силу тока, проходящего через ванны, КПД установки и толщину слоя серебра, если общая поверхность, покрываемая серебром, составляет  $23,8$  дм<sup>2</sup>.



**13.30.** При какой плотности тока скорость нарастания слоя серебра на изделии в процессе электролиза будет равна  $6,0 \cdot 10^{-3}$  мкм/с?

**13.31.** Электролиз водного раствора сульфата никеля  $\text{NiSO}_4$  протекал при плотности тока  $0,15 \text{ А/дм}^2$ . Сколько атомов никеля выделилось за 2 мин на  $1,0 \text{ см}^2$  поверхности катода?

**13.32.** Электролиз водного раствора сульфата меди протекал при плотности электрического тока  $2,0 \text{ А/дм}^2$ . Сколько потребовалось времени для того, чтобы толщина анода уменьшилась на  $0,030 \text{ мм}$ ?

**13.33.** Напряжение на зажимах электролитической ванны  $1,80 \text{ В}$ , а сопротивление водного раствора сульфата никеля  $3,75 \text{ Ом}$ . Сколько потребуется времени и какая энергия будет израсходована для покрытия изделия слоем никеля  $0,030 \text{ мм}$ , если площадь его поверхности  $120 \text{ см}^2$ ?

**13.34.** Сколько алюминия можно получить при затрате  $1,0 \text{ кВт} \cdot \text{ч}$  электрической энергии, если электролиз ведется при напряжении  $5 \text{ В}$ , а КПД всей установки  $80\%$ ?

**13.35.** В процессе рафинирования меди в ванну с водным раствором сульфата меди была погружена медная пластинка (анод), содержащая  $10\%$  примеси. Определить энергию, необходимую для очистки  $1 \text{ кг}$  такой меди, и ее стоимость при действующем тарифе за  $1,0 \text{ кВт} \cdot \text{ч}$ , если напряжение на электродах ванны  $6,0 \text{ В}$ .

**13.36.** При серебрении изделий из раствора соответствующей соли за  $2,0 \text{ ч}$  выделилось  $40,32 \text{ г}$  серебра. Сопротивление электролита  $1,2 \text{ Ом}$ . Определить силу тока в цепи ванны, напряжение на ее зажимах и расход энергии за время серебрения.

**13.37.** При любом ли напряжении возможен электролиз?

**13.38 \*).** При каком наименьшем значении ЭДС источника тока происходит электролиз подкисленной воды, если известно, что при взрыве гремучего газа на каждый грамм прореагировавшего водорода выделяется приблизительно  $144 \text{ кДж}$  энергии?

**13.39.** При каком напряжении на зажимах ванны протекает электролиз водного раствора сульфата меди, если за  $40 \text{ мин}$  на катоде выделилось  $1,98 \text{ г}$  меди? Сопротивление электролита  $1,3 \text{ Ом}$ , а ЭДС поляризации  $1,3 \text{ В}$ .

**13.40.** При электролизе за  $50 \text{ мин}$  из соответствующего электролита выделилось  $2,04 \text{ г}$  цинка. Определить ЭДС поляризации, если сопротивление электролита  $1,8 \text{ Ом}$ , а напряжение на зажимах ванны  $4,2 \text{ В}$ .

**13.41.** Батарея аккумуляторов с ЭДС  $3,9 \text{ В}$  и внутренним сопротивлением  $0,09 \text{ Ом}$  присоединена к двум электродам, опущенным в ванну с водным раствором сульфата меди. За какое время выделится  $1 \text{ г}$  меди, если сопротивление раствора  $0,51 \text{ Ом}$  и ЭДС поляризации  $1,5 \text{ В}$ ?

**13.42.** Зная атомную массу и валентность алюминия, вычислить его электрохимический эквивалент. Сколько алюминия можно получить за сутки, если электролиз протекает при силе тока  $3,0 \text{ А}$ ?

\*) Гремучий газ — смесь водорода с кислородом в отношении  $2:1$  (по объему).

**13.43.** Вычислить электрохимические эквиваленты натрия, хлора и алюминия, зная, что электрохимический эквивалент серебра равен  $1,118 \cdot 10^{-6}$  кг/Кл.

**13.44.** Зная атомную массу и валентность кислорода, определить его электрохимический эквивалент и массу, выделившуюся в процессе электролиза при прохождении электрического заряда 5,5 Кл.

**13.45.** Сколько атомов двухвалентного цинка можно выделить на катоде за 5,0 мин, если электролиз водного раствора сульфата цинка ведется при силе тока 2,5 А?

**13.46.** Сколько атомов двухвалентного металла осядет на катоде за 1,0 мин, если электролиз ведется при плотности тока  $0,15 \text{ А/дм}^2$ ? Площадь катода равна  $0,50 \text{ дм}^2$ .

**13.47.** Определить массу атома водорода, если его электрохимический эквивалент равен  $1,044 \cdot 10^{-8}$  кг/Кл.

**13.48.** Электролитическим путем при силе тока 160 А разложено 0,90 г воды. За какое время это произошло и каковы массы выделившихся водорода и кислорода?

**13.49.** Одним из способов очистки воды от твердых примесей является электрофлотация. Какие два процесса заложены в основу этого способа очистки?

**13.50.** Никелирование изделия продолжалось 6,5 ч, при этом образовался слой никеля толщиной 0,12 мм. При какой плотности тока протекал электролиз? КПД установки 90 %.

**13.51.** При электролизе подкисленной воды за 50 мин выделилось 3,3 л водорода при нормальных условиях. Определить мощность, расходуемую на нагревание электролита, если его сопротивление равно 0,40 Ом.

**13.52.** При электролизе водного раствора соляной кислоты выделилось  $27,75 \text{ см}^3$  гремучего газа при нормальных условиях. Определить протекавший электрический заряд.

**13.53.** Электролиз подкисленной воды протекал при силе тока 2,5 А в течение 12 мин. Найти объемы (при нормальных условиях) выделившихся водорода и кислорода и их массы.

**13.54.** При электролизе подкисленной воды расходуется мощность 32,5 Вт. Определить сопротивление электролита, если за 2 ч 23 мин добыто 5,0 л водорода при нормальных условиях.

**13.55.** При прохождении через слабый раствор серной кислоты заряда 4,0 Кл выделилось 0,40 л водорода при давлении 128 кПа. Какова его температура?

**13.56.** При прохождении электрического тока через слабый раствор серной кислоты получено 5,0 л водорода при температуре  $27^\circ\text{C}$  и давлении 101,3 кПа. Сколько израсходовано электроэнергии, если напряжение на зажимах ванны 5,0 В, а КПД установки равен 80 %?

**13.57.** За время протекания электролиза через водный раствор перенесено  $5,2 \cdot 10^{23}$  электронов. Какое установится давление после того,

как полученный при этом хлор будет заключен в баллон вместимостью 5,0 л при температуре 300 К?

**13.58.** Азростат вместимостью  $250 \text{ м}^3$  необходимо заполнить водородом при температуре  $27^\circ \text{C}$  и давлении 0,20 МПа. Какое количество электричества необходимо пропустить через электролитическую ванну со слабым раствором серной кислоты, чтобы выделенного водорода было достаточно для заполнения азростата?

### Гальванические элементы и аккумуляторы

**13.59.** Что положено в основу любого химического источника тока? Приведите примеры химических источников тока.

**13.60.** Каково принципиальное устройство гальванического элемента?

**13.61.** Почему ЭДС в элементе Вольта в процессе работы уменьшается?

**13.62.** Гальванический элемент Даниэля состоит из стеклянного сосуда с раствором сульфата меди, в который помещена медная пластина (положительный электрод). Установленный внутри пористый сосуд содержит раствор серной кислоты, куда погружен стержень из цинка (отрицательный электрод). Сколько цинка израсходуется за 30 мин работы элемента при силе тока  $0,50 \text{ А}$ ?

**13.63.** Для чего в гальваническом элементе Даниэля используется второй электролит — водный раствор сульфата меди?

**13.64.** На аккумуляторе написано «Емкость  $55 \text{ А} \cdot \text{ч}$ ». Что это означает?

**13.65.** Напряжение, при котором осуществляется зарядка аккумулятора, больше его ЭДС. Чем это вызвано?

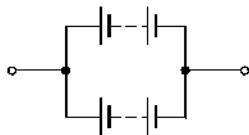
**13.66.** Почему при изготовлении электродов для свинцовых аккумуляторов используют тщательно очищенный свинец?

**13.67.** Зарядка батареи аккумуляторов с ЭДС  $5,4 \text{ В}$  осуществлялась  $4,0 \text{ ч}$  при напряжении  $7,2 \text{ В}$  и силе тока  $10 \text{ А}$ . Каков КПД батареи, если ее разрядка продолжалась  $8,0 \text{ ч}$  при силе тока  $4,0 \text{ А}$ ?

**13.68.** Для защиты морских судов от коррозии применяется метод протекторов: на стальной поверхности корпуса в разных местах закрепляются листы цинка. Почему в этом случае корпус менее подвержен коррозии?

**13.69.** Для борьбы с обледенением в зимнее время используют соль. Объяснить, почему для защиты железобетонных конструкций мостов от разрушений при использовании соли на них подают напряжение порядка  $4 \text{ В}$ . Каким оно должно быть по знаку?

**13.70.** Заряд батареи, составленной из шести последовательно соединенных аккумуляторов, равен  $194,4 \text{ кКл}$ . Каков заряд одного аккумулятора? Каким будет заряд батареи, если аккумуляторы в ней соединить по схеме, изображенной на рисунке?



К задаче 13.70

**13.71.** Батарея составлена из шести аккумуляторов, соединенных по схеме, изображенной на рисунке к задаче 13.70. ЭДС и заряд одного аккумулятора соответственно равны 2,0 В и  $7,2 \cdot 10^4$  Кл. Внутреннее сопротивление их пренебрежимо мало. Определить общий заряд батареи, силу тока во внешней части цепи сопротивлением 1,5 Ом и продолжительность непрерывной работы батареи в этой цепи.

**13.72.** Аккумулятор с внутренним сопротивлением 0,01 Ом и начальной ЭДС 1,8 В заряжается от сети напряжением 2,7 В. Определить полезную мощность, расходуемую на зарядку аккумулятора, мощность, идущую на нагревание аккумулятора, и полную мощность в начальный момент заряженного аккумулятора.

**13.73.** Два аккумулятора с внутренними сопротивлениями  $r_1$  и  $r_2$  имеют КПД  $\eta_1$  и  $\eta_2$ , когда каждый из них замкнут на одинаковое внешнее сопротивление. Определить КПД батареи, составленной из этих аккумуляторов, соединенных последовательно и замкнутых на то же сопротивление.

## § 14. Электрический ток в газах и вакууме

**Пример 61.** Под действием ионизатора в  $1 \text{ м}^3$  пространства между обкладками плоского воздушного конденсатора, соединенного с источником постоянного напряжения, в 1 с образуется  $2,5 \cdot 10^8$  пар одновалентных ионов. Определить силу тока насыщения, если площадь каждой обкладки равна  $10 \text{ см}^2$ , а расстояние между ними составляет 2,0 см. Считать, что все ионы достигают обкладок конденсатора.

*Дано:*  $n = 2,5 \cdot 10^8 \text{ см}^{-3} \cdot \text{с}^{-1} = 2,5 \cdot 10^{14} \text{ м}^{-3} \cdot \text{с}^{-1}$  — число пар одновалентных ионов, образующихся за 1 с в  $1 \text{ м}^3$  воздуха;  $S = 10 \text{ см}^2 = 1,0 \cdot 10^{-3} \text{ м}^2$  — площадь каждой обкладки;  $d = 2,0 \text{ см} = 2,0 \cdot 10^{-2} \text{ м}$  — расстояние между обкладками. Из таблиц:  $e = 1,6 \cdot 10^{-19} \text{ Кл}$  — заряд одновалентного иона.

*Найти:*  $I_n$  — силу тока насыщения.

**Решение.** Сила тока насыщения определяется по формуле  $I_n = Q/t$ , где  $Q$  — заряд всех ионов одного знака, а  $t$  — время его прохождения.

Электрический заряд  $Q$  можно найти, используя данные из условия задачи

$$Q = nVet, \quad \text{где} \quad V = dS.$$

В окончательном виде получим

$$\begin{aligned} I_n &= ndSe = \\ &= 2,5 \cdot 10^{14} \cdot 2,0 \cdot 10^{-2} \cdot 1,0 \cdot 10^{-3} \cdot 1,6 \cdot 10^{-19} \text{ м}^{-3} \cdot \text{с}^{-1} \cdot \text{м} \cdot \text{м}^2 \cdot \text{Кл} = \\ &= 8 \cdot 10^{-10} \text{ Кл/с} = 0,8 \text{ нА}. \end{aligned}$$

Выражение для тока насыщения подтверждает его независимость от напряжения.

*Ответ:*  $I_n = 0,8 \text{ нА}$ .

**Пример 62.** Для ионизации атома водорода электроны разгоняются до скорости  $2,19 \cdot 10^3$  км/с. Определить потенциал ионизации атома водорода. Возможна ли ионизация атома водорода ионом, обладающим такой же энергией, как и электрон?

*Дано:*  $v = 2,19 \cdot 10^3$  км/с  $= 2,19 \cdot 10^6$  м/с — скорость электрона. Из таблиц:  $e = 1,6 \cdot 10^{-19}$  Кл — заряд электрона,  $m = 9,1 \cdot 10^{-31}$  кг — масса электрона.

*Найти:*  $\varphi_i$  — потенциал ионизации; произойдет ли ионизация атома, если вместо электрона взять ион с той же энергией?

**Решение.** Будем исходить из того, что электрон полностью отдает свою энергию атому. Тогда для его ионизации будет совершена работа  $A_i$  за счет энергии электрона  $W$ , т. е.

$$W = A_i, \quad \text{или} \quad \frac{mv^2}{2} = e\varphi_i.$$

Отсюда

$$\varphi_i = \frac{mv^2}{2e} = \frac{9,1 \cdot 10^{-31} \cdot (2,19 \cdot 10^6)^2}{2 \cdot 1,6 \cdot 10^{-19}} \frac{\text{кг} \cdot \text{м}^2/\text{с}^2}{\text{Кл}} \approx 13,6 \text{ В}.$$

Ударная ионизация одноатомного газа электронами либо ионами возможна при условии

$$\frac{mv^2}{2} \geq A_i \left(1 + \frac{m}{M}\right).$$

Здесь  $mv^2/2$  — кинетическая энергия ионизирующей частицы,  $m$  и  $M$  — масса частицы и атома. Для электрона отношением  $m/M$  можно пренебречь. Для других ионизирующих частиц их кинетическая энергия должна быть больше  $A_i$ .

**Ответ:**  $\varphi_i = 13,6$  В, в рассмотренном примере ионизация атома ионами не произойдет.

**14.1.** Чем отличается ионизация газов от ионизации проводящих жидкостей?

**14.2.** Пламя горелки, внесенное в электрическое поле, раздваивается. Почему?

**14.3.** Почему заряженный электроскоп с течением времени разряжается?

**14.4.** До какого максимального потенциала можно зарядить проводящий шар радиусом 5,0 см, если электрическая прочность чистого сухого воздуха 3,0 МВ/м? Какой максимальный заряд при этих условиях возможен на шаре? Диэлектрическую проницаемость воздуха принять равной единице.

**14.5.** Какой минимальной кинетической энергией должен обладать электрон, чтобы ионизовать атом водорода, для которого потенциал ионизации равен 13,54 В?

**14.6.** Для ионизации атомов гелия необходима энергия  $39,328 \times 10^{-19}$  Дж. Чему равен потенциал ионизации атомов гелия?

**14.7.** Будут ли атомы хлора ионизоваться электронами с кинетической энергией  $2,0 \cdot 10^{-18}$  Дж, если потенциал ионизации для атомов хлора 13,0 В?

**14.8.** Какой должна быть длина свободного пробега электрона, чтобы при напряженности электрического поля 20 МВ/м он мог ионизовать атом газа с энергией ионизации  $2,08 \cdot 10^{-18}$  Дж?

**14.9.** Какую минимальную скорость должен иметь электрон, чтобы ионизовать атом аргона? Потенциал ионизации атомов аргона равен 15,7 В.

**14.10.** Одновалентный ион до столкновения с неподвижным атомом проходит без соударений ускоряющую разность потенциалов, равную потенциалу ионизации  $\varphi_{\text{и}}$ . Достаточна ли его кинетическая энергия для ударной ионизации атома? Начальная скорость иона равна нулю.

**14.11.** Каким частицам — одновалентным ионам или электронам — нужно пройти большую разность потенциалов для приобретения кинетической энергии, необходимой для ударной ионизации?

**14.12.** При какой температуре атомы неона имеют среднюю кинетическую энергию поступательного движения, равную энергии ионизации? Достаточную для ионизации ударом неподвижного атома? Потенциал ионизации неона 21,5 В.

**14.13.** Потенциал ионизации атомов гелия 24,58 В. Достаточна ли средняя кинетическая энергия поступательного движения атомов гелия при температуре  $1,9 \cdot 10^5$  К для ударной ионизации неподвижных атомов гелия?

**14.14.** Будут ли атомы натрия, попадающие в плоский воздушный конденсатор, ионизоваться при соударении с электронами, если напряжение на пластинах конденсатора равно 10,5 кВ, а расстояние между ними 1,02 см? Среднюю длину свободного пробега электронов в воздухе при нормальных условиях принять равной 5,1 мкм, а потенциал ионизации натрия — 5,12 В.

**14.15.** Плоский конденсатор находится в стеклянной трубке, заполненной смесью гелия и аргона при пониженном давлении. Будет ли происходить в конденсаторе ионизация атомов гелия и аргона при столкновении с электронами, длина свободного пробега которых 92 мкм, если напряжение на конденсаторе 4,2 кВ, расстояние между его пластинами 2,43 см, а потенциалы ионизации гелия и аргона соответственно 24,5 и 15,7 В?

**14.16.** Почему количество ионов в газе под действием постоянного ионизатора увеличивается до определенного предела, а затем сохраняется неизменным?

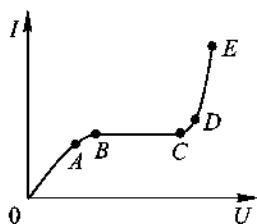
**14.17.** Плоский воздушный конденсатор с расстоянием между пластинами 1,5 см заряжен до напряжения 100 В и отключен от источника энергии. Под действием ионизатора в каждом кубическом сантиметре пространства между пластинами образуется  $5 \cdot 10^4$  пар одновалентных ионов в секунду. Считая, что все образовавшиеся ионы достигают

пластин, площадь которых  $8,0 \text{ см}^2$ , определить напряжение на конденсаторе через 2,0 мин после включения ионизатора.

**14.18.** В пространстве между пластинами плоского воздушного конденсатора, подключенного к источнику постоянного напряжения, под действием ионизатора образуются одновалентные ионы. При этом в цепи возникает сила тока насыщения  $3,2 \cdot 10^{-16} \text{ А}$ . Определить количество пар ионов, образующихся за 1 с в  $1 \text{ см}^3$ , если площадь пластин  $10,0 \text{ см}^2$ , расстояние между ними 1,25 см. Считать, что все ионы достигают пластин.

**14.19.** Может ли возникнуть ток насыщения при самостоятельном разряде в газе?

**14.20.** На графике (см. рисунок) изображена вольт-амперная характеристика газового разряда. Какой участок графика соответствует несамостоятельному разряду? Самостоятельному разряду? Как называется ток, соответствующий участку  $BC$ ? Остается ли при этом неизменным сопротивление газа? К какому участку графика применим закон Ома для участка цепи?



К задаче 14.20

**14.21.** При каких условиях несамостоятельный разряд переходит в самостоятельный?

**14.22.** Какие требуются условия для возникновения электрической дуги при атмосферном давлении?

**14.23.** Как изменяется напряжение между электродами в момент зажигания электрической дуги?

**14.24.** Что необходимо предпринять, чтобы при зажигании электрической дуги, напряжение между электродами не изменялось?

**14.25.** Что произойдет с электрической дугой, если охлаждать катод? анод?

**14.26.** С одинаковой ли скоростью сгорают электроды при дуговом разряде, если электрический ток постоянный? переменный?

**14.27.** Если электрическая дуга создается источником постоянного тока, то анод должен быть толще катода. Для чего?

**14.28.** В каком случае температура электродов при дуговом разряде будет выше — когда они из угля или из металла?

**14.29.** Как изменится температура дугового разряда с повышением давления газа?

**14.30.** Электрическая дуга расширяется, если ее поместить в магнитное поле, перпендикулярное направлению тока. Почему?

**14.31.** Почему в электрических дуговых печах можно получить высококачественную сталь?

**14.32.** Можно ли с помощью электрической дуги вести сварку в воде?

**14.33.** Возможен ли дуговой разряд при пониженном давлении?

**14.34.** Почему искровой разряд возникает при напряжении в несколько киловольт, в то время как для возникновения дугового разряда достаточно 40–50 В?

**14.35.** Почему искровой разряд распространяется с очень большой скоростью?

**14.36.** Определить электрический заряд, прошедший по искровому каналу, и выделенную при этом энергию за  $10^{-3}$  с, если при напряжении  $10^6$  В сила тока в молнии достигает 50 кА.

**14.37.** С какой целью на высоковольтных линиях передачи электроэнергии (ЛЭП) над основными проводами расположены два дополнительных провода, не изолированных от стальных опор?

**14.38.** Что можно сказать о средней и мгновенной мощности тока при искровом разряде?

**14.39.** Почему, используя искровой разряд, можно обрабатывать детали из самых твердых и тугоплавких металлов и сплавов? К какому полюсу источника тока следует присоединить обрабатываемую деталь?

**14.40.** Каким образом искровой разряд можно использовать для штамповки деталей из металла? Для чего присоединяют к электродам батарею конденсаторов?

**14.41.** В механических автомобильных прерывателях тока может возникать нежелательная электрическая искра, вызывающая обгорание контактов и нарушение работы двигателя. Как предотвратить обгорание контактов?

**14.42.** Как, используя искровой разряд, можно покрывать металлические детали другими металлами?

**14.43.** Где и при каких условиях возникает коронный разряд?

**14.44.** В чем отличие ионизации газа при коронном разряде от ионизации при дуговом и искровом разряде?

**14.45.** Как зависят потери энергии при коронном разряде от передаваемого напряжения? от погоды?

**14.46.** Зависят ли потери энергии на коронный разряд от диаметра проводов?

**14.47.** Почему присоединение к каждому полюсу источника тока высокого напряжения нескольких проводов, удаленных друг от друга, приводит к ослаблению коронного разряда?

**14.48.** Где и как коронный разряд используется для защиты окружающей среды?

**14.49.** Как называется состояние вещества в электрической дуге, в газоразрядных трубках, в верхних слоях атмосферы, на Солнце?

**14.50.** Почему разрежение газа улучшает его проводимость?

**14.51.** Каким способом атомы газа можно перевести в возбужденное состояние?

**14.52.** В каких случаях атом испускает свет?

**14.53.** Почему при разряде в разреженных газах каждый газ светится своим цветом?

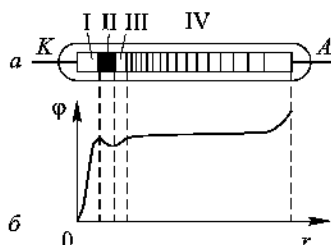


**14.54.** Почему полярные сияния чаще и интенсивнее происходят в периоды наибольшей солнечной активности? Почему они не происходят в экваториальных широтах и редко бывают в средних широтах?

**14.55.** Почему полярные сияния сопровождаются магнитными бурями (непрерывными колебаниями магнитной стрелки)?

**14.56.** Какой разряд в газах называется тлеющим?

**14.57.** На рисунке схематически показано расположение темных и светящихся областей тлеющего разряда в газоразрядной трубке с плоскими электродами, содержащей разреженный газ, и распределение потенциала вдоль оси трубки. Как называются области тлеющего разряда, обозначенные на рисунке цифрами I, II, III, IV? Какие процессы происходят в них?

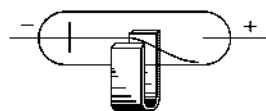


К задаче 14.57

**14.58.** Назовите возможные применения тлеющего разряда.

**14.59.** Какую роль играет разреженный газ при создании катодных лучей в газоразрядной трубке? Возникнут ли катодные лучи в трубке, из которой полностью удален газ?

**14.60.** Определить на рисунке направление магнитного поля, отклоняющего катодные лучи в трубке.



К задаче 14.60

**14.61.** Где используются электронные пучки в вакууме?

**14.62.** Работа выхода электрона с поверхности бария равна 2,49 эВ. Определить потенциал работы выхода у бария. Какой кинетической энергией должен обладать электрон, чтобы совершить работу выхода?

**14.63.** Какая температура соответствует средней кинетической энергии электронов, равной работе выхода с поверхности вольфрама? Потенциал работы выхода из вольфрама 4,54 В.

**14.64.** Рабочая температура у вольфрамового катода 2500 К. Могут ли электроны совершить работу выхода, если они обладают средней кинетической энергией, соответствующей этой температуре?

**14.65.** При какой минимальной нормальной (перпендикулярной к поверхности катода) составляющей скорости электроны могут вырваться за пределы вольфрама? бария? тория? Потенциал работы выхода из тория 3,38 В.

**14.66.** При совершении работы выхода из бария кинетическая энергия электрона уменьшилась в 4 раза. Определить начальную скорость  $v_{\perp}$  электрона и скорость в момент его вылета из катода. Вектор скорости направлен нормально к поверхности катода.

**14.67.** От чего зависит количество электронов, испаряющихся с поверхности катода в 1 с?

**14.68.** Как, не изменяя размеры и температуру катода, увеличить его эмиссию?

**14.69.** Найти максимальное значение силы тока насыщения, если за 1 с поверхность катода покидает  $5 \cdot 10^{16}$  электронов.

**14.70.** Сколько электронов эмитирует за 1 с с поверхности катода при силе тока насыщения 12 мА? Считать, что все электроны достигают анода.

**14.71.** Как можно вырывать электроны с холодного катода? Как называются такие явления?

**14.72.** Можно ли изменить силу тока насыщения в катодной лампе?

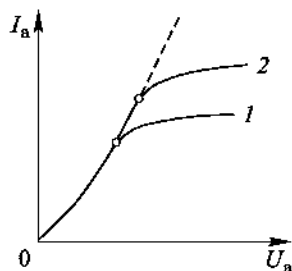
**14.73.** Почему в электронной лампе при разомкнутой анодной цепи и раскаленном катоде пространственный отрицательный заряд остается постоянным, хотя испарение электронов с катода происходит непрерывно?

**14.74.** Сила анодного тока в лампе равна 10 мА, если к ней приложено напряжение 300 В. Определить количество теплоты, выделяемой на аноде за 1 с, и падение напряжения на сопротивлении 5 кОм, включенное в анодную цепь.

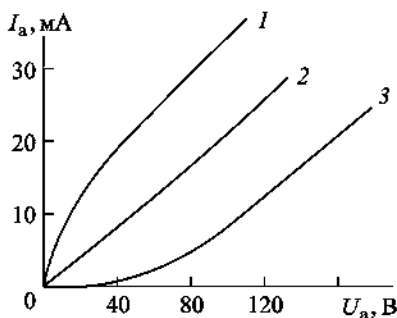
**14.75.** Определить минимальное сопротивление нагрузки электровакуумной лампы с внутренним сопротивлением 100 Ом, если допустимая сила тока составляет 100 мА, а потребляемая в цепи мощность равна 10 Вт. Какая мощность при этом выделяется на аноде?

**14.76.** С катода, представляющего собой нить длиной 5,0 см и диаметром 0,16 мм, испускаются за 1 с  $1,5 \cdot 10^{17}$  электронов с  $1 \text{ см}^2$  поверхности. Считая, что анода достигает каждый пятый электрон, определить падение напряжения на сопротивлении 5,0 кОм, включенном в анодную цепь лампы.

**14.77.** Какой из графиков зависимости силы анодного тока от анодного напряжения, представленных на рисунке, соответствует более высокой температуре катода?



К задаче 14.77



К задаче 14.78

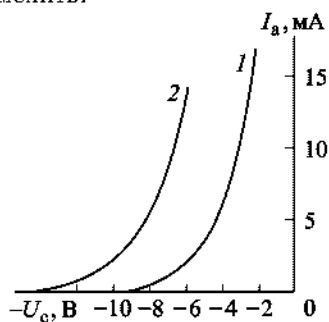
**14.78.** Какой из графиков зависимости силы анодного тока от анодного напряжения в триоде, представленных на рисунке, соответствует напряжению на участке сетка-катод.

**14.79.** Какой из графиков зависимости силы анодного тока от напряжения на сетке, представленных на рисунке, соответствует более высокому анодному напряжению?

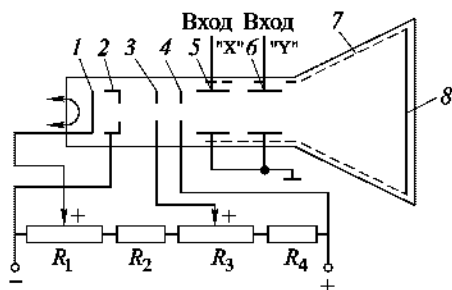
**14.80.** Почему газонаполненные лампы могут работать при большей силе тока, чем вакуумные?

**14.81.** С какой целью в электронно-лучевой трубке создается высокий вакуум?

**14.82.** Для чего в электронно-лучевых трубках на пути электронного луча помещают два плоских конденсатора, пластины которых расположены во взаимно перпендикулярных плоскостях? Чем их можно заменить?



К задаче 14.79



К задаче 14.83

**14.83.** Каково название и назначение частей электронно-лучевой трубки, изображенной на рисунке?

**14.84.** Внутри трубки для получения катодных лучей находится плоский конденсатор с длиной пластин 4,5 см и расстоянием между ними 1,8 см. Определить напряжение на пластинах конденсатора, если пучок катодных лучей, проходящих параллельно пластинам, отклоняется в нем на 1,2 мм. Скорость электронов в катодных лучах принять равной  $5,0 \cdot 10^4$  км/с.

## § 15. Электрический ток в полупроводниках

**15.1.** Как отличаются по удельному сопротивлению проводники, полупроводники и диэлектрики?

**15.2.** Что можно сказать о концентрации электронов и дырок, определяющих проводимость чистого полупроводника? Чему равен его заряд?

**15.3.** Под действием каких причин может происходить генерация электронов и дырок?

**15.4.** Что происходит при слиянии электронов и дырок?

**15.5.** Почему при неизменных внешних условиях количество свободных носителей электрических зарядов в полупроводнике остается

постоянным, хотя образование пар электрон–дырка происходит непрерывно?

**15.6.** Как и почему изменяется сопротивление чистых полупроводников при повышении температуры?

**15.7.** Что можно сказать о температурном коэффициенте сопротивления полупроводника?

**15.8.** При нагревании полупроводников уменьшается длина свободного пробега электронов. Почему же при этом уменьшается удельное сопротивление?

**15.9.** В каких приборах используется зависимость сопротивления полупроводника от температуры?

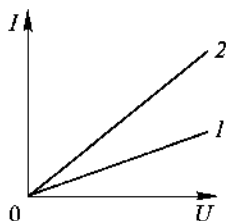
**15.10.** На участке цепи с постоянным напряжением соединены последовательно металлический и полупроводниковый резисторы. Определить, как изменится сила тока в цепи при нагревании резистора металлического? полупроводникового?

**15.11.** Концентрация свободных электронов в металлах имеет порядок  $10^{23} \text{ см}^{-3}$ , а в германии при комнатной температуре —  $3 \cdot 10^{13} \text{ см}^{-3}$ . Как отличаются удельные сопротивления германия и металлов?

**15.12.** В полупроводниковом фоторезисторе электронно-дырочные пары генерируются под действием излучения. Как меняется сопротивление фоторезистора с увеличением освещенности?

**15.13.** Как объяснить возможность возникновения электрического тока в фоторезисторе при отсутствии освещенности?

**15.14.** Зависимость силы тока в фоторезисторе от напряжения показана на рисунке. Выполняется ли закон Ома для данного фоторезистора? Какой из графиков соответствует большей освещенности?



К задаче 15.14

**15.15.** Как в полупроводниках создается преимущественно электронная проводимость? дырочная проводимость?

**15.16.** При добавлении каких из указанных примесей — фосфора, мышьяка, сурьмы, галлия, бора, индия — германиевый полупроводник приобретает преимущественно электронную проводимость? дырочную проводимость?

**15.17.** Как изменяется сопротивление примесных полупроводников в зависимости от температуры?

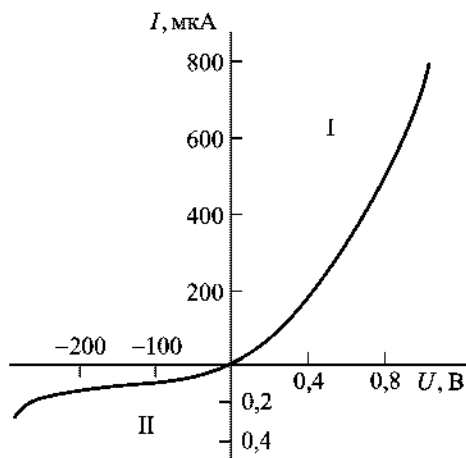
**15.18.** Сохраняется ли в примесных полупроводниках собственная (неосновная) проводимость?

**15.19.** Что можно сказать о концентрации свободных носителей заряда в  $p$ – $n$ -переходе? его сопротивлении?

**15.20.** Почему свободные носители зарядов не могут удержаться в области  $p$ – $n$ -перехода?

**15.21.** На рисунке показана зависимость силы тока через полупроводниковый диод от напряжения. Какая часть графика соответствует

току, идущему в прямом направлении? в обратном? Почему вольт-амперная характеристика имеет неодинаковые масштабы для прямого и обратного тока?



К задаче 15.21

**15.22.** При одинаковом напряжении в  $p$ - $n$ -переходе сила прямого тока значительно больше обратного. Почему?

**15.23.** Полупроводниковый вентиль в сеть переменного тока должен включаться с нагрузкой. Почему?

**15.24.** Найти максимальное напряжение питания схемы с полупроводниковым диодом и резистором нагрузки  $100\text{ кОм}$ , если сила обратного тока составляет  $150\text{ мкА}$ , а допустимое обратное напряжение диода не может превышать  $100\text{ В}$ .

**15.25.** Почему при значительном повышении температуры выпряляющее действие  $p$ - $n$ -перехода резко ослабляется? При каких температурах допускается применение германиевых приборов? кремниевых?

**15.26.** Объясните работу выпрямителей, собранных по схемам, показанным на рисунках  $a$ - $в$ . Какой из графиков зависимости силы тока от времени на рисунках  $г$ ,  $д$  соответствует схемам выпрямителей, изображенных на рисунках  $a$ - $в$ ?

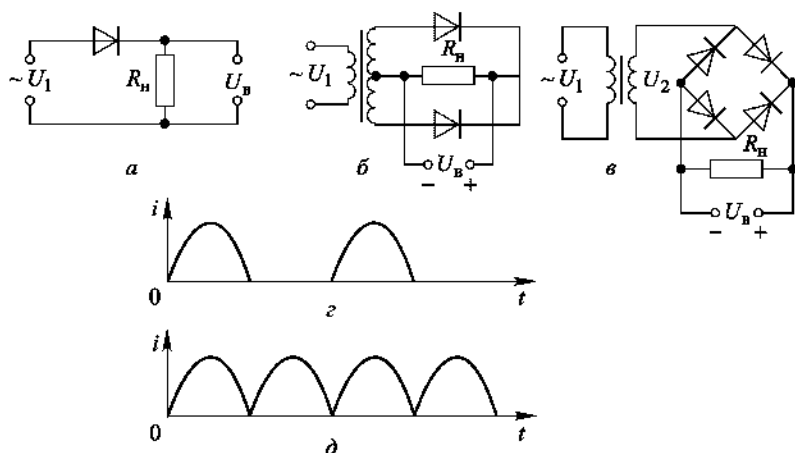
**15.27.** Почему ширина базы в транзисторе должна быть соизмерима с длиной свободного пробега носителей заряда?

**15.28.** Концентрация примесей в эмиттере транзистора значительно больше, чем в базе. Почему?

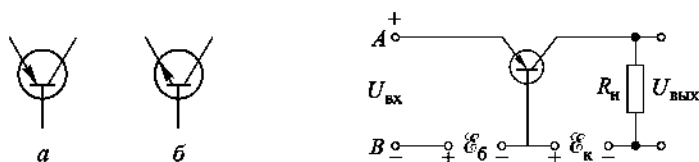
**15.29.** Какой зависимостью связаны сила тока эмиттера, базы и коллектора?

**15.30.** На транзисторе одинаково увеличивают напряжение на участках эмиттер-база и база-коллектор. Одинаково ли возрастает сила тока в цепи коллектора в этих случаях?

**15.31.** Какого типа транзисторы,  $p-n-p$  или  $n-p-n$ , изображены на рисунке? Нарисуйте простейшие схемы включения этих транзисторов и укажите на них эмиттер, базу, коллектор.



К задаче 15.26



К задаче 15.31

К задаче 15.32

**15.32.** На рисунке изображена одна из возможных схем простейшего транзисторного усилителя. Как называется такая схема? Как изменяется выходное напряжение  $U_{вых}$ , когда на вход эмиттер–база подается входное напряжение  $U_{вх}$ , как показано на схеме?

## § 16. Электромагнетизм

**Пример 63.** Два проводника с токами в вакууме — прямолинейный большой длины и круговой радиусом  $0,10\text{ м}$  — расположены, как показано на рисунке. Расстояние от прямолинейного проводника до центра  $O$  кругового проводника  $0,20\text{ м}$ . Определить в точке  $O$  напряженность и индукцию магнитного поля и угол, который напряженность в этой точке образует с плоскостью кругового тока, если сила тока в прямолинейном проводнике равна  $25\text{ А}$ , а в круговом —  $10\text{ А}$ .

**Дано:**  $a = 0,20\text{ м}$  — расстояние от прямолинейного проводника до центра кругового;  $R = 0,10\text{ м}$  — радиус кругового проводника;  $I_1 = 25\text{ А}$ ,  $I_2 = 10\text{ А}$  — сила тока соответственно в прямолинейном и

круговом проводниках. Из таблиц:  $\mu_0 = 4\pi \cdot 10^{-7}$  Гн/м — магнитная постоянная.

**Найти:**  $\mathbf{H}$  — напряженность и  $\mathbf{B}$  — индукцию магнитного поля в центре кругового проводника,  $\alpha$  — угол между вектором  $\mathbf{H}$  и плоскостью кругового проводника.

**Решение.** Напряженность  $\mathbf{H}$  магнитного поля в точке  $O$  является векторной суммой напряженностей  $\mathbf{H}_1$  и  $\mathbf{H}_2$  в этой точке:

$$\mathbf{H} = \mathbf{H}_1 + \mathbf{H}_2,$$

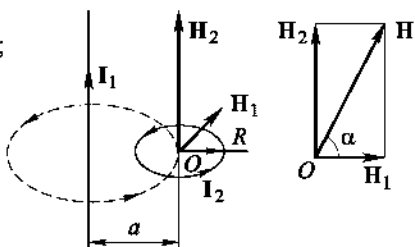
где  $H_1$  — напряженность магнитного поля прямолинейного проводника с током:

$$H_1 = \frac{I_1}{2\pi a} = \frac{25}{2 \cdot 3,14 \cdot 0,20} \frac{\text{А}}{\text{м}} \approx 20 \text{ А/м};$$

$H_2$  — напряженность магнитного поля кругового тока в его центре:

$$H_2 = \frac{I_2}{2R} = \frac{10}{2 \cdot 0,10} \frac{\text{А}}{\text{м}} = 50 \text{ А/м}.$$

Направления  $\mathbf{H}_1$  и  $\mathbf{H}_2$  определяются по правилам буравчика соответственно для прямого и кругового токов, в данном примере они взаимно перпендикулярны (см. рисунок).



К примеру 63

Результирующая напряженность

$$H = \sqrt{H_1^2 + H_2^2} = \sqrt{(20^2 + 50^2) \text{ А}^2/\text{м}^2} \approx 54 \text{ А/м}.$$

Магнитная индукция результирующего поля равна  $B = \mu_0 \mu H$ ; для вакуума формула примет вид

$$B = \mu_0 H = 4 \cdot 3,14 \cdot 10^{-7} \cdot 54 (\text{Гн/м}) \cdot \text{А/м} \approx 68 \text{ Гн} \cdot \text{А/м}^2 = 68 \text{ мкТл}.$$

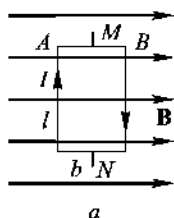
Определим угол  $\alpha$ , образованный вектором  $\mathbf{H}$  с плоскостью кругового проводника:

$$\text{tg } \alpha = \frac{H_2}{H_1} = \frac{50}{20} = 2,5; \quad \text{откуда } \alpha = 68^\circ.$$

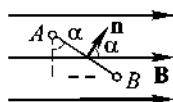
**Ответ:**  $H \approx 54 \text{ А/м}$ ,  $B \approx 68 \text{ мкТл}$ ,  $\alpha = 68^\circ$ .

**Пример 64.** Прямоугольная рамка площадью  $0,10 \text{ м}^2$ , содержащая 55 витков, помещена в однородное магнитное поле параллельно его линиям индукции (см. рисунок *а*). Магнитная индукция поля равна  $0,45 \text{ Тл}$ , сила тока в рамке —  $6,0 \text{ А}$  и сохраняется неизменной. Определить магнитный поток, проходящий через рамку в момент, когда вектор нормали к плоскости рамки составляет с вектором магнитной индукции угол  $60^\circ$ ; магнитный момент контура с током и вращающий момент, действующий на рамку до и после ее поворота на  $90^\circ$ . Какую работу совершает магнитное поле, поворачивая рамку с током на  $90^\circ$ ?

Дано:  $S = 0,10 \text{ м}^2$  — площадь рамки;  $N = 55$  — число витков в рамке;  $B = 0,45 \text{ Тл}$  — индукция однородного магнитного поля;  $I = 6,0 \text{ А}$  —



а



б

К примеру 64

сила тока в витках;  $\alpha = 60^\circ$  — угол между  $\mathbf{n}^*)$  и  $\mathbf{B}$ ;  $\beta = 90^\circ$  — угол поворота рамки. Из таблиц:  $\cos 60^\circ = 0,5$ .

Найти:  $\Phi$  — магнитный поток для  $\alpha = 60^\circ$ ;  $p$  — магнитный момент контура с током;  $M_0$  и  $M$  — вращающие моменты до и после поворота рамки на  $90^\circ$ ;  $A$  — работу сил магнитного поля.

Решение. Магнитный поток  $\Phi$ , проходящий через контур рамки площадью  $S$ , при условии, если она находится в однородном магнитном поле, выражается формулой (см. рисунок б)

$$\Phi = \Phi_{\text{макс}} \cos \alpha,$$

где  $\Phi_{\text{макс}} = BS$ .

Для угла  $60^\circ$

$$\Phi = 0,45 \cdot 0,10 \cdot 0,5 \text{ Тл} \cdot \text{м}^2 = 22,5 \cdot 10^{-3} \text{ Вб} = 22,5 \text{ мВб}.$$

Магнитный момент  $p$  контура с током находится по формуле  $p = IS$ , а с учетом числа витков

$$p = NIS = 55 \cdot 6,0 \cdot 0,10 \text{ А} \cdot \text{м}^2 = 33 \text{ А} \cdot \text{м}^2.$$

Направление вектора  $\mathbf{p}$  совпадает с направлением нормали  $\mathbf{n}$ .

Вращающий момент  $M$  определяется по формуле

$$M = Bp \sin \theta = 0.$$

В начальный момент  $\alpha = 90^\circ$  и

$$M_0 = M_{\text{макс}} = Bp = 0,45 \cdot 33 \text{ Тл} \cdot \text{А} \cdot \text{м}^2 \approx 15 \text{ Н} \cdot \text{м}.$$

После поворота рамки на угол  $\beta = 90^\circ$  угол между  $\mathbf{n}$  и  $\mathbf{B}$  станет равен нулю и

$$M = Bp \sin 0 = 0.$$

Работа магнитных сил определяется соотношением

$$A = IN \Delta \Phi;$$

в данном примере в соответствии с условием  $\Phi_0 = 0$   $\Delta \Phi = \Phi_{\text{макс}} - \Phi_0 = \Phi_{\text{макс}} = BS$ . Поэтому

$$A = 6,0 \cdot 55 \cdot 0,45 \cdot 0,10 \text{ А} \cdot \text{Тл} \cdot \text{м}^2 \approx 15 \text{ Дж}.$$

Ответ:  $\Phi = 22,5 \text{ мВб}$ ;  $p = 33 \text{ А} \cdot \text{м}^2$ ;  $M_0 \approx 15 \text{ Н} \cdot \text{м}$ ;  $M = 0$ ;  $A \approx 15 \text{ Дж}$ .

\*) Направление вектора нормали  $\mathbf{n}$  определяется правилом буравчика.



**Пример 65.** Протоны, находящиеся в вакууме в состоянии покоя, разгоняются электрическим полем с разностью потенциалов 2,5 кВ и влетают в однородное магнитное поле под углом  $30^\circ$  к линиям индукции. Определить траекторию движения протонов, радиус витка, шаг спирали и расстояние, пройденное протонами вдоль линии индукции за четыре витка. Напряженность магнитного поля равна  $1,5 \cdot 10^5$  А/м.

*Дано:*  $v_0 = 0$  — начальная скорость протонов;  $U = 2,5 \text{ кВ} = 2,5 \times 10^3 \text{ В}$  — ускоряющая разность потенциалов;  $\alpha = 30^\circ$  — угол между  $\mathbf{v}$  и  $\mathbf{B}$ ;  $N = 4$  — число витков;  $H = 1,5 \cdot 10^5 \text{ А/м}$  — напряженность магнитного поля. Из таблиц:  $e = 1,6 \cdot 10^{-19} \text{ Кл}$  — заряд протона;  $m_p = 1,67 \times 10^{-27} \text{ кг}$  — масса протона;  $\mu_0 = 4 \cdot 3,14 \cdot 10^{-7} \text{ Гн/м}$  — магнитная постоянная;  $\sin 30^\circ = 0,5$ .

*Найти:* Траекторию движения протона;  $R$  — радиус витка;  $h$  — шаг спирали;  $l$  — расстояние, пройденное протонами вдоль линии магнитной индукции за четыре витка.

**Решение.** Разложим вектор скорости протона на две составляющие — тангенциальную  $v_\tau$ , направленную вдоль линий магнитной индукции, и нормальную  $v_n$ , перпендикулярную им (см. рисунок);  $v_\tau = v \cos \alpha$  и  $v_n = v \sin \alpha$ .

Вдоль линий индукции протон движется прямолинейно с неизменной скоростью  $v_\tau$ ; в этом направлении на него силы не действуют. Сила Лоренца, направленная перпендикулярно скорости, непрерывно изменяет направление составляющей  $v_n$  и сообщает протону нормальное ускорение. В результате сложения этих двух движений протон описывает в пространстве винтовую линию постоянного радиуса и одного шага.

По закону сохранения и превращения энергии работа сил электрического поля равна приращению кинетической энергии протона. В данном примере начальная скорость протона равна нулю, поэтому  $\Delta W_k = m_p v^2 / 2 = eU$ ; отсюда

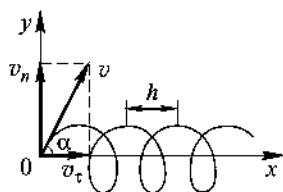
$$v = \sqrt{\frac{2eU}{m_p}} = \sqrt{\frac{2 \cdot 1,6 \cdot 10^{-19} \cdot 2,5 \cdot 10^3 \text{ Кл} \cdot \text{В}}{1,67 \cdot 10^{-27} \text{ кг}}} = 6,9 \cdot 10^5 \sqrt{\frac{\text{Кл} \cdot \text{кг} \cdot \text{м} \cdot \text{м}}{\text{кг} \cdot \text{с}^2 \cdot \text{Кл}}} = 6,9 \cdot 10^5 \text{ м/с}.$$

Сила Лоренца вызывает движение протона по окружности. Следовательно, она является центростремительной силой ( $F_L = F_{ц.с}$ ). Тогда

$$eBv_n = \frac{m_p v_n^2}{R}.$$

Отсюда

$$R = \frac{m_p v_n}{eB}.$$



К примеру 65

Учитывая, что  $B = \mu_0 H$  и  $v_n = v \sin \alpha$ , получаем

$$R = \frac{m_p v \sin \alpha}{e \mu_0 H} = \frac{1,67 \cdot 10^{-27} \cdot 6,9 \cdot 10^5 \cdot 0,5}{1,6 \cdot 10^{-19} \cdot 4 \cdot 3,14 \cdot 10^{-7} \cdot 1,5 \cdot 10^5} \frac{\text{кг} \cdot \text{м}/\text{с}}{\text{Кл} \cdot \text{Гн}/\text{м} \cdot \text{А}/\text{м}} = \\ = 19 \cdot 10^{-3} \frac{\text{кг} \cdot \text{м}^2 \cdot \text{м}}{\text{Гн} \cdot \text{А} \cdot \text{с}} = 19 \cdot 10^{-3} \text{ м}.$$

Шаг винтовой линии есть расстояние, на которое сместится протон за время, необходимое для совершения одного оборота;

$$h = v_\tau T, \quad \text{где} \quad T = \frac{2\pi R}{v_n}.$$

Отсюда определим шаг спирали:

$$h = \frac{v \cos \alpha \cdot 2\pi R}{v \sin \alpha} = 2\pi R \operatorname{ctg} \alpha = 2 \cdot 3,14 \cdot 19 \cdot 10^{-3} \cdot 1,732 \text{ м} \approx 0,21 \text{ м}.$$

Перемещение протона вдоль линии магнитной индукции после  $N$  витков будет равно

$$l = Nh = 4 \cdot 0,21 \text{ м} = 0,84 \text{ м}.$$

*Ответ:* Протон движется по спирали, радиус и шаг которой соответственно равны 19 мм и 0,21 м; вдоль линии магнитного поля за четыре витка протон перемещается на 0,84 м.

**Пример 66.** Однозарядные ионы аргона, разгоняясь из состояния покоя ускоряющим электрическим полем с разностью потенциалов 800 В, влетают в однородное магнитное поле перпендикулярно линиям магнитной индукции и разделяются на два пучка, движущихся в этом поле по дугам радиусами 7,63 и 8,05 см. Индукция магнитного поля 0,32 Тл. Определить массовые числа нуклидов аргона.

*Дано:*  $U = 800 \text{ В}$  — ускоряющая разность потенциалов;  $R_1 = 7,63 \text{ см} = 7,63 \cdot 10^{-2} \text{ м}$  и  $R_2 = 8,05 \text{ см} = 8,05 \cdot 10^{-2} \text{ м}$  — радиусы траекторий ионов первого и второго нуклидов;  $B = 0,32 \text{ Тл}$  — индукция магнитного поля. Из таблиц:  $m_{\text{а.е.м}} = 1,66 \cdot 10^{-27} \text{ кг}$  — атомная единица массы;  $Q = 1,6 \cdot 10^{-19} \text{ Кл}$  — заряд одновалентного иона.

*Найти:*  $M_{1\text{отн}}$  и  $M_{2\text{отн}}$  — массовые числа нуклидов аргона.

*Решение.* Используя рассуждения, приведенные в примере 65, напишем

$$F_{\text{Л}} = F_{\text{ц.с}} \quad \text{или} \quad QBv = \frac{mv^2}{R}.$$

Отсюда

$$v = \frac{QBR}{m}. \quad (1)$$

С другой стороны на основании закона сохранения и превращения энергии работа сил электрического поля идет на увеличение кинетической энергии ионов. Если учесть, что начальная скорость ионов равна нулю, можем написать

$$QU = \frac{mv^2}{2}. \quad (2)$$

Из (1) и (2) определяем  $m$ :

$$m = \frac{QB^2R^2}{2U}.$$

Так как  $m = M_{\text{отн}} m_{\text{а.е.м.}}$ , то  $M_{\text{отн}} = \frac{QB^2R^2}{2Um_{\text{а.е.м.}}}$ . Тогда

$$M_{1\text{отн}} = \frac{1,6 \cdot 10^{-19} \cdot 0,32^2 \cdot (7,63 \cdot 10^{-2})^2}{2 \cdot 800 \cdot 1,66 \cdot 10^{-27}} \frac{\text{Кл} \cdot \text{Тл}^2 \cdot \text{м}^2}{\text{В} \cdot \text{кг}} = 36,$$

$$M_{2\text{отн}} = \frac{1,6 \cdot 10^{-19} \cdot 0,32^2 \cdot (8,05 \cdot 10^{-2})^2}{2 \cdot 800 \cdot 1,66 \cdot 10^{-27}} \frac{\text{Кл} \cdot \text{Тл}^2 \cdot \text{м}^2}{\text{В} \cdot \text{кг}} = 40.$$

Ответ:  $M_{1\text{отн}} = 36$ ,  $M_{2\text{отн}} = 40$ .

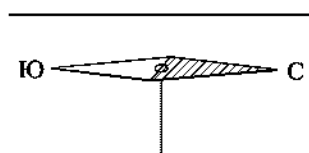
### Магнитное поле тока. Магнитная индукция.

#### Напряженность. Магнитный момент контура с током

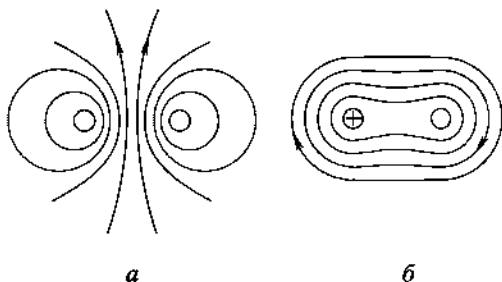
**16.1.** Всегда ли электрический ток производит тепловое действие? химическое действие? создает магнитное поле?

**16.2.** Относительно заряженного тела, покоящегося в системе  $K$ , равномерно и прямолинейно перемещается система  $K'$ . В какой системе отсчета поле заряженного тела электрическое? магнитное?

**16.3.** Определить направление тока в проводнике (см. рисунок), если южный полюс магнитной стрелки отклоняется по направлению «к читателю». Куда отклонится северный полюс стрелки, если ее поместить над проводом с током?



К задаче 16.3



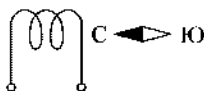
К задаче 16.4

**16.4.** Определить направление тока в проводниках, изображенных на рисунке, направление линий магнитной индукции и сил, действующих на проводники с током.

**16.5.** Как направлены токи в точках кольцевого проводника, лежащих на противоположных концах диаметра? Как проявляется действие на кольцевой проводник его собственного магнитного поля, связанное с током, протекающим по самому проводнику?

**16.6.** Мягкий провод, свитый в спираль, подвешен за один конец. Что произойдет, если по спирали пропустить ток?

**16.7.** Определить магнитные полюсы катушки с током (см. рисунок) и указать направление тока, полюсы источника.



К задаче 16.7

**16.8.** Можно ли намотать катушку соленоида так, чтобы при подключении к нему источника постоянного тока на обоих концах соленоида были южные полюсы? северные полюсы?

**16.9.** Может ли стальной стержень иметь на обоих концах одинаковые магнитные полюсы? Может ли постоянный магнит иметь четное число магнитных полюсов? нечетное число?

**16.10.** Стальная немагнитная стрелка, находящаяся в магнитном поле Земли и подвешенная так, что может свободно вращаться в горизонтальной и вертикальной плоскостях, устанавливается горизонтально. Всегда ли после намагничивания она остается в горизонтальном положении? Может ли она установиться вертикально?

**16.11.** Всегда ли совпадают направления, определяемые на север по магнитной стрелке и по географическому меридиану?

**16.12.** Два параллельных проводника длиной 2,8 м каждый находятся на расстоянии 12 см один от другого и взаимно притягиваются с силой 3,4 мН. Сила тока в одном из них равна 58 А. Определить силу тока в другом проводнике. Как направлены в проводниках электрические токи?

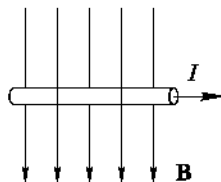
**16.13.** Два параллельных проводника с протекающими по ним одинаковыми токами находятся на расстоянии 8,7 см один от другого и притягиваются с силой 25 мН. Определить силу тока в проводниках, если длина каждого из них равна 3,2 м.

**16.14.** Два длинных параллельных проводника с токами расположены в вакууме на расстоянии 4,0 см один от другого. Сила тока в них 25 и 5,0 А. Найти длину участка проводника, на который действует сила 1,2 мН.

**16.15.** На рисунке изображены проводники с током в магнитных полях. Определить направление магнитного поля (см. рисунок а) и направление силы Ампера (см. рисунок б).



а



б

К задаче 16.15

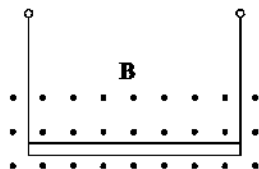
**16.16.** В однородном магнитном поле с индукцией 0,82 Тл перпендикулярно линиям магнитной индукции расположен проводник длиной 1,28 м. Определить силу, действующую на проводник, если сила тока в нем равна 18 А.

**16.17.** В однородном магнитном поле с индукцией 0,12 Тл под углом  $30^\circ$  к направлению поля расположен проводник с током длиной 1,5 м. Определить силу тока в проводнике, если на него действует сила 1,8 Н.

**16.18.** Однородное магнитное поле с индукцией  $0,25 \text{ Тл}$  действует на находящийся в нем проводник с силой  $2,1 \text{ Н}$ . Определить угол между направлением тока в проводнике и направлением магнитного поля, если длина проводника  $1,4 \text{ м}$ , а сила тока в нем  $12 \text{ А}$ .

**16.19.** В однородном магнитном поле с индукцией  $0,50 \text{ Тл}$  подвешен с помощью двух динамометров проводник длиной  $0,20 \text{ м}$  и массой  $102 \text{ г}$ . При какой силе тока в проводнике он будет невесом? На сколько изменится показание каждого динамометра при силе тока  $5,0 \text{ А}$ ?

**16.20.** Медный цилиндрический проводник длиной  $1,25 \text{ м}$  подвешен в однородном магнитном поле, как показано на рисунке. При какой разности потенциалов, приложенной к концам проводника, он будет невесом? Каково направление тока, если магнитное поле с индукцией  $2,5 \text{ мТл}$  направлено «к читателю»?



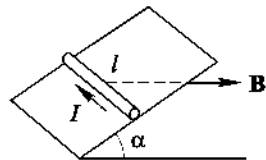
К задаче 16.20

**16.21.** В вертикальном однородном магнитном поле на двух тонких нитях подвешен горизонтально проводник длиной  $0,32 \text{ м}$ , сила тяжести которого  $0,25 \text{ Н}$ . Определить индукцию магнитного поля, при которой нити с вертикально образуют угол  $45^\circ$  при силе тока в проводнике  $1,25 \text{ А}$ .

**16.22.** Проводящий стержень массой  $0,10 \text{ кг}$  и длиной  $0,25 \text{ м}$  лежит на горизонтальной поверхности перпендикулярно однородному горизонтальному магнитному полю с индукцией  $0,20 \text{ Тл}$ . Какую силу в горизонтальном направлении нужно приложить перпендикулярно проводнику для его равномерного поступательного движения при силе тока в нем  $10 \text{ А}$ ? Коэффициент трения  $0,10$ .

**16.23.** На рельсах, расположенных под углом  $30^\circ$  к горизонту, перпендикулярно им лежит проводящий стержень массой  $0,25 \text{ кг}$ . Ширина колеи  $0,49 \text{ м}$ . При какой напряженности магнитного поля, перпендикулярного плоскости рельсов, стержень останется в покое, если сила тока в нем  $1,25 \text{ А}$ ? Трением пренебречь.

**16.24.** Проводник с током длиной  $0,50 \text{ м}$  и массой  $0,102 \text{ кг}$  расположен на плоскости, образующей с горизонтом угол  $30^\circ$ , перпендикулярно однородному магнитному полю с индукцией  $0,10 \text{ Тл}$  (см. рисунок). Сила тока в проводнике  $10 \text{ А}$ , максимальный коэффициент трения покоя  $0,10$ . Какое усилие вдоль наклонной плоскости необходимо приложить к проводнику, чтобы сохранить его в состоянии покоя?



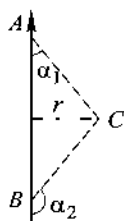
К задаче 16.24

**16.25.** Найти напряженность и магнитную индукцию поля в точке, расположенной в воздухе на расстоянии  $9,2 \text{ см}$  от прямолинейного длинного проводника при силе тока в нем  $13,2 \text{ А}$ .

**16.26.** Индукция магнитного поля в точках, находящихся на расстоянии  $4,5 \text{ см}$  от прямолинейного проводника с током, равна  $0,28 \text{ мТл}$ .

Определить напряженность магнитного поля в этих точках и силу тока в проводнике.

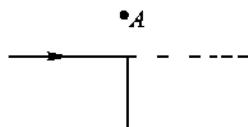
**16.27.** На расстоянии 10 см от прямолинейного длинного проводника с током напряженность магнитного поля равна 160 А/м. На каком расстоянии от этого проводника индукция магнитного поля равна  $5,03 \cdot 10^{-5}$  Тл?



К задаче  
16.28

**16.28.** Учитывая, что напряженность магнитного поля, создаваемого электрическим током в отрезке проводника  $AB$  в точке  $C$  (см. рисунок), удаленной на расстояние  $r = 0,10$  м, находится по формуле  $H_C = \frac{I}{4\pi r} (\cos \alpha_1 - \cos \alpha_2)$ , определить напряженность и индукцию: а) для бесконечно длинного проводника; в центре; б) проволочного квадрата со стороной 10 см; в) правильного шестиугольника со стороной  $a = 0,10$  м. Сила тока в проводниках равна 2,5 А.

**16.29.** В точке  $A$ , расположенной на расстоянии 20 см от бесконечного прямолинейного проводника с током напряженность магнитного поля равна 40 А/м. Какими станут напряженность и индукция магнитного поля в этой точке, если проводник изогнуть, как показано на рисунке? Какова сила тока в проводнике?



К задаче 16.29

**16.30.** В тонкостенном бесконечном цилиндрическом проводнике радиусом  $R$  сила тока равна  $I$ . Определить напряженность и индукцию магнитного поля: а) внутри полости проводника; б) в точке, расположенной на расстоянии  $R$  от поверхности проводника.

**16.31.** В прямолинейном бесконечном цилиндрическом проводнике диаметром 2,0 см сила тока равна 100 А. Считая плотность тока одинаковой по всему сечению проводника, определить напряженность магнитного поля: а) на оси проводника; б) в точке, расположенной на расстоянии 0,50 см от его оси; в) на поверхности проводника; г) в точке, удаленной от его поверхности на 1,0 см.

**16.32.** Два параллельных проводника большой длины расположены в воздухе на расстоянии 20 см один от другого. Сила тока в них 24 и 16 А. Найти геометрические места точек, в которых напряженность магнитного поля равна нулю при противоположных и при одинаковых направлениях тока.

**16.33.** Расстояние между двумя длинными параллельными проводниками с током равно 15 см. Определить напряженность поля в точке, удаленной от обоих проводников на такое же расстояние. Сила тока в проводниках равна 20 А. Рассмотреть случай одинаковых и противоположных направлений тока.

**16.34.** Три параллельных проводника большой длины с токами, обозначенными на рисунке, расположены в воздухе на расстояниях 15 см друг от друга. Сила тока во всех проводниках одинакова и равна

12 А. Найти напряженность и индукцию магнитного поля в точке  $O$ , одинаково удаленной от всех проводников.

**16.35.** В однородное магнитное поле, направленное вертикально вниз, с индукцией  $0,24$  мТл перпендикулярно линиям магнитной индукции в воздухе помещены два параллельных проводника большой длины на расстоянии  $7,5$  см один от другого. Сила тока в них противоположна и равна  $15$  и  $7,5$  А. Определить силу, действующую на участок  $1,8$  м каждого проводника. Одинаковы ли силы, с которыми взаимодействуют проводники с током? магнитное поле с каждым проводником?

**16.36.** По данным задачи 16.35 определить силы, действующие на проводники с током при горизонтальном расположении магнитного поля, перпендикулярном проводникам.

**16.37.** Найти напряженность и индукцию магнитного поля в центре кругового тока радиусом  $7,6$  см при силе тока  $15,2$  А. Как направлен ток в проводнике, если со стороны читателя находится южный магнитный полюс?

**16.38.** В центре кругового тока радиусом  $5,8$  см индукция магнитного поля равна  $0,13$  мТл. Определить напряженность поля в центре и силу тока в проводнике.

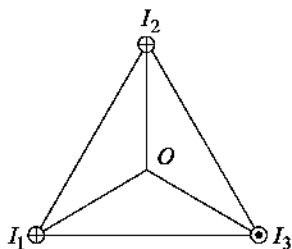
**16.39.** В круговом контуре из медного проводника поперечным сечением  $2,1 \text{ мм}^2$  сила тока равна  $12,6$  А. Определить напряженность и индукцию магнитного поля в центре кругового тока, если разность потенциалов на концах проводника равна  $6,3$  В.

**16.40.** Два проводника в виде концентрических окружностей радиусами  $12$  и  $8,0$  см с токами создают магнитное поле. Сила тока в наружном проводнике  $4,8$  А. Напряженность поля, создаваемого током во внутреннем проводнике, в общем центре  $15$  А/м. Найти результирующую напряженность магнитного поля в общем центре при одинаковых и встречных направлениях тока.

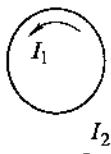
**16.41.** Два круговых проводника одинакового радиуса с общим центром  $O$  расположены во взаимно перпендикулярных плоскостях. Магнитная индукция результирующего поля в их центре  $B_0 = 2,0 \cdot 10^{-4}$  Тл.

Магнитная индукция поля первого проводника с током в этой же точке  $B_1 = 1,6 \cdot 10^{-4}$  Тл. Определить магнитную индукцию поля второго проводника в точке  $O$  и силу тока в нем, если в первом проводнике она равна  $I_1 = 8,0$  А.

**16.42.** Круговой виток радиусом  $4,8$  см и прямолинейный проводник находятся в одной плоскости (см. рисунок). Расстояние от прямолинейного проводника до центра витка  $12,1$  см,

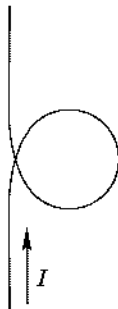


К задаче 16.34



К задаче 16.42

а сила тока в нем 19,4 А. Определить силу тока в витке, если напряженность результирующего магнитного поля в центре 154 А/м. Определить магнитную индукцию в той же точке при смене направления кругового тока на противоположное.



**16.43.** В центре петли в виде окружности радиусом 7,9 см, образованной длинным прямолинейным проводником (см. рисунок), напряженность магнитного поля 117 А/м. Определить силу тока в проводнике.

**16.44** \*). Соленоид без сердечника длиной 85 см содержит 750 витков. Определить напряженность и индукцию магнитного поля в нем при силе тока 5,6 А.

**16.45.** Определить силу тока в соленоиде без сердечника длиной 64 см, содержащем 820 витков, индукция магнитного поля внутри которого равна 1,2 мТл.

К задаче  
16.43

**16.46.** Сколько витков на 1 см длины должен иметь соленоид без сердечника, чтобы индукция магнитного поля внутри него была не менее 8,2 мТл при силе тока 4,3 А?

**16.47.** По длинному соленоиду из изолированного провода, намотанного плотно в два ряда, проходит электрический ток. Диаметр провода 0,20 мм. Определить напряженность магнитного поля внутри соленоида при силе тока в нем 0,52 А.

**16.48.** Какую магнитную индукцию можно получить в соленоиде без сердечника длиной 20 см и диаметром 1,5 см, если к концам обмотки подать разность потенциалов 12 В? Обмотка из медного провода поперечным сечением 0,50 мм<sup>2</sup>. Толщиной изоляции пренебречь.

**16.49.** Определить магнитный момент кольца диаметром 30 см при силе тока в нем 20 А.

**16.50.** Прямоугольная рамка со сторонами 10 и 20 см имеет 40 витков. Определить силу тока в витках, если магнитный момент равен 2,8 А · м<sup>2</sup>.

**16.51.** Определить радиус плоской катушки, имеющей 40 витков, если при силе тока 3,5 А она имеет магнитный момент 1,33 А · м<sup>2</sup>.

**16.52.** Прямоугольная рамка площадью 250 см<sup>2</sup>, содержащая 120 витков, расположена в однородном магнитном поле с индукцией 18 мТл, перпендикулярном плоскости рамки. Определить магнитный момент рамки, максимальный вращающий момент и вращающий момент в положении рамки, когда ее вектор нормали составляет с вектором индукции поля угол 30°. Сила тока в рамке 6,4 А.

**16.53.** Две одинаковые рамки с током расположены в магнитном поле, как показано на рисунке. Сила тока в рамке б в два раза больше, чем в рамке а. Определить максимальный вращающий момент, действующий на рамку б, если максимальный вращающий момент, действующий на рамку а, равен 2,8 Н · м.

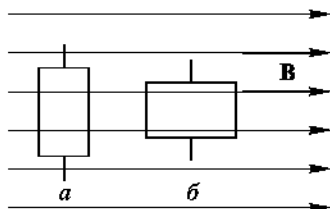
\*) В задачах 16.44–16.48 диаметр соленоида мал в сравнении с его длиной, поэтому поле можно считать однородным.



**16.54.** Маленький шарик с зарядом  $Q$ , подвешенный на нити длиной  $l$ , движется равномерно по окружности в горизонтальной плоскости так, что нить описывает коническую поверхность, образуя угол  $\alpha$  с вертикалью. Определить индукцию магнитного поля в центре окружности, обусловленную движением шарика, и его магнитный момент.

**16.55.** В невозбужденном атоме водорода электрон движется со скоростью  $2,0 \cdot 10^6$  м/с по орбите радиусом  $5,3 \times 10^{-11}$  м. Рассматривая это движение, как круговой ток, вычислить индукцию магнитного поля в центре орбиты и магнитный момент, обусловленный орбитальным движением электрона.

**16.56.** В атоме водорода электрон движется по орбите радиусом  $2,12 \cdot 10^{-10}$  м. Определить индукцию магнитного поля в центре орбиты и магнитный момент.

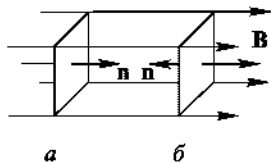


К задаче 16.53

### Поток магнитной индукции. Потокосцепление и индуктивность. Работа магнитных сил

**16.57.** Какой магнитный поток проходит через плоскую поверхность площадью  $280 \text{ см}^2$ , перпендикулярную линиям магнитной индукции однородного магнитного поля напряженностью  $250 \text{ А/м}$ ? Среда — воздух.

**16.58.** В однородном магнитном поле напряженностью  $1,2 \cdot 10^4 \text{ А/м}$  в воздухе находится плоская поверхность, вектор нормали к которой образует с направлением поля угол  $60^\circ$ . Определить магнитный поток, пронизывающий эту поверхность, если площадь ее равна  $2,4 \text{ м}^2$ .



К задаче 16.59

**16.59.** Рамка площадью  $100 \text{ см}^2$  расположена в однородном магнитном поле, как показано на рисунке (положение а). На сколько изменится магнитный поток через рамку при ее повороте на  $180^\circ$  (положение б)? Индукция магнитного поля равна  $0,20 \text{ Тл}$ .

**16.60.** Рамка площадью  $S$  расположена в однородном магнитном поле с индукцией  $B$  перпендикулярно направлению поля. Какая формула выражает зависимость магнитного потока  $\Phi$  от угла  $\alpha$  между векторами нормали к рамке и магнитной индукции? Считая индукцию магнитного поля равной  $0,24 \text{ Тл}$ , а площадь рамки  $250 \text{ см}^2$ , определить магнитный поток для углов  $30$  и  $60^\circ$ .

**16.61.** Определить индуктивность катушки, в которой возникает потокосцепление  $0,12 \text{ Вб}$  при силе тока  $8,6 \text{ А}$ .

**16.62.** При силе тока  $5\text{ А}$  в катушке возникает магнитный поток  $15\text{ мВб}$ . Сколько витков содержит катушка, если ее индуктивность равна  $60\text{ мГн}$ .

**16.63.** Во сколько раз изменятся индуктивность и потокосцепление катушки без сердечника, если число витков в ней увеличить в два раза без изменения линейных размеров? Силу тока считать постоянной.

**16.64.** Определить магнитный поток и потокосцепление в соленоиде без сердечника, сила тока в котором  $6,3\text{ А}$ . Соленоид имеет  $1400$  витков, длину  $1,6\text{ м}$  и радиус  $4,8\text{ см}$ . Какова индуктивность соленоида?

**16.65.** Соленоид имеет длину  $24\text{ см}$  и диаметр  $5,6\text{ см}$ . Его обмотка состоит из плотную намотанных витков медной проволоки диаметром  $0,40\text{ мм}$ . Пренебрегая толщиной изоляции, определить, при какой разности потенциалов на концах обмотки индукция магнитного поля на его оси составит  $2,54\text{ Тл}$ .

**16.66.** Соленоид без сердечника содержит  $N$  витков плотную намотанного изолированного провода с удельным сопротивлением  $\rho$ . При постоянном напряжении  $U$  сила тока в нем  $I$ . Определить индуктивность и потокосцепление соленоида, если напряженность однородного магнитного поля в нем  $H$ . Толщиной изоляции пренебречь.

**16.67.** В однородном магнитном поле с индукцией  $1,2\text{ Тл}$  перпендикулярно линиям индукции перемещается проводник длиной  $0,40\text{ м}$  на расстоянии  $0,25\text{ м}$ . Какая при этом совершается работа, если сила тока в проводнике  $21\text{ А}$ ?

**16.68.** Какая работа совершается магнитным полем с индукцией  $0,50\text{ Тл}$  при перемещении проводника с током на расстояние  $2,0\text{ м}$ ? Проводник имеет длину  $0,50\text{ м}$ , расположен под углом  $30^\circ$  к направлению магнитного поля и перемещается перпендикулярно направлениям тока и магнитной индукции. Сила тока в проводнике  $20\text{ А}$ .

**16.69.** Плоская катушка радиусом  $12,5\text{ см}$ , содержащая  $64$  витка, расположена в однородном магнитном поле с индукцией  $0,28\text{ Тл}$  так, что ее плоскость составляет угол  $30^\circ$  с направлением поля. Какую работу нужно произвести для удаления катушки из магнитного поля, если сила тока в ней  $5,5\text{ А}$ ?

**16.70.** Рамка, содержащая  $25$  витков провода, расположена в магнитном поле так, что через нее проходит внешний магнитный поток  $12\text{ мВб}$ . Когда по виткам пропустили ток и рамка повернулась, через нее стал проходить магнитный поток  $77\text{ мВб}$ . Определить работу, произведенную при повороте рамки, если сила тока в цепи была равна  $8,4\text{ А}$ .

**16.71.** В однородном магнитном поле с индукцией  $60\text{ мТл}$  находится прямоугольная рамка со сторонами  $5,0$  и  $8,0\text{ см}$ , расположенная перпендикулярно направлению поля. В рамке  $200$  витков, и она может вращаться вокруг оси, перпендикулярной линиям индукции магнитного поля. Какая работа совершается при повороте рамки на  $1/4$  оборота? на  $1/2$  оборота? на целый оборот? Сила тока в рамке  $0,50\text{ А}$  и остается постоянной.

**16.72.** Изменятся ли напряженность и индукция магнитного поля в соленоиде, если в него поместить алюминиевый сердечник?

**16.73.** На замкнутый сердечник длиной 20 см и поперечным сечением  $3,1 \text{ см}^2$  намотана катушка, содержащая 1000 витков. Определить магнитный поток в сердечнике, если сила тока в его обмотке 0,16 А. Во сколько раз увеличится магнитный поток в сердечнике, если сила тока возрастет в два раза? в четыре раза? Зависимость между напряженностью и индукцией магнитного поля для ферромагнитного материала сердечника приведена в табл. XVIII.

**16.74.** Тороид с сердечником из мягкого железа имеет обмотку, содержащую 1200 витков. При какой силе тока в витках в тороиде возникнет магнитный поток 0,54 мВб? Поперечное сечение стержня тороида имеет диаметр, равный 2,4 см; внешний диаметр тороида 18 см. Как изменится магнитный поток в тороиде при увеличении вдвое силы тока в обмотке? Зависимость между напряженностью и индукцией магнитного поля взять из графика табл. XVIII.

### Сила Лоренца

**16.75.** В однородное магнитное поле с индукцией 85 мТл влетает электрон со скоростью  $4,6 \cdot 10^7 \text{ м/с}$ , направленной перпендикулярно линиям магнитной индукции. Определить силу, действующую на электрон в магнитном поле, и радиус дуги окружности, по которой он движется.

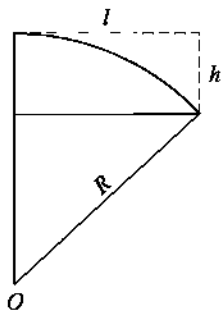
**16.76.** Электрон движется в однородном магнитном поле перпендикулярно линиям магнитной индукции по окружности радиусом 10,0 см. Определить скорость движения электрона, если напряженность поля  $1,6 \cdot 10^2 \text{ А/м}$ . Движение происходит в вакууме.

**16.77.** В однородном магнитном поле с индукцией  $B$  движется электрон по окружности радиусом  $R$ . Определить кинетическую энергию электрона.

**16.78.** Протон влетает в однородное магнитное поле напряженностью 100 А/м перпендикулярно направлению поля. Определить траекторию движения протона, если оно происходит в вакууме со скоростью  $1,6 \cdot 10^3 \text{ м/с}$ . Каков период обращения протона в магнитном поле?

**16.79.** Электрон, имея скорость  $2,65 \cdot 10^7 \text{ м/с}$ , влетает в однородное магнитное поле перпендикулярно линиям магнитной индукции. На какое расстояние  $h$  (см, рисунок) сместится электрон от первоначального направления  $l$  за время  $1,32 \times 10^{-10} \text{ с}$ ? Индукция поля равна 35 мТл.

**16.80.** Протон разгоняется из состояния покоя в электрическом поле с разностью потенциалов 1,5 кВ и попадает в однородное магнитное поле, двигаясь в нем по окружности радиусом 56 см.



К задаче 16.79

Полагая, что движение протона происходит в вакууме, определить напряженность магнитного поля.

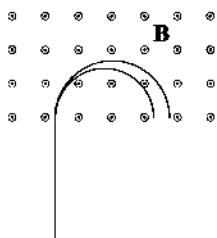
**16.81.** Электрон разгоняется в вакууме электрическим полем и влетает в однородное магнитное поле перпендикулярно его направлению. Определить ускоряющую разность потенциалов электрического поля и индукцию магнитного поля, в котором электрон описывает окружность радиусом  $7,58 \cdot 10^{-3}$  м за время  $5,96 \cdot 10^{-10}$  с.

**16.82.** Однородное электрическое поле напряженностью 100 В/см перпендикулярно однородному магнитному полю с индукцией 20 мТл. Электрон влетает в эти поля перпендикулярно векторам **E** и **B**. При какой начальной скорости электрон будет двигаться в этих полях прямолинейно? При какой скорости прямолинейно будут двигаться протоны?

**16.83.** Электрон движется в вакууме в однородном магнитном поле так, что вектор его скорости образует угол  $30^\circ$  с направлением поля. Определить радиус витков траектории электрона и расстояние, пройденное им вдоль линии магнитной индукции за три витка, если скорость электрона  $2,5 \cdot 10^6$  м/с, а напряженность магнитного поля 75 А/м.

**16.84.** Электрон, влетающий в однородное магнитное поле под углом  $60^\circ$  к направлению поля, движется по спирали радиусом 5,0 см с периодом обращения 60 мкс. Какова скорость электрона, индукция магнитного поля и шаг спирали?

**16.85.** Однозарядные ионы неона с массовыми числами 20 и 22 и кинетической энергией  $6,2 \cdot 10^{-16}$  Дж влетают в однородное магнитное поле перпендикулярно его направлению и, описав полуокружность, вылетают из поля двумя пучками (см. рисунок). Магнитное поле с индукцией 240 мТл образовано в вакууме. Определить, каким будет расстояние между пучками при выходе ионов из поля.



К задаче 16.85

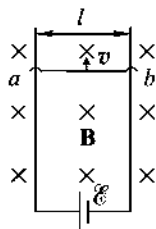
**16.86.** Пучок однозарядных ионов изотопа кремния с массовым числом 28 влетает в однородное магнитное поле перпендикулярно его направлению и движется по дуге окружности радиусом 0,21 м. Магнитное поле с индукцией 180 мТл образовано в вакууме. Какой кинетической энергией обладают ионы изотопа кремния, двигаясь в этом поле?

**16.87.** Однозарядные ионы двух изотопов калия разгоняются в вакууме в электрическом поле напряжением 1,25 кВ и попадают в однородное магнитное поле с индукцией 250 мТл перпендикулярно направлению поля. После разделения на два пучка ионы продолжают движение по дугам окружностей радиусами 12,76 и 13,08 см. Определить по этим данным массовые числа изотопов калия.

## § 17. Электромагнитная индукция

**Пример 67.** Проводник  $ab$  длиной 0,50 м, массой 10,2 г и сопротивлением 2,75 Ом движется вверх равномерно по проводящим направляющим, присоединенным к источнику тока с ЭДС 3,0 В и внутренним сопротивлением 0,25 Ом. Движение происходит в однородном магнитном поле индукцией 0,25 Тл (см. рисунок). Определить скорость движения проводника, механическую мощность, затрачиваемую на его перемещение, и тепловую мощность, выделяющуюся в нем. Сопротивление направляющих и трение не учитывать.

*Дано:*  $l = 0,50$  м — длина проводника;  $m = 10,2$  г =  $1,02 \cdot 10^{-2}$  кг — его масса;  $R = 2,75$  Ом — сопротивление проводника;  $\mathcal{E} = 3,0$  В — ЭДС источника тока;  $r = 0,25$  Ом — его внутреннее сопротивление;  $B = 0,25$  Тл — индукция магнитного поля. Из таблиц:  $g = 9,8$  м/с<sup>2</sup> — ускорение свободного падения.



К примеру 67

*Найти:*  $v$  — скорость движения проводника;  $P_{\text{мех}}$  — механическую мощность;  $P_{\text{тепл}}$  — тепловую мощность, выделяющуюся в цепи.

**Решение.** В цепи действуют ЭДС источника тока  $\mathcal{E}$  и ЭДС индукции  $\mathcal{E}_i = Bvl$ , направление которой определяется правилом правой руки. Учитывая, что ЭДС индукции направлена против ЭДС источника тока, имеем

$$\mathcal{E} - Bvl = I(R + r), \quad \text{откуда} \quad v = \frac{\mathcal{E} - I(R + r)}{Bl}.$$

Так как проводник поднимается равномерно, то  $F_A - mg = 0$ , откуда  $F_A = mg$ . Учитывая, что сила Ампера  $F_A = BIl$ , получаем  $BIl = mg$ . Отсюда

$$I = \frac{mg}{Bl} = \frac{1,02 \cdot 10^{-2} \cdot 9,8}{0,25 \cdot 0,50} \frac{\text{кг} \cdot \text{м/с}^2}{\text{Тл} \cdot \text{м}} = 0,80 \text{ А}.$$

Подставляя значение силы тока в формулу для определения скорости, получаем

$$v = \frac{3,0 - 0,80 \cdot (2,75 + 0,25)}{0,25 \cdot 0,50} \frac{\text{А} \cdot \text{Ом}}{\text{Тл} \cdot \text{м}} = 4,8 \text{ м/с}.$$

Для определения механической мощности, затрачиваемой на перемещение проводника, используем формулу

$$P_{\text{мех}} = F_A v,$$

где  $F_A = mg$ , следовательно,

$$P_{\text{мех}} = mgv = 1,02 \cdot 10^{-2} \cdot 9,8 \cdot 4,8 \text{ кг} \cdot \text{м/с}^2 \cdot \text{м/с} = 0,48 \text{ Вт}.$$

По условию задачи сопротивление направляющих проводников не учитывается; следовательно, потери мощности на нагревание происходят

в движущемся проводнике и внутри источника тока, поэтому

$$P_{\text{тепл}} = I^2(R + r) = 0,80^2 \cdot (2,75 + 0,25) \text{ А}^2 \cdot \text{Ом} = 1,92 \text{ Вт}.$$

Правильность решения задачи подтверждается законом сохранения и превращения энергии:

$$P_{\text{общ}} = P_{\text{мех}} + P_{\text{тепл}};$$

здесь

$$P_{\text{общ}} = I\mathcal{E} = 0,80 \text{ А} \cdot 3,0 \text{ В} = 2,4 \text{ Вт},$$

$$P_{\text{мех}} + P_{\text{тепл}} = 0,48 \text{ Вт} + 1,92 \text{ Вт} = 2,4 \text{ Вт}.$$

*Ответ:*  $v = 4,8 \text{ м/с}$ ;  $P_{\text{мех}} = 0,48 \text{ Вт}$ ;  $P_{\text{тепл}} = 1,92 \text{ Вт}$ .

**Пример 68.** В катушке, содержащей 2000 витков, намотанных на картонный цилиндр длиной 0,20 м и радиусом 4,0 см, сила тока изменяется по закону  $i = 2 + 0,5t$ . Определить изменение энергии магнитного поля катушки за первые 4 с; мгновенное и среднее значения ЭДС самоиндукции; электрический заряд, прошедший по цепи за то же время. Сопротивлением катушки пренебречь.

*Дано:*  $N = 2000$  — число витков в катушке,  $l = 0,20 \text{ м}$  — длина намотанной части катушки;  $R = 4,0 \text{ см} = 4,0 \cdot 10^{-2} \text{ м}$  — радиус катушки;  $\Delta t = 4,0 \text{ с}$  — время изменения силы тока. Из таблиц:  $\mu_0 = 4\pi \times 10^{-7} \text{ Гн/м}$  — магнитная постоянная.

*Найти:*  $\Delta W$  — изменение энергии магнитного поля;  $\mathcal{E}_и$  и  $\mathcal{E}_с$  — мгновенное и среднее значения ЭДС самоиндукции;  $Q$  — электрический заряд, прошедший по цепи.

*Решение.* Изменение энергии магнитного поля определяется по формуле

$$\Delta W = \frac{LI_2^2}{2} - \frac{LI_1^2}{2} = \frac{L(I_2^2 - I_1^2)}{2}.$$

Неизвестную индуктивность катушки (соленоида) без сердечника определим, зная число витков и размеры катушки:

$$\begin{aligned} L &= \frac{\mu_0 N^2 S}{l} = \frac{\mu_0 N^2 \pi R^2}{l} = \\ &= \frac{4 \cdot 3,14 \cdot 10^{-7} \cdot 2000^2 \cdot 3,14 \cdot (4,0 \cdot 10^{-2})^2}{0,20} \frac{\text{Гн} \cdot \text{м} \cdot \text{м}^2}{\text{м}} = 0,126 \text{ Гн}. \end{aligned}$$

Значения силы тока в начальный момент  $t_1 = 0$  и в момент  $t_2 = 4 \text{ с}$  определим из уравнения  $i = 2 + 0,5t$ ;  $I_1 = 2 \text{ А}$ ;  $I_2 = 2 + 0,5 \cdot 4 = 4 \text{ А}$ . Изменение энергии

$$\Delta W = 0,126 \frac{(4^2 - 2^2)}{2} \text{ Гн} \cdot \text{А}^2 = 0,756 \text{ Дж} \approx 0,76 \text{ Дж}.$$

Мгновенное  $\mathcal{E}_и$  и среднее  $\mathcal{E}_с$  значения ЭДС самоиндукции выражаются формулами:

$$\mathcal{E}_и = -Li'_t = -L \frac{di}{dt}, \quad \mathcal{E}_с = -\frac{L\Delta I}{\Delta t} = -\frac{L(I_2 - I_1)}{\Delta t}.$$

Отсюда

$$e_{\text{и}} = -L(2 + 0,5t)' = -0,126 \cdot 0,5 = -0,063 = -63 \text{ [мВ]},$$

$$\mathcal{E}_{\text{и}} = -\frac{0,126 \cdot (4 - 2)}{4,0} \frac{\text{Гн} \cdot \text{А}}{\text{с}} = -0,063 \text{ В}.$$

Среднее значение ЭДС самоиндукции равно мгновенному значению ЭДС при линейной зависимости силы тока от времени.

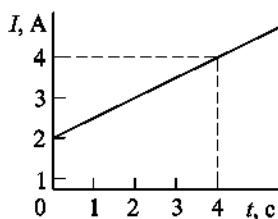
Для определения заряда, прошедшего по цепи, воспользуемся формулой  $Q = \int_{t_1}^{t_2} i dt$ . После введения под знак интеграла выражения силы тока в зависимости от времени, произведем интегрирование:

$$Q = \int_0^4 (2 + 0,5t) dt = 2t + 0,25t^2 \Big|_0^4 = 2 \cdot 4 + 0,25 \cdot 4^2 = 12 \text{ [Кл]}.$$

Заряд  $Q$  можно найти иначе. Анализируя график  $i = f(t)$ , изображенный на рисунке, приходим к выводу, что заряд численно равен площади, ограниченной графиком и отрезками на осях координат:

$$Q = \frac{I_1 + I_2}{2} \Delta t = 12 \text{ [Кл]}.$$

Заряд также можно найти, используя закон сохранения и превращения энергии. Вся энергия источника тока в процессе работы магнитных сил переходит в энергию магнитного поля (по условию задачи сопротивление не учитывается):



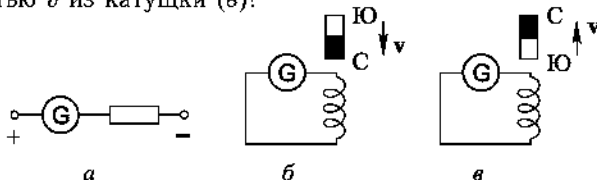
К примеру 68

$$Q\mathcal{E} = \Delta W, \quad \text{откуда} \quad Q = \frac{\Delta W}{\mathcal{E}} = \frac{0,76 \text{ Дж}}{0,063 \text{ В}} = 12 \text{ Кл}.$$

Ответ:  $\Delta W \approx 0,76 \text{ Дж}$ ;  $e_{\text{и}} = \mathcal{E}_{\text{и}} = -63 \text{ мВ}$ ;  $Q = 12 \text{ Кл}$ .

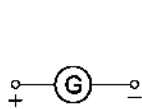
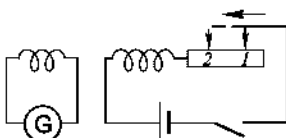
### ЭДС индукции. Индукционный ток. Закон Ленца

**17.1.** При подключении к гальванометру источника постоянного тока (см. рисунок а) стрелка гальванометра отклонилась влево. В каком направлении отклонится стрелка при вдвигании постоянного магнита со скоростью  $v$  северным полюсом в катушку (б)? При остановке магнита внутри катушки? При выдвигании того же магнита южным полюсом со скоростью  $v$  из катушки (в)?

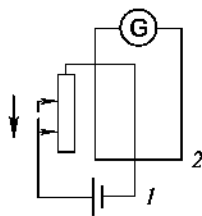


К задаче 17.1

**17.2.** При прохождении электрического тока через гальванометр (см. рисунок *а*) стрелка прибора отклоняется влево. В какую сторону отклонится стрелка при замыкании ключа в цепи (*б*)? При перемещении движка реостата влево?

*а**б*

К задаче 17.2



К задаче 17.3

**17.3.** Замкнутые контуры *1* и *2* расположены параллельно друг другу (см. рисунок). Определить направление отклонения стрелки гальванометра при перемещении движка реостата в контуре *1*, как показано на рисунке, если стрелка гальванометра отклоняется в сторону, противоположную направлению тока. Сохранится ли отклонение стрелки при остановке движка?

**17.4.** Одинаковую ли работу нужно совершить, чтобы внести магнит в катушку, когда ее обмотка замкнута и когда разомкнута?

**17.5.** Два одинаковых магнита одновременно начинают падать с одной и той же высоты через закрепленные на одной высоте проводящие кольца. Первый пролетает через замкнутое кольцо, второй — через разомкнутое. Какой магнит упадет раньше? Почему?

**17.6.** Замкнутое кольцо движется в однородном магнитном поле поступательно вдоль линий магнитной индукции; перпендикулярно им. Возникает ли в кольце индукционный ток?

**17.7.** Проводящий контур движется поступательно в однородном магнитном поле; неоднородном. Возникает ли ЭДС индукции в этих случаях?

**17.8.** Всегда ли при изменении потока магнитной индукции в проводящем контуре возникает ЭДС индукции? индукционный ток?

**17.9.** Всегда ли при изменении магнитной индукции в проводящем контуре, расположенном перпендикулярно линиям магнитной индукции, в нем возникает ЭДС индукции?

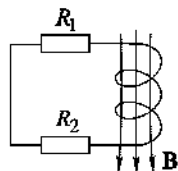
**17.10.** Проволочная прямоугольная рамка со сторонами 15 и 6,0 см расположены в однородном магнитном поле перпендикулярно линиям магнитной индукции. Определить ЭДС индукции, возникающую в рамке, если за 0,025 с магнитная индукция поля равномерно возрастает от 0,012 до 0,037 Тл.

**17.11.** В катушке, состоящей из 75 витков, магнитный поток равномерно возрастает со скоростью 0,12 Вб/с. Определить ЭДС индукции, возникающую в катушке.



**17.12.** В катушке, содержащей 125 витков, магнитный поток равен  $2,4 \cdot 10^{-3}$  Вб. За какое время магнитный поток уменьшится до  $1,6 \times 10^{-3}$  Вб, если в катушке возникла средняя ЭДС, равная 2,5 В?

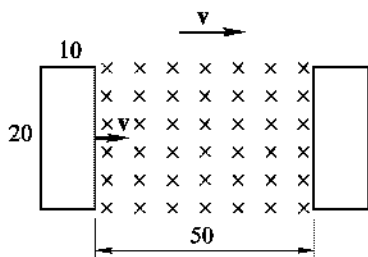
**17.13.** В катушке, содержащей 100 витков и замкнутой на сопротивление  $R_1 = 3,0$  Ом и  $R_2 = 2,0$  Ом, поток магнитной индукции направлен, как показано на рисунке, и возрастает с постоянной скоростью 0,20 Вб/с. Определить направление тока в контуре, падение напряжения на сопротивлении  $R_1$  и тепловую мощность, выделяющуюся на сопротивлении  $R_2$ . Сопротивлением катушки пренебречь.



К задаче 17.13

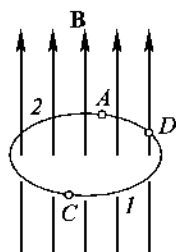
**17.14.** Проволочная рамка, охватывающая площадь  $180 \text{ см}^2$ , расположена в однородном магнитном поле с индукцией  $2,5 \cdot 10^{-2}$  Тл, перпендикулярном рамке и ее оси вращения. Сколько витков содержит рамка, если при ее повороте на  $1/4$  оборота за 120 мс в ней возникает средняя ЭДС индукции 270 мВ?

**17.15.** Рамка со сторонами 10 и 20 см, содержащая 40 витков, находится на границе однородного магнитного поля шириной 50 см с индукцией 12,5 мТл (см. рисунок). Двигаясь равномерно перпендикулярно линиям магнитной индукции, рамка пересекает поле за 60 мс. Определить работу, совершенную при перемещении рамки, если ее сопротивление 1,6 Ом.



К задаче 17.15

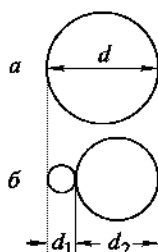
**17.16.** Квадратная проводящая рамка со стороной  $l = 0,20$  м и сопротивлением  $R = 1,0$  Ом пересекает область однородного магнитного поля шириной  $b > l$  с постоянной скоростью  $v = 4,0$  м/с, направленной под углом  $30^\circ$  к линиям магнитной индукции  $B = 0,40$  Тл (вектор  $\mathbf{v}$  лежит в одной плоскости с рамкой). Определить количество теплоты  $Q$ , выделившейся в рамке.



К задаче 17.17

**17.17.** В проводящем контуре  $CDAC$  (см. рисунок) при равномерном возрастании магнитного потока на  $4,8 \cdot 10^{-1}$  Вб проходит заряд 1,6 Кл. Определить сопротивление контура и направление индукционного тока в нем. В каком направлении пойдет индукционный ток при убывании магнитного потока?

**17.18.** Проводящее кольцо диаметром  $d = 10$  см расположено перпендикулярно линиям магнитной индукции однородного магнитного поля (см. рисунок *а*). Какая средняя ЭДС индукции возникает в контуре, если за время  $\Delta t = 0,10$  с его форма станет такой, как на рисунке *б*? Диаметр левого кольца  $d_1 = d/4$ . Какой заряд пройдет по цепи за время изменения формы контура, если сопротивление кольца  $R = 0,20$  Ом?

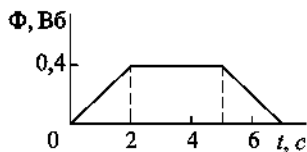


К задаче 17.18

**17.19.** Проводящий контур диаметром  $d = 0,40$  м расположен перпендикулярно линиям магнитной индукции однородного магнитного поля (см. рисунок к задаче 17.17). Магнитная индукция поля возрастает с постоянной скоростью  $\Delta B/\Delta t = 0,020$  Вб/с. Определить работу по перемещению заряда  $Q = 3,0$  Кл из точки  $C$  в точку  $D$  по пути 1; по пути 2 ( $CAD$ );  $CD = d$ .

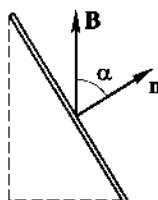
**17.20.** По графику зависимости  $\Phi(t)$  (см. рисунок) построить график зависимости ЭДС индукции от времени  $\mathcal{E}(t)$  для рамки, содержащей 10 витков.

**17.21.** Поток магнитной индукции в проводящем контуре изменяется по закону  $\Phi = 5 \cdot 10^{-2}t$ . Как зависит ЭДС индукции в контуре от времени? Какой электрический заряд пройдет в контуре за 20 с, если его сопротивление 1,25 Ом? Сколько теплоты выделится в контуре?



К задаче 17.20

**17.22.** Прямоугольный проводящий контур со сторонами 20 и 10 см, содержащий 100 витков, расположен перпендикулярно однородному магнитному полю с индукцией, изменяющейся по закону  $B = (2 + 5t) \cdot 10^{-2}$ . Определить зависимость потокоцепления и ЭДС индукции от времени ( $\Psi(t)$  и  $e_{\text{и}}(t)$ ), а также мгновенные значения потокоцепления и ЭДС индукции в конце десятой секунды.

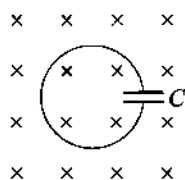


К задаче 17.23

**17.23.** Проводящий контур площадью  $200 \text{ см}^2$  расположен в однородном магнитном поле так, что нормаль к контуру образует с магнитной индукцией угол  $\alpha = 60^\circ$  (см. рисунок). Магнитная индукция поля изменяется по закону  $B = 2,0 \cdot 10^{-2} \cdot \cos(4\pi t + \pi/6)$ . Опре-

делить зависимость магнитного потока и ЭДС индукции от времени ( $\Phi(t)$  и  $e_{\text{и}}(t)$ ), а также и мгновенное значение ЭДС индукции в конце четвертой секунды.

**17.24.** Проводящий контур площадью  $400 \text{ см}^2$ , в который включен конденсатор емкостью  $10 \text{ мкФ}$ , расположен в однородном магнитном поле перпендикулярно линиям магнитной индукции (см. рисунок). Магнитная индукция поля возрастает по закону  $B = (2 + 5t) \cdot 10^{-2}$ . Определить максимальный заряд



К задаче 17.24

конденсатора и максимальную энергию электрического поля конденсатора. Какая пластина конденсатора зарядится положительно?

**17.25.** Самолет летит горизонтально со скоростью 960 км/ч. Определить разность потенциалов на концах его крыльев, если размах крыльев 30 м, а вертикальная составляющая напряженности магнитного поля Земли равна 40 А/м.

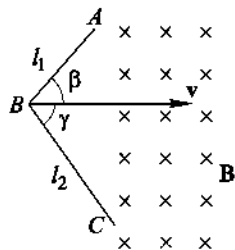
**17.26.** Проводник длиной 1,8 м движется в однородном магнитном поле со скоростью 12 м/с так, что векторы скорости и магнитной индукции образуют угол  $30^\circ$ . Определить разность потенциалов на концах проводника, если индукция магнитного поля равна 40 мТл и вектор скорости перпендикулярен проводнику.

**17.27.** С какой скоростью перемещался прямолинейный проводник длиной 1,2 м под углом  $60^\circ$  к линиям индукции однородного магнитного поля, если в проводнике возбуждалась ЭДС индукции 2,5 В? Индукция магнитного поля 0,25 Тл; вектор скорости перпендикулярен проводнику.

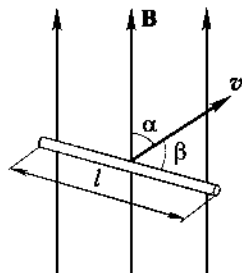
**17.28.** Прямолинейный проводник длиной 86 см движется со скоростью 14 м/с в однородном магнитном поле с индукцией 0,025 Тл. Определить угол между векторами индукции поля и скорости, если в проводнике создается ЭДС, равная 0,12 В.

**17.29.** Прямолинейный проводник длиной 20 см движется в однородном магнитном поле напряженностью  $79,6 \cdot 10^3$  А/м со скоростью 2,0 м/с так, что проводник и вектор скорости лежат в плоскости, перпендикулярной линиям напряженности. Вектор скорости составляет с проводником угол  $30^\circ$ . Определить разность потенциалов на концах проводника.

**17.30.** Проводник  $ABC$ , расположенный в вертикальной плоскости (см. рисунок), движется в горизонтальном однородном магнитном поле с индукцией  $\mathbf{B}$ . Скорость  $\mathbf{v}$  перпендикулярна вектору магнитной индукции, а части проводника  $l_1$  и  $l_2$  образуют с вектором скорости углы соответственно  $\beta$  и  $\gamma$ . Определить разность потенциалов  $\Delta\varphi$  в точках  $A$  и  $C$ . Каким будет направление тока в цепи, если точки  $A$  и  $C$  замкнуть проводником, расположенным вне магнитного поля?



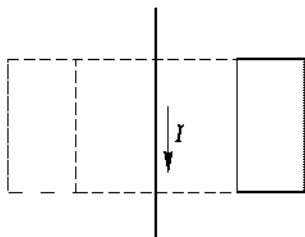
К задаче 17.30



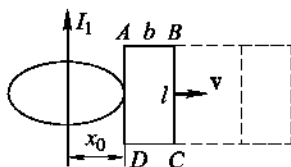
К задаче 17.31

**17.31.** В вертикальном однородном магнитном поле с индукцией 0,20 Тл поступательно движется горизонтально расположенный проводник длиной  $l = 0,50$  м со скоростью  $v = 10$  м/с так, что вектор скорости образует с вектором магнитной индукции угол  $\alpha = 30^\circ$ , а с проводником — угол  $\beta = 60^\circ$  (см. рисунок). Определить ЭДС индукции в проводнике.

**17.32.** Проволочная рамка вращается вокруг прямолинейного проводника с током  $I$  так, что этот проводник является неподвижной осью вращения (см. рисунок). Возникает ли при этом в рамке ток? Появится ли в рамке ток, если осью вращения будет одна из сторон рамки?



К задаче 17.32

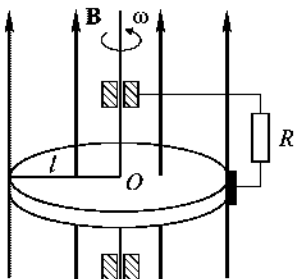


К задаче 17.33

**17.33.** Прямоугольный проводящий контур  $ABCD$  перемещается равномерно и прямолинейно со скоростью  $v$  в плоскости длинного прямолинейного проводника с током  $I_1$  (см. рисунок). Определить силу тока  $I_2$ , индуцированного в контуре в момент  $t$  после начала отсчета, и его направление, если в начальный момент сторона  $AD$  находилась на расстоянии  $x_0$  от проводника. Сопротивление контура равно  $R$ .

**17.34.** Проводящий стержень равномерно вращается в плоскости, перпендикулярной направлению магнитного поля с индукцией  $25 \text{ мТл}$ , относительно оси, проходящей через его конец. Частота вращения стержня  $40 \text{ с}^{-1}$ . Построить график зависимости потенциала стержня от расстояния до оси вращения  $\varphi(l)$ .

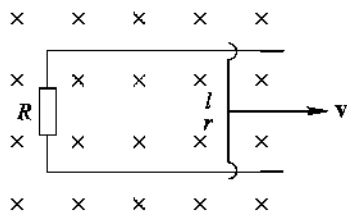
**17.35.** Металлический диск радиусом  $l = 10,0 \text{ см}$ , расположенный перпендикулярно однородному магнитному полю с индукцией  $0,50 \text{ Тл}$ , вращается относительно оси, проходящей через центр, с постоянной угловой скоростью (см. рисунок). С помощью скользящих контактов, один из которых закреплен на оси диска, а другой на его внешней окружности, диск соединяется с сопротивлением  $R = 2,5 \text{ Ом}$ . Определить механическую мощность, затрачиваемую на вращение диска при силе тока в цепи  $0,10 \text{ А}$ , и угловую скорость вращения диска. Трением пренебречь.



К задаче 17.35

**17.36.** Прямолинейный проводник длиной  $1,4 \text{ м}$  находится в однородном магнитном поле с индукцией  $74 \text{ мТл}$ . Определить разность потенциалов на концах проводника при его вращении с угловой скоростью  $75 \text{ с}^{-1}$  в плоскости, перпендикулярной направлению поля. Считать, что ось вращения проходит через середину проводника; через конец проводника; на расстоянии  $1/4$  длины от одного из концов проводника.

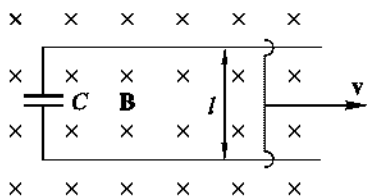
**17.37.** В однородном вертикальном магнитном поле с индукцией  $0,40 \text{ Тл}$  по двум проводящим горизонтальным стержням, расположенным на расстоянии  $0,50 \text{ м}$  друг от друга и замкнутым на резистор сопротивлением  $R = 1,5 \text{ Ом}$ , движется без трения проводник сопротивлением  $r = 0,50 \text{ Ом}$  со скоростью  $v = 1,0 \text{ м/с}$  (см. рисунок). Определить силу тока в цепи; силу, приложенную к проводнику вдоль линии движения для его равномерного перемещения с заданной скоростью, и тепловую мощность, выделяющуюся в цепи. Сопротивление направляющих стержней не учитывать.



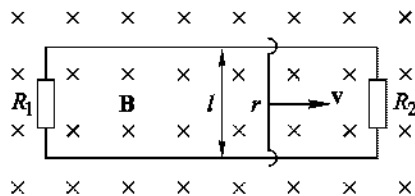
К задаче 17.37

**17.38.** По данным задачи 17.37 определить механическую мощность, необходимую для движения проводника массой  $100 \text{ г}$  и коэффициентом трения  $0,10$ .

**17.39.** В цепь, состоящую из двух параллельных реек, расположенных на расстоянии  $l = 0,40 \text{ м}$  друг от друга, перпендикулярно однородному магнитному полю с индукцией  $0,25 \text{ Тл}$  включен конденсатор емкостью  $C = 10,0 \text{ мкФ}$  (см. рисунок). С какой скоростью двигают по рейкам проводник и чему равен заряд конденсатора, если энергия электрического поля конденсатора  $8,0 \cdot 10^{-9} \text{ Дж}$ ?



К задаче 17.39

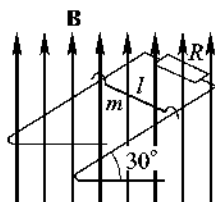


К задаче 17.40

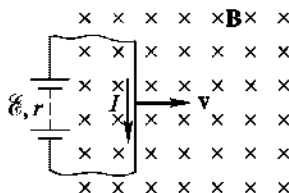
**17.40.** Проводник длиной  $l = 0,30 \text{ м}$  и сопротивлением  $r = 1,0 \text{ Ом}$  движется по проводящим рейкам со скоростью  $v = 5,0 \text{ м/с}$  перпендикулярно однородному магнитному полю с индукцией  $B = 0,40 \text{ Тл}$  (см. рисунок). Рейки замкнуты на сопротивления  $R_1 = 3,0 \text{ Ом}$  и  $R_2 = 6,0 \text{ Ом}$ . Определить силу тока в движущемся проводнике и в сопротивлениях  $R_1$  и  $R_2$ . Какая механическая мощность необходима для движения проводника? Трение не учитывать.

**17.41.** Два вертикальных проводящих стержня, замкнутых сверху резистором сопротивлением  $2,0 \text{ Ом}$ , расположены в плоскости, перпендикулярной направлению однородного магнитного поля с индукцией  $0,50 \text{ Тл}$ . По стержням равномерно без трения скользит вниз проводник массой  $0,010 \text{ кг}$ . Расстояние между стержнями  $0,20 \text{ м}$ . Определить количество теплоты, выделяющейся за  $1 \text{ с}$ , и скорость движения проводника.

**17.42.** По двум параллельным проводящим стержням, наклоненным под углом  $\alpha = 30^\circ$  к горизонту, соскальзывает без трения горизонтальная перемычка массой  $m = 0,10$  кг и длиной  $l = 1,0$  м (см. рисунок). В верхней части стержни замкнуты на резистор сопротивлением  $R = 2,0$  Ом. Сопротивлением остальной части цепи пренебречь. Вся система находится в вертикальном однородном магнитном поле с индукцией  $B = 1,0$  Тл. Определить силу тока в цепи и скорость установившегося движения.



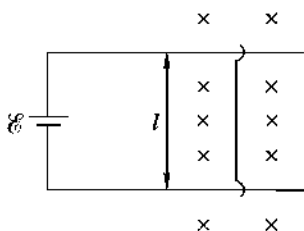
К задаче 17.42



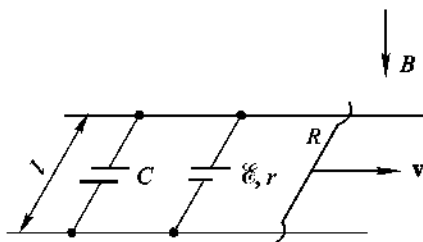
К задаче 17.43

**17.43.** Батарея с ЭДС, равной 6,0 В, и внутренним сопротивлением 0,20 Ом присоединена гибкими проводами к проводнику длиной 80 см и сопротивлением 3,8 Ом, находящемуся в однородном магнитном поле с индукцией 0,25 Тл (см. рисунок). С какой скоростью должен двигаться проводник перпендикулярно линиям магнитной индукции, чтобы на полюсах батареи напряжение было равно 4,18 В? На сколько и как изменится сила тока в цепи при остановке проводника? Сопротивлением гибких проводов пренебречь.

**17.44.** По горизонтальным направляющим, расположенным на расстоянии  $l$  друг от друга и соединенным с источником ЭДС  $\mathcal{E}$ , перпендикулярно однородному магнитному полю с индукцией  $B$ , движется проводник (см. рисунок). Определить направление движения проводника, максимальную механическую мощность, силу тока и скорость движения проводника при этой мощности. Общее сопротивление цепи  $R$ . Трение не учитывать.



К задаче 17.44



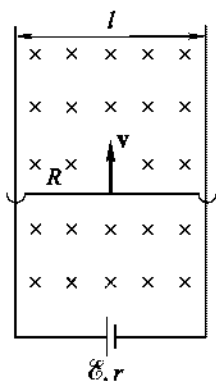
К задаче 17.45

**17.45.** Прямолинейный проводник сопротивлением  $R$  движется равномерно по гладким горизонтальным направляющим, присоединенным

к источнику тока с ЭДС  $\mathcal{E}$  и внутренним сопротивлением  $r$ . Направляющие расположены на расстоянии  $l$  друг от друга в однородном магнитном поле с индукцией  $B$ , направленной вертикально вниз (см. рисунок). К источнику тока подключен конденсатор емкостью  $C$  и энергией электрического поля  $W$ . Определить скорость движения проводника; тепловую мощность, выделяющуюся в цепи; развиваемую при этом механическую мощность.

**17.46.** Горизонтально расположенный проводник массой  $m$  и сопротивлением  $R$  поднимается по двум гладким вертикальным направляющим, присоединенным к источнику тока с ЭДС, равной  $\mathcal{E}$ , и внутренним сопротивлением  $r$ , в горизонтальном однородном магнитном поле с индукцией  $B$  (см. рисунок). Расстояние между направляющими равно  $l$ . Какую энергию затрачивает источник за время  $\Delta t$  при подъеме проводника с установившейся скоростью движения? Как зависит затраченная энергия от сопротивления проводника и внутреннего сопротивления источника тока?

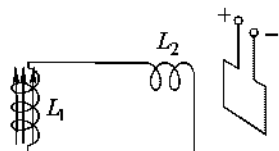
**17.47.** По двум гладким вертикальным проводящим направляющим, расположенным на расстоянии  $l$  в горизонтальном однородном магнитном поле с индукцией  $B$  и присоединенным к источнику с ЭДС  $\mathcal{E}$  и внутренним сопротивлением  $r$ , под действием магнитного поля поднимается проводник (см. рисунок к задаче 17.46). Масса проводника  $m$ , сопротивление  $R$ . Определить скорость установившегося движения проводника; механическую мощность, развиваемую в процессе работы магнитных сил, и тепловую мощность, выделяющуюся в цепи.



К задаче 17.46

**17.48.** При каких условиях в пространстве может возникнуть вихревое электрическое поле с замкнутыми линиями напряженности? Будет ли при этом равна нулю работа по перемещению электрического заряда вдоль линии напряженности по замкнутому контуру?

**17.49.** Встречаются ли магнитные поля с замкнутыми линиями индукции в пространстве, где нет электрических зарядов? Если встречаются, то в каком случае?



К задаче 17.51

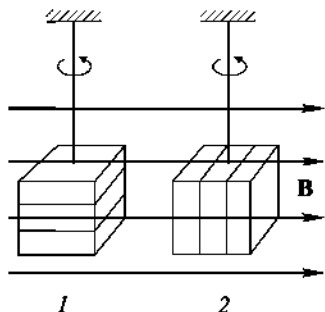
**17.50.** При каком изменении магнитного поля возникает вихревое электрическое поле постоянное? переменное?

**17.51.** Как поведет себя рамка с током, подвешенная на гибких проводниках, при возрастании магнитного потока в катушке  $L_1$  (см. рисунок).

**17.52.** Металлический брусок, помещенный на вертикально поставленную катушку, нагревается, если по ее

виткам идет переменный ток, и остается холодным при постоянном токе. Почему?

**17.53.** Два медных кубика, составленные из одинаковых изолированных пластин и подвешенные на нитях, вращаются с одинаковой угловой скоростью между полюсами выключенного электромагнита (см. рисунок). Какой из кубиков остановится позже при включении электромагнита?



К задаче 17.53

**17.54.** По рисунку к задаче 17.53 укажите направление вихревых токов в кубике 2 для положения, указанного на рисунке.

**17.55.** Алюминиевый диск, подвешенный на нитях, может свободно вращаться. При быстром вращении расположенного под ним магнита диск тоже начинает вращаться. Почему? В каком направлении? Может ли он вращаться с той же угловой скоростью, что и магнит?

**17.56.** Медная пластинка подвешена на нити около полюса сильного электромагнита, по обмотке которого идет постоянный ток. Что произойдет при быстром увеличении силы тока? При быстром уменьшении силы тока в обмотке электромагнита?

**17.57.** Может ли сильный электромагнит притягивать или отталкивать один и тот же предмет из неферромагнитного проводящего материала? Если может, то чем это обусловлено?

### Самеоиндукция. Энергия магнитного поля

**17.58.** В каком случае ЭДС самоиндукции больше: при замыкании цепи постоянного тока или при ее размыкании?

**17.59.** Почему ЭДС самоиндукции при замыкании цепи постоянного тока меньше ЭДС самого источника?

**17.60.** Определить ЭДС самоиндукции, возникающую в катушке индуктивностью 25 мГн, если спустя 75 мс после замыкания цепи в ней устанавливается сила тока 3,75 А. Каков физический смысл знака ЭДС самоиндукции?

**17.61.** Определить ЭДС самоиндукции, возникающую в катушке индуктивностью 68 мГн при уменьшении силы тока в ней от 3,8 А до нуля за 12 мс. Какой физический смысл знака полученного ответа?

**17.62.** Определить индуктивность катушки, если при уменьшении силы тока на 2,8 А за 62 мс в катушке возникает средняя ЭДС самоиндукции, равная 14 В.

**17.63.** За какое время в катушке с индуктивностью 240 мГн происходит возрастание силы тока от нуля до 11,4 А, если при этом возникает средняя ЭДС самоиндукции, равная 30 В?



**17.64.** Определить мгновенное и среднее значения ЭДС самоиндукции в цепи индуктивностью  $34 \text{ мГн}$ , если сила тока в ней изменяется по закону  $i = (2 + 3t) \cdot 10^{-1}$ . Всегда ли среднее значение ЭДС самоиндукции совпадает с ее мгновенным значением?

**17.65.** Определить индуктивность цепи, в которой изменение силы тока по закону  $i = 1 - 0,2t$  возбуждает среднюю ЭДС самоиндукции, равную  $4,0 \cdot 10^{-3} \text{ В}$ .

**17.66.** Определить энергию магнитного поля катушки с индуктивностью  $24 \text{ мГн}$  при силе тока в ней  $2,3 \text{ А}$ . Как изменится энергия магнитного поля при уменьшении силы тока в два раза?

**17.67.** Определить энергию магнитного поля катушки, содержащей  $120$  витков, если при силе тока  $7,5 \text{ А}$  магнитный поток в ней равен  $2,8 \text{ мВб}$ .

**17.68.** Магнитное поле катушки с индуктивностью  $95 \text{ мГн}$  обладает энергией  $0,19 \text{ Дж}$ . Чему равна сила тока в катушке?

**17.69.** На катушке сопротивлением  $8,2 \text{ Ом}$  и с индуктивностью  $25 \text{ мГн}$  поддерживается постоянное напряжение  $55 \text{ В}$ . Сколько энергии выделится при размыкании цепи катушки? Какая средняя ЭДС самоиндукции появится при этом в катушке, если энергия будет выделяться в течение  $12 \text{ мс}$ ?

**17.70.** Какие превращения энергии происходят в электрической цепи при нарастании силы тока после ее замыкания?

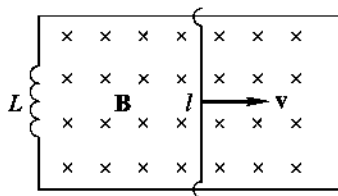
**17.71.** В катушке, содержащей  $400$  витков, намотанных на картонный цилиндр радиусом  $2,0 \text{ см}$  и длиной  $0,40 \text{ м}$ , сила тока изменяется по закону  $i = 0,20t$ . Определить энергию магнитного поля и ЭДС самоиндукции в катушке в конце десятой секунды.

**17.72.** На катушку длиной  $l$  и сопротивлением  $R$ , имеющую  $N$  витков, подано напряжение  $U$ . Определить энергию, выделенную за время  $\Delta t$ , и среднюю ЭДС самоиндукции в ней. Диаметр витков  $d$ .

**17.73.** В катушке индуктивности при средней силе тока  $I_{\text{ср}}$  энергия магнитного поля изменяется на  $\Delta W$  за время  $\Delta t$ . Определить возникающую при этом среднюю ЭДС самоиндукции.

**17.74.** В катушке при силе тока  $I$  энергия магнитного поля равна  $W$ . Сопротивление ее обмотки равно  $R$ . Какой заряд пройдет по обмотке при равномерном уменьшении силы тока в  $n$  раз? На сколько изменится при этом энергия магнитного поля?

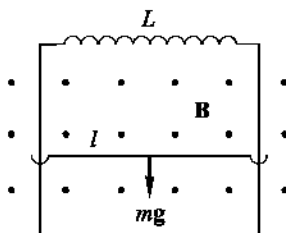
**17.75.** Две параллельные направляющие, отстоящие друг от друга на расстояние  $l$ , расположены в однородном магнитном поле с индукцией  $\mathbf{B}$  и замкнуты катушкой с индуктивностью  $L$  (см. рисунок). По направляющим со скоростью  $\mathbf{v}$ , перпендикулярной линиям магнитной индукции, скользит проводник сопротивлением  $R$ . Определить энергию магнитного поля катушки; тепло-



К задаче 17.75

вую мощность, выделяющуюся в цепи; механическую мощность, затрачиваемую на перемещение проводника с заданной скоростью.

Сопротивление направляющих и катушки не учитывать.



К задаче 17.76

**17.76.** Вертикальные направляющие, отстоящие друг от друга на расстоянии  $l$ , расположены в однородном магнитном поле с индукцией  $\mathbf{B}$  и замкнуты сверху катушкой с индуктивностью  $L$  (см. рисунок). По направляющим начинает скользить без трения горизонтальный проводник массой  $m$ . Определить максимальную скорость, достигнутую проводником; пройденное при этом расстояние и энергию магнитного поля катушки. Сопротивлением цепи пренебречь.

Определить максимальную скорость, достигнутую проводником; пройденное при этом расстояние и энергию магнитного поля катушки. Сопротивлением цепи пренебречь.

## Глава III

# КОЛЕБАНИЯ И ВОЛНЫ

## § 18. Механические колебания и волны. Звук

**Пример 69.** Математический маятник, имеющий длину  $l$ , находится в кабине, движущейся с ускорением  $a$  так, что вертикаль образует с вектором  $a$  угол  $\alpha$  (см. рисунок). Определить период колебаний математического маятника. Каким будет период, если ускорение кабины не меняется по модулю? направлено вверх? вниз?

*Дано:*  $l$  — длина математического маятника;  $a$  — ускорение кабины,  $\alpha$  — угол, образованный вертикалью и вектором  $a$ . Из таблиц:  $g$  — ускорение свободного падения.

*Найти:*  $T_{1,2,3}$  — периоды гармонических колебаний маятника в трех случаях.

**Решение.** 1. Период гармонических колебаний математического маятника определяется по формуле

$$T = 2\pi\sqrt{l/g'}.$$

В этом случае  $g'$  определяется как векторная сумма

$$g' = g + (-a).$$

Применяя теорему косинусов, определяем модуль вектора  $g'$

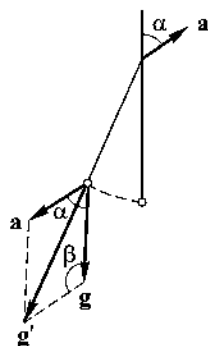
$$|g'| = \sqrt{|g|^2 + |a|^2 - 2|g| \cdot |a| \cos \beta}.$$

С учетом того, что  $\beta = 180^\circ - \alpha$  и  $\cos \beta = \cos(180^\circ - \alpha) = -\cos \alpha$ , получим

$$|g'| = \sqrt{|g|^2 + |a|^2 + 2|g| \cdot |a| \cos \alpha}.$$

Используем значение  $g'$  для определения  $T_1$  \*):

$$T_1 = 2\pi\sqrt{\frac{l}{\sqrt{g^2 + a^2 + 2ga \cos \alpha}}}.$$



К примеру 69

\*) Здесь и далее  $|g| = g$ ,  $|-a| = |a| = a$ .

2. При равноускоренном движении кабины вертикально вверх  $\alpha = 0^\circ$  и  $\cos 0^\circ = 1$  и, следовательно,

$$g' = \sqrt{g^2 + a^2 + 2ga} = g + a.$$

В этом случае

$$T_2 = 2\pi \sqrt{\frac{l}{g+a}}.$$

3. При равноускоренном движении кабины вертикально вниз  $\alpha = 180^\circ$  и  $\cos 180^\circ = -1$ . Тогда

$$g' = \sqrt{g^2 + a^2 + 2ga(-1)} = g - a.$$

В этом случае

$$T_3 = 2\pi \sqrt{\frac{l}{g-a}}.$$

*Примечание.* При  $a = g$  (состояние невесомости) маятник, находившийся в движении, будет продолжать двигаться равномерно и, если позволит подвес, движение станет вращательным в вертикальной плоскости. Если в момент наступления невесомости маятник был в крайнем положении, то он его сохранит.

*Ответ:* В зависимости от ускорения  $a$  период колебания математического маятника определится по формулам

$$T_1 = 2\pi \sqrt{\frac{l}{\sqrt{g^2 + a^2 + 2ga \cos \alpha}}}, \quad T_{2,3} = 2\pi \sqrt{\frac{l}{g \pm a}}.$$

**Пример 70.** Маленький шарик массой  $m$  и зарядом  $Q$ , подвешенный на нити длиной  $l$ , совершает гармонические колебания в однородном электрическом поле напряженностью  $E$ . Каким будет период колебаний, если вектор напряженности поля направлен вертикально? горизонтально?

*Дано:*  $m$  — масса шарика;  $Q$  — его заряд;  $l$  — длина нити, на которой подвешен шарик;  $E$  — напряженность электрического поля. Из таблиц:  $g$  — ускорение свободного падения.

*Найти:*  $T'$  — период колебаний при вертикальном расположении электрического поля;  $T''$  — период колебаний в электрическом поле напряженностью, направленной горизонтально.

**Решение.** 1. Рассматривая нитяной маятник как математический, запишем формулу для определения периода его колебаний в виде

$$T' = 2\pi \sqrt{\frac{l}{g'}}.$$

Здесь колебания происходят под действием силы тяжести и силы, действующей со стороны электрического поля:

$$g' = g \pm a, \quad \text{где} \quad a = \frac{F_{\text{эл}}}{m} = \frac{QE}{m}.$$

В нашем примере, когда заряд шарика положительный, ускорение будет иметь знак плюс; если вектор напряженности электрического поля направлен вертикально вниз,  $g' = g + QE/m$  и период  $T' = 2\pi\sqrt{l/(g + QE/m)}$ . В случае, когда вектор  $E$  направлен вверх, ускорение берется со знаком минус и формула периода приобретает вид

$$T' = 2\pi\sqrt{\frac{l}{g - QE/m}}.$$

2. Если колебания маятника происходят в горизонтальном электрическом поле ( $\alpha = 90^\circ$ ), то ускорение  $g' = \sqrt{g^2 + a^2}$  (см. пример 69). Тогда

$$T'' = 2\pi\sqrt{\frac{l}{\sqrt{g^2 + (QE/m)^2}}}.$$

**Ответ:** Если на положительный заряд шарика будет действовать горизонтальное электрическое поле или вертикальное, направленное вниз, период колебаний уменьшится и может быть найден по формулам, обозначенным в решении. Если ускорение  $a$ , создаваемое электрическим полем, будет направлено вверх и окажется больше ускорения свободного падения, колебания нитяного маятника будут происходить выше точки подвеса.

**Пример 71.** Часы с маятником выверены и правильно идут на экваторе. На сколько вперед уйдут часы за сутки, если их перенести на полюс?

**Дано:**  $t_1 = 1 \text{ сут} = 8,64 \cdot 10^4 \text{ с}$  — продолжительность суток. Из таблиц:  $g_1 = 9,781 \text{ м/с}^2$  — ускорение свободного падения на экваторе,  $g_2 = 9,831 \text{ м/с}^2$  — ускорение свободного падения на полюсе.

**Найти:**  $\Delta t$  — на сколько вперед уйдут часы за сутки.

**Решение.**  $\Delta t = t_2 - t_1$ , где  $t_1$  — продолжительность суток и  $t_2$  — время, показанное часами за сутки на полюсе.

На экваторе при правильном ходе часов маятник длиной  $l$  за время  $t_1$  совершит  $N_1$  колебаний:  $N_1 = t_1/T_1$ . Соответственно на полюсе за то же время  $N_2 = t_1/T_2$ . Отсюда  $N_2/N_1 = T_1/T_2$ .

Так как время, показанное часами, прямо пропорционально числу колебаний ( $t_1/t_2 = N_1/N_2$ ), то  $t_2 = (N_2/N_1)t_1$ , или  $t_2 = (T_1/T_2)t_1$ .

Учитывая, что  $T_1 = 2\pi\sqrt{l/g_1}$  и  $T_2 = 2\pi\sqrt{l/g_2}$ , получаем

$$\Delta t = \left(\sqrt{\frac{g_2}{g_1}} - 1\right)t_1 = \left(\sqrt{\frac{9,831}{9,781}} - 1\right) \cdot 8,64 \cdot 10^4 \text{ с} \approx 221 \text{ с} \approx 3,7 \text{ мин.}$$

**Ответ:**  $\Delta t \approx 3,7 \text{ мин.}$

**Пример 72.** Груз массой 250 г, закрепленный на пружине жесткостью 0,40 Н/м, совершает вертикальные колебания с амплитудой 4,0 см. Определить период колебаний груза. На сколько изменится период, если к грузу присоединить еще одну такую же пружину последовательно? параллельно? Чему равна полная энергия колебаний груза в указанных трех случаях?

*Дано:*  $m = 250 \text{ г} = 0,25 \text{ кг}$  — масса груза;  $k = 0,40 \text{ Н/м}$  — жесткость пружины,  $A = 4,0 \text{ см} = 4,0 \cdot 10^{-2} \text{ м}$  — амплитуда.

*Найти:*  $T$  — период упругих колебаний груза;  $\Delta T'$  — разность периодов при колебаниях на одной пружине и двух, соединенных последовательно;  $\Delta T''$  — то же при параллельном соединении пружин;  $W$ ,  $W'$  и  $W''$  — полную энергию при колебаниях груза на одной пружине и двух при их последовательном и параллельном соединении.

**Решение.** Период упругих колебаний определяется по формуле

$$T = 2\pi\sqrt{\frac{m}{k}} = 2\pi\sqrt{\frac{0,25 \text{ кг}}{0,40 \text{ Н/м}}} \approx 5,0 \text{ с.}$$

При последовательном соединении двух пружин и неизменном грузе удлинение их  $\Delta l' = \Delta 2l$ . Тогда

$$k' = \frac{mg}{2\Delta l} = \frac{k}{2}, \quad T' = 2\pi\sqrt{\frac{m \cdot 2}{k}} = T\sqrt{2} \approx 7,0 \text{ с.}$$

$$\Delta T' = T' - T \approx 2,0 \text{ с.}$$

При параллельном соединении пружин силу тяжести груза можно разложить на две равные составляющие, каждая из которых приложена к одной пружине, при этом  $\Delta l'' = \Delta l/2$ ,  $k'' = 2k$  и

$$T'' = 2\pi\sqrt{\frac{m}{k''}} = 2\pi\sqrt{\frac{m}{2k}} = \frac{T}{\sqrt{2}} = \frac{5,0}{1,41} \approx 3,5 \text{ с;}$$

$$\Delta T'' = T'' - T \approx -1,5 \text{ с.}$$

Для определения полной энергии при колебаниях груза удобно взять формулу  $W = kA^2/2$ . Здесь значение энергии, как видим, зависит от жесткости одной пружины или системы пружин:

$$W = \frac{0,40 \cdot 16 \cdot 10^{-4}}{2} \text{ Н/м} \cdot \text{м}^2 = 3,2 \cdot 10^{-4} \text{ Дж} = 0,32 \text{ мДж,}$$

$$W' = \frac{kA^2}{2 \cdot 2} = \frac{W}{2} = 0,16 \text{ мДж,}$$

$$W'' = \frac{2kA^2}{2} = 2W = 0,64 \text{ мДж.}$$

**Пример 73.** Плоская волна, возбуждаемая вибратором, колеблющимся по закону  $x = 0,20 \sin(62,8t)$ , распространяется со скоростью  $u = 10 \text{ м/с}$ . Записать уравнение плоской волны. Определить длину бегущей волны; перемещение частиц среды за период, разность фаз колебаний точек 1 и 2; смещение точек 1 и 2, расположенных вдоль

луча на расстояниях  $l_1 = 10,25$  м и  $l_2 = 10,75$  м от вибратора, через 5,0 с от начала колебаний вибратора; длину стоячей волны, образующейся в результате интерференции волны, идущей от вибратора, и волны, отраженной от преграды.

*Дано:*  $x = 0,20 \sin(62,8t)$  — уравнение колебаний вибратора,  $u = 10$  м/с — скорость распространения волны,  $l_1 = 10,25$  м и  $l_2 = 10,75$  м — расстояния вдоль луча от вибратора до точек 1 и 2,  $t = 5,0$  с — промежуток времени от начала колебаний вибратора до момента времени, для которого определяются смещения точек 1 и 2.

*Записать:* уравнение плоской волны для данного случая.

*Найти:*  $\lambda$  — длину бегущей волны;  $S$  — перемещение частиц среды за период волны;  $\Delta\varphi$  — разность фаз колебаний точек 1 и 2;  $x_1$  и  $x_2$  — смещение точек 1 и 2;  $\lambda_{\text{ст}}$  — длину стоячей волны.

*Решение.* Уравнение плоской волны имеет вид

$$x = A \sin \left[ 2\pi\nu \left( t - \frac{l}{u} \right) \right].$$

Запишем уравнение плоской волны, возбуждаемой вибратором:

$$x = 0,29 \sin \left[ 62,8 \left( t - \frac{l}{10} \right) \right].$$

В данном случае начальная фаза колебаний вибратора равна нулю.

Длину бегущей волны найдем по формуле  $\lambda = u/\nu$ , а неизвестную частоту  $\nu$  определим из уравнения колебаний вибратора:  $\nu = \omega/(2\pi)$ . Отсюда

$$\lambda = \frac{u \cdot 2\pi}{\omega} = \frac{10 \cdot 2 \cdot 3,14}{62,8} \frac{\text{м/с}}{\text{с}^{-1}} = 1,0 \text{ м.}$$

Перемещение частиц среды за период находим, учитывая, что они принимают участие только в колебательном движении. Такое перемещение  $S$  равно нулю.

Разность фаз колебаний точек 1 и 2 найдем по формуле

$$\Delta\varphi = \varphi_2 - \varphi_1 = 2\pi\nu \frac{l_2 - l_1}{u} = 62,8 \cdot \frac{10,75 - 10,25}{10} \text{ с}^{-1} \cdot \frac{\text{м}}{\text{м/с}} = 3,14 \text{ рад.}$$

Точки колеблются в противоположных фазах.

Смещение точек среды 1 и 2 через 5,0 с от начала колебаний вибратора определим по уравнению плоской волны, подставив значения  $l_1$  и  $l_2$ :

$$\begin{aligned} x_1 &= 0,20 \sin \left[ 62,8 \left( 5 - \frac{10,25}{10} \right) \right] = -0,2 \text{ [м]}, \\ x_2 &= 0,20 \sin \left[ 62,8 \left( 5 - \frac{10,75}{10} \right) \right] = 0,2 \text{ [м]}. \end{aligned}$$

Длину стоячей волны найдем, зная, что она равна длине бегущих волн, в результате интерференции которых она образовалась:

$$\lambda_{\text{ст}} = \lambda = 1,0 \text{ м.}$$

Ответ:  $x = 0,20 \sin [62,8(t - l/10)]$ ;  $\lambda = 1,0$  м;  $S = 0$ ;  $\Delta\varphi = 3,14$  рад ( $\pi$ );  $x_1 = -0,2$  м;  $x_2 = 0,2$  м;  $\lambda_{\text{ст}} = 1,0$  м.

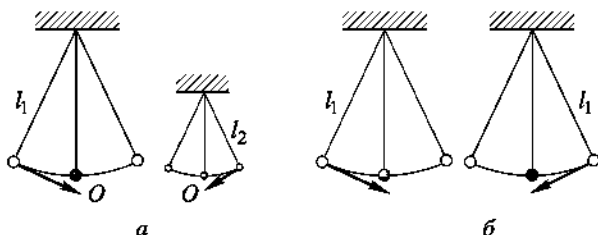
### Колебания

**18.1.** Материальная точка за 2,5 мин совершила 120 полных колебаний. Определить период и частоту колебаний.

**18.2.** Материальная точка колеблется с частотой 10 кГц. Определить период и число колебаний в минуту.

**18.3.** Два пружинных маятника совершают колебания по вертикали с одинаковыми периодами, причем второй проходит положение равновесия позже на два периода; на половину периода. Как будут направлены скорости маятников относительно друг друга в любой момент времени? Как колеблются маятники относительно друг друга?

**18.4.** Определить наименьшую разность фаз колебаний маятников, изображенных на рисунке. Смещение каждого маятника равно амплитуде. Сохранится ли разность фаз в случае рисунка а? в случае рисунка б?



К задаче 18.4

**18.5.** Записать уравнения гармонических колебаний при следующих параметрах: 1)  $A = 10,0$  см,  $\varphi_0 = \pi/4$ ,  $\omega = 2\pi$ ; 2)  $A = 5,0$  см,  $\varphi_0 = \pi/2$ ,  $T = 2$  с; 3)  $A = 4,0$  см,  $\varphi_0 = \pi$ ,  $\nu = 2,0$  Гц.

**18.6.** Записать уравнение гармонических колебаний при следующих параметрах:  $A = 5,0 \cdot 10^{-2}$  м,  $T = 0,01$  с,  $\varphi_0 = 0$ . Определить частоту колебаний; круговую частоту; амплитуды скорости и ускорения; полную энергию гармонических колебаний для тела массой  $m = 0,10$  кг.

**18.7.** Гармонические колебания материальной точки описываются уравнением  $x = 2 \sin[\pi(t/4 + 1/2)]$ , где смещение выражено в сантиметрах, а время — в секундах. Определить амплитуду, начальную фазу и период колебаний.

**18.8.** Материальная точка совершает гармонические колебания с начальной фазой, равной нулю, и амплитудой  $A$ . Определить смещение колеблющейся точки для моментов времени  $t_1 = T/12$ ,  $t_2 = T/4$ ,  $t_3 = T/2$  и  $t_4 = 7T/12$ .

**18.9.** По условию задачи 18.8 определить смещение для моментов времени  $t_1 = 2nT/2$ ,  $t_2 = (2n + 1)T/2$ , где  $n = 0, 1, 2, \dots$

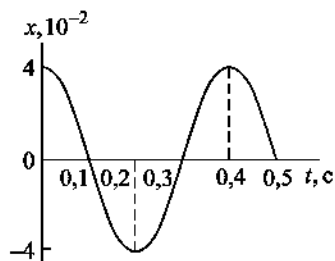


**18.10.** Материальная точка, совершая гармонические колебания с начальной фазой, равной нулю, проходит первую половину амплитуды за 0,05 с. За какое время она пройдет вторую половину амплитуды? Записать уравнение гармонических колебаний, амплитуда которых равна  $2 \cdot 10^{-2}$  м.

**18.11.** Сколько времени в течение одного периода материальная точка, совершающая гармонические колебания, находится в интервале от  $+A/2$  до  $-A/2$ .

**18.12.** По графику гармонических колебаний (см. рисунок) записать уравнение движения материальной точки и определить ее максимальную скорость.

**18.13.** Используя параметры гармонических колебаний, показанных на рисунке к задаче 18.12, записать уравнения зависимости скорости и ускорения от времени. Определить мгновенные значения скорости и ускорения для момента времени 0,35 с.



К задаче 18.12

**18.14.** Тело массой 50 г совершает гармонические колебания, описываемые уравнением  $x = 2,0 \cdot 10^{-2} \times \sin(20\pi t + \pi/2)$ . Определить максимальное смещение;

начальную фазу; частоту колебаний; максимальную возвращающую силу и максимальную кинетическую энергию колеблющегося тела.

**18.15.** Материальная точка, совершая гармонические колебания с частотой 10 Гц, в положении равновесия имеет скорость 6,28 м/с. Определить максимальные значения смещения и ускорения; записать уравнение гармонических колебаний с начальной фазой, равной нулю.

**18.16.** Скорость тела при гармонических колебаниях определяется уравнением  $v = 0,060 \sin(100t)$ . Записать уравнение зависимости смещения от времени. Определить максимальные значения скорости и ускорения, а также энергию гармонических колебаний для тела массой 200 г.

**18.17.** Скорость материальной точки массой 100 г задана уравнением  $v = 2\pi \cdot 10^{-1} \cos(2\pi t)$ . Определить максимальное ускорение; смещение и потенциальную энергию материальной точки через  $5/12$  с от начала колебаний; путь, пройденный за то же время.

**18.18.** По уравнению движения  $x = 0,20 \sin(\pi t)$  определить смещение материальной точки через 1,5 с от начала колебаний; потенциальную и кинетическую энергию; возвращающую силу в этот момент времени. Какой путь пройдет за это время материальная точка массой 200 г?

**18.19.** На горизонтальной подставке, совершающей гармонические колебания по вертикали, лежит груз. При каком максимальном ускорении подставки груз еще не будет отрываться от ее поверхности? Какой будет при этом амплитуда колебаний, если их период равен 0,5 с?

**18.20.** Горизонтальная доска совершает гармонические колебания в горизонтальном направлении с периодом 2,0 с. При какой амплитуде колебаний лежащее на ней тело начнет скользить? Коэффициент трения покоя равен 0,20.

**18.21.** Цилиндр, имеющий массу  $m$  и площадь основания  $S$ , свободно плавает в жидкости плотностью  $\rho$ . Определить период гармонических колебаний цилиндра после того, как его погрузили глубже, а затем отпустили. Сопротивление среды не учитывать.

**18.22.** Вертикальный цилиндр высотой  $H$  и площадью основания  $S$  плавает в жидкости. Плотности материала цилиндра и жидкости соответственно равны  $\rho$  и  $\rho_{\text{ж}}$ . Определить период малых колебаний цилиндра, возникших после того, как его немного погрузили в жидкость, а затем отпустили. Сопротивлением среды пренебречь.

**18.23.** В двух вертикальных сообщающихся сосудах находится жидкость массой  $m$ . Выведенная из состояния равновесия, она приходит в колебательное движение. Плотность жидкости равна  $\rho$ , площадь поперечного сечения каждого сосуда  $S$ . Определить период колебания жидкости.

**18.24.** По условию задачи 18.23 определить период колебаний жидкости, если площади поперечного сечения сосудов равны  $S_1$  и  $S_2$ .

**18.25.** Чему равна жесткость пружины, если подвешенный к ней груз массой 25 г совершает 120 вертикальных колебаний в минуту?

**18.26.** Неподвижный груз, подвешенный к пружине, растягивает ее на длину  $\Delta l$ . Определить, каким будет период вертикальных колебаний груза. Как зависит период этих колебаний от ускорения свободного падения?

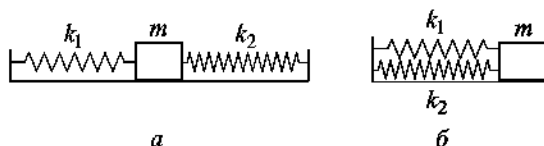
**18.27.** Висящий на пружине груз массой 25,0 г совершает вертикальные колебания с амплитудой 6,0 см. Определить зависимость смещения груза от времени и энергию гармонических колебаний, если для упругого удлинения пружины на 1,0 см требуется сила 0,10 Н. Начальная фаза колебаний равна нулю.

**18.28.** По условию задачи 18.27 определить, при каком смещении и через какой промежуток времени от момента прохождения положения равновесия кинетическая энергия колеблющегося груза равна потенциальной энергии пружины. Какую часть периода составляет это время?

**18.29.** Груз массой  $m$ , лежащий на гладкой неподвижной горизонтальной поверхности, прикреплен к пружине жесткостью  $k$ . Другой конец пружины неподвижно закреплен. Груз тянут по поверхности с силой  $F = mg$  и затем отпускают. Написать уравнение колебания груза, считая их гармоническими с начальной фазой, равной нулю. Определить энергию этих колебаний. Как изменится период колебаний, если всю систему перенести на Луну? поместить в ракету, поднимающуюся с ускорением  $a$ ?

**18.30.** Груз массой  $m$  совершает упругие колебания под действием пружин жесткостью  $k_1$  и  $k_2$ , присоединенных, как показано на рисун-

ке  $a$ . Определить период этих колебаний. Изменится ли период, если пружины закрепить, как показано на рисунке  $b$ ?



К задаче 18.30

**18.31.** Груз, подвешенный к пружине, совершает колебания с периодом  $T$ . Каким станет период колебаний груза, если точку крепления пружины поместить в ее середине?

**18.32.** Груз массой  $m$  подвешивают к двум невесомым пружинам жесткостью  $k_1$  и  $k_2$ . Определить период гармонических колебаний груза при последовательном соединении пружин; при их параллельном соединении, когда груз подвешен посередине между ними на невесомом стержне.

**18.33.** Груз массой  $m$ , подвешенный на невесомой пружине жесткостью  $k$ , совершает вертикальные гармонические колебания с амплитудой  $A$ . Каким станет период колебаний, если на пути груза на расстоянии  $l < A$  поставить горизонтальную преграду, соударения с которой будут абсолютно упругими? Временем взаимодействия пренебречь.

**18.34.** Определить для Москвы период гармонических колебаний математического маятника длиной 0,995 м. Во сколько раз и как надо изменить длину маятника, чтобы период увеличился в два раза? Ускорение свободного падения для Москвы равно  $9,8156 \text{ м/с}^2$ .

**18.35.** Математический маятник длиной 1,1 м за 1 мин 45,2 с совершил 50 полных колебаний. Определить ускорение свободного падения в том месте, где находится маятник.

**18.36.** Определить длину математического маятника, совершившего 50 полных колебаний за 1 мин 40 с, если ускорение свободного падения равно  $9,81 \text{ м/с}^2$ . На сколько нужно изменить длину маятника, чтобы частота его колебаний увеличилась в два раза?

**18.37.** Как относятся длины двух математических маятников, если за одинаковое время первый маятник совершил 10 колебаний, а второй — 20 колебаний?

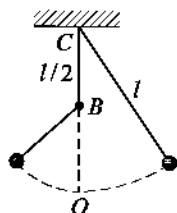
**18.38.** За одно и то же время один математический маятник совершает 5 колебаний, а другой — 3 колебания. Определить длину каждого маятника, если разность их длин равна 48 см.

**18.39.** Два математических маятника длиной 0,996 и 0,249 м одновременно начинают колебаться в одинаковых фазах. Через какое наименьшее время фазы их колебаний снова будут одинаковыми? как часто это будет повторяться ( $g = 9,81 \text{ м/с}^2$ )?

**18.40.** Два малых шарика подвешены на нерастяжимых нитях одинаковой длины. Один из них поднимают вертикально до точки

подвеса, другой при натянутой нити отклоняют на малый угол от вертикали так, что его колебания можно считать гармоническими. Шарик одновременно отпускают. Какой из них раньше достигнет положения равновесия?

**18.41.** Шарик, подвешенный на нити и поднятый вертикально до точки подвеса, при свободном падении возвращается в положение равновесия через время  $t_1$ . За какое время он при гармонических колебаниях отклонится на максимальный угол от вертикали?



К задаче 18.42

**18.42.** За какое время совершит одно полное колебание математический маятник, изображенный на рисунке, если точка перегиба нити  $B$  находится на одной вертикали с точкой подвеса  $C$  на расстоянии  $l/2$  от нее. Как изменятся энергия маятника и максимальная высота подъема после прохождения середины нити точки  $B$ ?

**18.43.** К упругой плите, наклоненной на угол  $\beta$  от вертикали, подвешен математический маятник длиной  $l$  (см. рисунок). Маятник отклонили от вертикали на малый угол  $\alpha$  и отпустили. Определить период колебаний маятника, считая соударения его с плитой абсолютно упругими. Каким был бы период колебаний при  $\beta/\alpha = 0,866$ ?

**18.44.** Пружинный и нитяной маятники на Земле совершают гармонические колебания, имея одинаковые периоды. Сохранятся ли периоды колебаний маятников, если их перенести на Луну ( $g_{\text{л}} = g_{\text{з}}/6$ )?

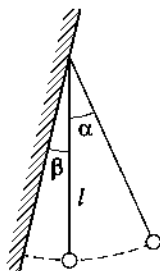
**18.45.** Как отличается период гармонических колебаний математического маятника на планете от периода колебаний того же маятника на Земле, если радиус и плотность планеты в два раза меньше, чем у Земли?

**18.46.** На сколько отстанут часы с маятником за сутки, если их с полюса перенести на экватор? Считать, что на полюсе часы шли правильно ( $g_{\text{п}} \approx 9,83 \text{ м/с}^2$ ,  $g_{\text{экв}} \approx 9,78 \text{ м/с}^2$ ).

**18.47.** Часы с маятником точно идут на уровне моря. На сколько будут отставать за сутки часы, если их поднять на высоту  $4,0 \text{ км}$ ? Радиус Земли равен  $6,4 \cdot 10^3 \text{ км}$ .

**18.48.** На сколько отстанут за сутки часы с латунным маятником при повышении температуры на  $20 \text{ К}$ ? Маятник можно считать математическим. Температурный коэффициент расширения латуни  $\alpha = 2,0 \times 10^{-5} \text{ К}^{-1}$ .

**18.49.** Точка подвеса математического маятника движется в вертикальной плоскости с постоянным ускорением  $a$ , направленным под углом  $\alpha$  к вертикали. Определить период гармонических колебаний маятника длиной  $l$ . Ускорение свободного падения равно  $g$ .



К задаче 18.43

**18.50.** Точка подвеса математического маятника длиной  $l$  движется по вертикали с ускорением  $a < g$ . Определить период гармонических колебаний маятника при движении точки подвеса вверх; вниз.

**18.51.** Период колебаний математического маятника в ракете, поднимающейся вертикально вверх, в два раза меньше, чем на Земле. Считая ускорение свободного падения постоянным и равным  $g$ , определить ускорение ракеты.

**18.52.** Определить период колебаний математического маятника в космическом корабле после выключения двигателей, если в момент выключения маятник находился в крайнем положении; маятник двигался.

**18.53.** Точка подвеса математического маятника движется горизонтально и прямолинейно с ускорением  $a$ . Во сколько раз отличается период гармонических колебаний  $T'$  при этом движении от периода колебаний  $T$  того же маятника при неподвижной точке подвеса? При равномерном прямолинейном ее движении?

**18.54.** Математический маятник, находящийся в вагоне поезда, движущегося по закруглению радиусом  $R$  с постоянной скоростью, колеблется с периодом в  $n$  раз меньшим, чем при равномерном прямолинейном движении поезда с той же скоростью. Определить скорость движения поезда. Ускорение свободного падения равно  $g$ .

**18.55.** Космический корабль движется вдали от небесных тел. Как по периоду колебаний  $T$  математического маятника длиной  $l$ , подвешенного в кабине корабля, определить ускорение корабля, сообщаемое ему работающими двигателями?

**18.56.** Подвешенный на длинной нити стальной шарик совершает гармонические колебания. К шарiku снизу поднесли магнит. Как изменятся сила натяжения нити, возвращающая сила и период колебаний?

**18.57.** Математический маятник, представляющий собой заряженный шарик массой  $m$ , подвешенный на нити длиной  $l$ , помещен в электрическое поле плоского воздушного конденсатора, заряженного до напряжения  $U$ . Расстояние между пластинами конденсатора равно  $d$ . Определить период колебаний маятника, если конденсатор расположен горизонтально; вертикально. Заряд шарика  $+Q$ .

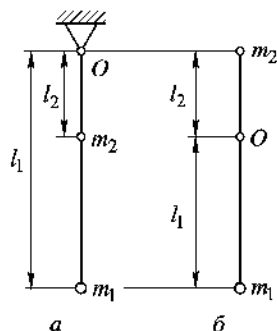
**18.58.** Математический маятник совершает гармонические колебания с частотой  $\nu$ , отклоняясь на малый угол  $\alpha$  от вертикали. Определить амплитуду колебания маятника и его максимальную скорость. Ускорение свободного падения равно  $g$ .

**18.59.** Тяжелый шарик, подвешенный на нити, совершает гармонические колебания. При максимальном отклонении нити на малый угол  $\alpha$  шарик поднимается на высоту  $h$  от уровня положения равновесия. Определить длину нити и период гармонических колебаний. Принимая начальную фазу равной нулю, записать уравнение для колебаний маятника. Ускорение свободного падения равно  $g$ .

**18.60.** Математический маятник массой  $m$ , совершающий гармонические колебания с амплитудой  $A$ , обладает энергией  $E$ . Определить

частоту колебаний маятника и длину нити. Изменится ли энергия гармонических колебаний, если амплитуду увеличить вдвое, а частоту в два раза уменьшить?

**18.61.** Определить период гармонических колебаний физического маятника, приведенная длина которого равна 1,2 м.



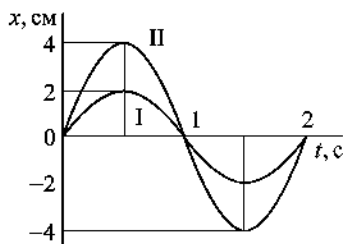
К задаче 18.63

**18.62.** Определить приведенную длину физического маятника, совершающего гармонические колебания с частотой 0,66 Гц.

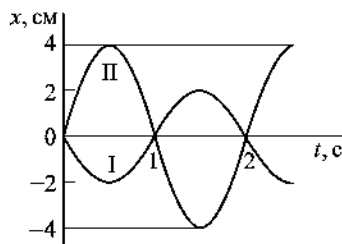
**18.63.** Два шарика малых размеров закреплены на невесомом стержне на расстоянии  $l_1$  и  $l_2$  от точки подвеса  $O$  (см. рисунок). Определить период малых колебаний стержня для случаев *а* и *б*. Масса шариков равна  $m_1$  и  $m_2$ .

**18.64.** Материальная точка одновременно участвует в двух колебательных движениях. По какому правилу (скалярного или векторного сложения) определяется результирующее смещение материальной точки?

**18.65.** По графику зависимости смещения от времени (см. рисунок) записать уравнения гармонических колебаний, налагающихся друг на друга. Записать уравнение результирующего колебания и построить его график.



К задаче 18.65



К задаче 18.66

**18.66.** По графику зависимости смещения от времени (см. рисунок) ответить на вопросы задачи 18.65. Определить разность фаз слагаемых колебаний.

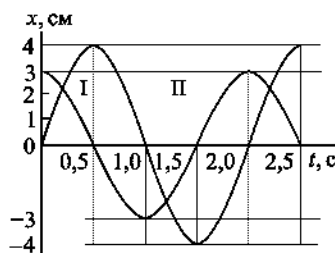
**18.67.** По графику зависимости смещения от времени (см. рисунок) ответить на вопросы задач 18.65 и 18.66.

**18.68.** По графику, изображенному на рисунке, записать уравнения гармонических колебаний с начальной фазой, равной нулю.

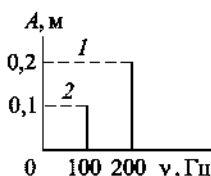
**18.69.** Два гармонических колебания с периодом  $T$  и амплитудами  $A_1$  и  $A_2$  налагаются друг на друга. Определить вид результирующего колебания. Записать его уравнение при колебаниях в одинаковых фазах; в противоположных фазах и при разности фаз  $\pi/2$ .

**18.70.** Чем отличаются автоколебания от вынужденных колебаний?

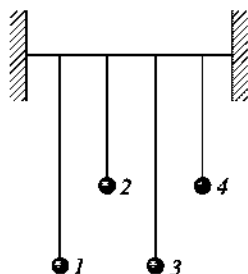
**18.71.** Для каких маятников, изображенных на рисунке, возможен резонанс? Когда быстрее наступает резонанс — при сильном или слабом затухании собственных колебаний?



К задаче 18.67



К задаче 18.68



К задаче 18.71

**18.72.** Почему при резонансе возрастает энергия колебательной системы?

**18.73.** Что необходимо предпринять для прекращения нежелательного резонанса?

**18.74.** Определить скорость движения поезда, при которой амплитуда вертикальных колебаний вагона будет максимальной, если период собственных вертикальных колебаний вагона  $T_0$ , а длина рельса  $l$ .

**18.75.** Грузовик движется по волнистой дороге с расстоянием между буграми  $l$ . При какой скорости движения размах вертикальных колебаний грузовика будет максимальным? Масса грузовика  $m$ , жесткость его рессор равна  $k$ .

## Волны

**18.76.** Определить длину волны, возбуждаемой источником колебаний, расположенным в среде, в которой колебания с периодом  $2,0$  мс распространяются со скоростью  $1450$  м/с.

**18.77.** Определить длину волны, излучаемой источником колебаний с частотой  $100$  Гц, если за  $3$  с волна удалась от источника на расстояние  $1020$  м.

**18.78.** Бегущая волна, частицы в которой колеблются с частотой  $100$  Гц, распространяется со скоростью  $200$  м/с. Определить разность фаз колебаний в точках, расположенных на одном луче на расстоянии  $1,5$  м друг от друга. На каком наименьшем расстоянии вдоль луча находятся точки, колеблющиеся в одинаковых фазах?

**18.79.** Бегущая волна распространяется в среде со скоростью  $400$  м/с. Определить период колебаний точек, удаленных от вибратора на расстояния  $11,0$  и  $12,5$  м, при разности фаз  $0,75\pi$ .

**18.80.** Мимо неподвижного наблюдателя, стоящего на берегу озера, за  $6,0$  с прошло четыре гребня волн. Расстояние между первым и

третьим гребнями равно 12 м. Определить период колебания частиц воды, скорость распространения волн и их длину.

**18.81.** При движении катера по направлению распространения волн волны ударяются о корпус с частотой  $\nu_1 = 1,0$  Гц, а при движении навстречу волнам — с частотой  $\nu_2 = 3,0$  Гц. С какой скоростью движется катер относительно берега, если частицы воды колеблются с частотой  $\nu_0 = 1,0$  Гц, а расстояние между гребнями волн 5,0 м?

**18.82.** Колебания вибратора определяются уравнением  $x = 0,10 \times \sin(0,5\pi t)$ . Записать уравнение плоской волны при скорости распространения колебаний 200 м/с и уравнение колебаний для точки, удаленной от вибратора на расстояние 400 м.

**18.83.** Плоская волна длиной  $l$  и амплитудой  $A$  распространяется в среде со скоростью  $u$ . Определить смещение и скорость колебательного движения частиц среды, расположенных на расстоянии  $l$  от вибратора, через время  $t$  после начала его колебаний. Чему равно перемещение частиц за период?

**18.84.** В плоской волне, распространяющейся в среде со скоростью  $u$ , частицы колеблются с частотой  $\nu$  и максимальной скоростью  $v_{\max}$ . Определить амплитуду колебаний и длину волны. Записать уравнение плоской волны.

**18.85.** Амплитудные значения смещения и скорости плоской волны соответственно равны  $A$  и  $v_{\max}$ . Принимая скорость распространения колебаний в данной среде равной  $u$ , составить уравнения волны смещения и скорости. Определить мгновенные значения смещения и скорости в точке, расположенной на расстоянии  $l = \lambda/4$  от вибратора, через время  $t = (3/4)T$  после начала его колебаний.

**18.86.** Два источника, колеблющихся в одинаковых фазах с частотой 100 Гц, излучают когерентные волны. При каких разностях времен, затрачиваемых на прохождение волн от источников, при наложении волн наблюдается максимальное усиление колебаний? Ослабление колебаний?

**18.87.** Когерентные волны, излучаемые двумя точечными источниками, колеблющимися в одинаковых фазах с периодом 5,0 мс, распространяются со скоростью 200 м/с. При каких разностях волновых путей  $\Delta l$  при наложении волн будет наблюдаться максимальное усиление колебаний? Гашение колебаний?

**18.88.** При наложении когерентных волн, распространяющихся в противоположных фазах, энергия колебаний уменьшается. Не противоречит ли это закону сохранения и превращения энергии?

**18.89.** Определить длину стоячей волны и частоту колебаний вибратора, если расстояние между первым и третьим узлами равно 77,8 см, а скорость распространения колебаний составляет 342 м/с.

**18.90.** Чему равны разность фаз в точках стоячей волны, колеблющихся между соседними узлами? В каких фазах колеблются точки стоячей волны по обе стороны узла (не далее  $\lambda/2$  от него)? Переносят ли стоячие волны фазу и энергию?



**18.91.** Определить длину стоячей волны, если расстояния между соседними точками, колеблющимися с одинаковыми амплитудами, равны 5,0 и 15 см. Точки расположены на одном луче.

**18.92.** В результате интерференции бегущих волн, уравнения которых  $x_1 = A \sin[\omega(t - y/u)]$  и  $x_2 = A \sin[\omega(t + y/u)]$ , образуются стоячие волны (здесь  $x_1$  и  $x_2$  — смещения точек,  $y$  — их координаты,  $u$  — скорость распространения волн). Определить длину стоячей волны и частоту колебаний в ней. Записать уравнение стоячей волны. Определить зависимость амплитуды стоячей волны от координаты. Записать уравнения для координат узлов и пучностей стоячей волны.

### Звук

**18.93.** Человек воспринимает звук частотой от 16 до 20 000 Гц. Определить интервал длин волн, воспринимаемых человеком. Скорость звука в воздухе принять равной 340 м/с.

**18.94.** Как зависит интенсивность (сила) звука от расстояния до точечного источника звука? Как зависит громкость звука от амплитуды?

**18.95.** Одинакова ли чувствительность уха человека к звукам различных частот?

**18.96.** Всегда ли человек воспринимает звуки частотой от 16 до 20 000 Гц?

**18.97.** Какая характеристика звука позволяет назвать его источником?

**18.98.** Как по звуку отличить пчел, летящих из улья за взятком, от возвращающихся с ним пчел?

**18.99.** Наблюдатель, находящийся на расстоянии 4 км от орудия, услышал звук выстрела через 12,0 с после вспышки. Определить скорость звука в воздухе.

**18.100.** Скорость звука в воздухе в зависимости от его температуры можно вычислить по формуле  $u = 332\sqrt{1 + \alpha t}$ , где  $\alpha = \frac{1}{273} \text{ } ^\circ\text{C}^{-1}$  и  $t$  — температура в градусах Цельсия. Определить длину звуковых волн в воздухе, излучаемых источником с частотой колебаний 100 Гц, при температурах воздуха 0, 15, 20  $^\circ\text{C}$ .

**18.101.** Определить длину звуковой волны в воде, если ее длина в воздухе равна 0,797 м. Скорость звука в воздухе 343 м/с, в воде 1483 м/с. Как изменится частота звуковых колебаний при переходе их из воздуха в воду?

**18.102.** С первого корабля на второй одновременно посылаются два звуковых сигнала — по воздуху и в воде. Один из сигналов был принят с опозданием на 2,0 с. Определить расстояние между кораблями, если принять скорость звука в воздухе 340 м/с, а в воде 1480 м/с.

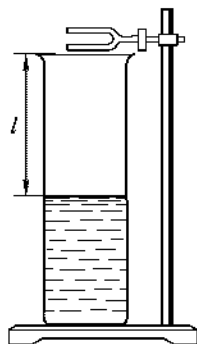
**18.103.** С одного из двух неподвижных кораблей излучается в воду ультразвуковой сигнал, который принимается в воде приемником второго корабля дважды — через время  $t_1$  и  $t_2$  ( $t_2 > t_1$ ), считая от момента

выхода с первого корабля. Принимая скорость звука в воде равной  $u$  и дно горизонтальным, определить глубину моря.

**18.104.** Чему равна скорость звука  $u$  при ветре, дующем со скоростью  $v$  ( $v < u$ ) вдоль прямой, соединяющей наблюдателя и источник звука, для наблюдателя, неподвижного относительно воздуха? Земли?

**18.105.** Звуковое ощущение сохраняется у человека примерно 0,1 с. На каком расстоянии должен находиться человек от преграды, чтобы слышать раздельно основной и отраженный от преграды звук? Температура воздуха  $16^\circ\text{C}$ , скорость звука  $340\text{ м/с}$ .

**18.106.** Ветер дует по направлению от наблюдателя к преграде со скоростью  $v$ . Скорость звука в воздухе  $u$  ( $u > v$ ). На каком наименьшем расстоянии от преграды должен находиться наблюдатель, чтобы слышать эхо собственного голоса?



К задаче 18.107

**18.107.** При какой длине  $l$  воздушного столба (см. рисунок) амплитуда звуковых колебаний с длиной волны  $\lambda$  и громкость звука на выходе из сосуда будут максимальными?

**18.108.** Определить минимальную длину воздушного столба в сосуде (см. рисунок к задаче 18.107), резонирующего с колебаниями камертона, частота которого  $440\text{ Гц}$ . Скорость звука в воздухе принять равной  $334\text{ м/с}$ .

**18.109.** При исследовании ультразвуковым дефектоскопом, работающим на частоте  $10\text{ МГц}$ , алюминиевой детали первый отраженный сигнал был получен через  $1,2 \cdot 10^{-5}\text{ с}$ , а второй — через  $4,0 \cdot 10^{-5}\text{ с}$ . На какой глубине обнаружен дефект? Какова толщина детали? На какой длине волны работает дефектоскоп? Скорость звука в алюминии  $5,1\text{ км/с}$ .

**18.110.** Какие волны относятся к инфразвуковым и какие из них наиболее опасны для человека? Каковы источники инфразвука в природе?

**18.111.** Как зависит скорость звука в среде от скорости движения вибратора?

**18.112.** Источник звука, движущийся со скоростью  $17\text{ м/с}$ , дает сигнал продолжительностью  $2,0\text{ с}$ . Какой продолжительности сигнал воспринимает неподвижный наблюдатель, если источник приближается к наблюдателю? удаляется от него? Сколько времени слышит сигнал наблюдатель, движущийся вместе с источником? Скорость звука в воздухе принять равной  $340\text{ м/с}$ .

**18.113.** Источник, излучающий звук частотой  $600\text{ Гц}$ , движется со скоростью  $40\text{ м/с}$  мимо неподвижного наблюдателя. На сколько отличаются частоты звука, воспринимаемые наблюдателем при приближении и удалении источника? Температура воздуха  $17^\circ\text{C}$ .

**18.114.** Два поезда движутся навстречу друг другу, имея скорости  $72$  и  $54\text{ км/ч}$ . Первый поезд дает сигнал частотой  $0,6\text{ кГц}$ . Найти часто-

ту звуковых колебаний, воспринимаемых пассажиром второго поезда до встречи и после встречи поездов. Скорость звука принять равной 340 м/с.

## § 19. Переменный электрический ток

**Пример 74.** В рамке, содержащей 100 витков проволоки и равномерно вращающейся в однородном магнитном поле, поток магнитной индукции изменяется по закону  $\Phi = 2,0 \cdot 10^{-3} \cos(314t)$ . Определить зависимость от времени возникающей в рамке ЭДС, максимальное и эффективное ее значения и мгновенное значение для момента времени 5,0 мс. Как изменится зависимость ЭДС от времени при увеличении угловой скорости вращения рамки в два раза?

*Дано:*  $N = 100$  — число витков в рамке;  $\Phi = 2,0 \cdot 10^{-3} \cos(314t)$  — зависимость магнитного потока в рамке от времени;  $t = 5,0 \text{ мс} = 5,0 \times 10^{-3} \text{ с}$  — момент времени, для которого определяется мгновенное значение ЭДС.

*Найти:*  $e(t)$  — зависимость возникающей в рамке ЭДС от времени;  $\mathcal{E}_0$  и  $\mathcal{E}_{\text{эф}}$  — максимальное и эффективное значения ЭДС;  $e$  — мгновенное значение ЭДС для  $t = 5,0 \text{ мс}$ ,  $e'(t)$  — зависимость ЭДС от времени при увеличении угловой скорости вращения рамки в два раза.

Решение. ЭДС, возникающая в каждом витке, равна первой производной от магнитного потока по времени, взятой со знаком минус, т.е.  $e = -\dot{\Phi}_t$ ; при  $N$  витках  $e = -N\dot{\Phi}_t$ . Так как  $\Phi = \Phi_0 \cos(\omega t)$ , то зависимость ЭДС от времени будет иметь вид

$$e = N\omega\Phi_0 \sin(\omega t) = \mathcal{E}_0 \sin(\omega t) = 100 \cdot 314 \cdot 2,0 \cdot 10^{-3} \sin(314t) = 62,8 \sin(314t).$$

Максимальное значение ЭДС:

$$\mathcal{E}_0 = N\omega\Phi_0 = 100 \cdot 314 \cdot 2,0 \cdot 10^{-3} = 62,8 \text{ В}.$$

Эффективное (действующее) значение ЭДС:

$$\mathcal{E}_{\text{эф}} = \frac{\mathcal{E}_0}{\sqrt{2}} = \frac{62,8}{\sqrt{2}} \text{ В} = 44,5 \text{ В}.$$

Мгновенное значение ЭДС найдем, подставив в уравнение  $e = \mathcal{E}_0 \sin(\omega t)$  соответствующее значение  $t$ . Вычислим мгновенную ЭДС для  $t = 5,0 \text{ мс}$ :

$$e = 62,8 \sin(314 \cdot 0,005) \text{ В} \cdot \text{с}^{-1} \cdot \text{с} = 62,8 \text{ В}.$$

Из формулы  $e = N\omega\Phi_0 \sin(\omega t)$  видно, что при увеличении  $\omega$  в два раза максимальное значение ЭДС и циклическая частота изменения ЭДС возрастают в два раза. Следовательно,

$$e' = N \cdot 2\omega\Phi_0 \sin(2\omega t),$$

где  $\omega$  — первоначальное значение угловой скорости вращения рамки. Находим зависимость  $e(t)$  при увеличении угловой скорости в два раза:

$$e' = 2N\omega\Phi_0 \sin(2\omega t) = 2 \cdot 62,8 \sin(2 \cdot 314t) = 125,6 \sin(628t).$$

Ответ:  $e(t) = 62,8 \sin(314t)$ ;  $\mathcal{E}_0 = 62,8$  В;  $\mathcal{E}_{\text{эф}} = 44,5$  В;  $e = 62,8$  В;  $e' = 125,6 \sin(628t)$ .

**Пример 75.** Сколько пар магнитных полюсов имеет ротор гидрогенератора, вырабатывающего переменный ток стандартной частоты? Частота вращения ротора равна  $120 \text{ мин}^{-1}$ .

Дано:  $n = 120 \text{ мин}^{-1}$  — частота ротора;  $\nu = 50$  Гц — стандартная частота переменного тока.

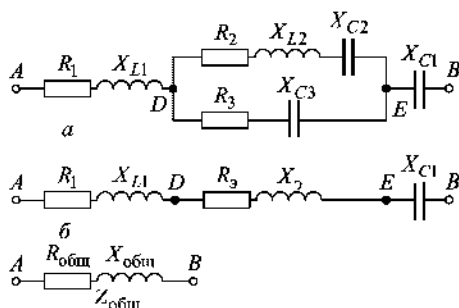
Найти:  $p$  — число пар магнитных полюсов.

Решение. Частота переменного тока связана с частотой вращения ротора генератора  $\nu_{\text{мех}}$  зависимостью  $\nu = p\nu_{\text{мех}}$ . Выражая частоту вращения ротора генератора в секундах в минус первой степени, получаем

$$\nu = p \frac{n}{60}; \quad p = \frac{60\nu}{n} = \frac{60 \cdot 50}{120} \frac{\text{Гц}}{\text{с}^{-1}} = 25.$$

Ответ:  $p = 25$ .

**Пример 76.** В сеть переменного тока напряжением  $U_{AB} = 220$  В включена цепь (см. рисунок), сопротивления элементов которой равны  $R_1 = 4$  Ом,  $X_{L1} = 7,0$  Ом,  $X_{C1} = 3,0$  Ом,  $R_2 = 3,0$  Ом,  $X_{L2} = 6,0$  Ом,  $X_{C2} = 2,0$  Ом,  $R_3 = 1,0$  Ом,  $X_{C3} = 2,0$  Ом.



К примеру 76

Определить силу тока в неразветвленной цепи и в параллельных ветвях; сдвиг фаз между током и напряжением в цепи; полную, активную и реактивную мощности цепи.

Дано:  $U_{AB} = 220$  В — напряжение в цепи;  $R_1 = 4,0$  Ом — активное сопротивление;  $X_{L1} = 7,0$  Ом и  $X_{C1} = 3,0$  Ом — индуктивное и емкостное сопротивления неразветвленной части цепи;  $R_2 = 3,0$  Ом,  $X_{L2} = 6,0$  Ом и  $X_{C2} = 2,0$  Ом — сопротивления одной ветви;  $R_3 = 1,0$  Ом и  $X_{C3} = 7,0$  Ом — сопротивления другой ветви.

Найти:  $I_{\text{общ}} = I_1$  — силу тока в неразветвленной части цепи;  $I_2$  и  $I_3$  — силу тока в параллельных ветвях;  $S$ ,  $P$  и  $Q$  — полную, активную

и реактивную мощности цепи;  $\varphi$  — сдвиг фаз между током и напряжением.

Решение. Определим полные сопротивления ветвей  $Z_2$  и  $Z_3$ :

$$Z_2 = \sqrt{R_2^2 + (X_{L2} - X_{C2})^2} = \sqrt{3,0^2 + (6,0 - 2,0)^2} = 5,0 \text{ [Ом];}$$

$$Z_3 = \sqrt{R_3^2 + X_{C3}^2} = \sqrt{1,0^2 + 2,0^2} = 2,236 \text{ [Ом]} \approx 2,24 \text{ Ом.}$$

Найдем активные  $g$  и реактивные  $b$  проводимости ветвей:

$$g_2 = \frac{R_2}{Z_2^2} = \frac{3,0}{25} \frac{\text{Ом}}{\text{Ом}^2} = 0,12 \text{ См,}$$

$$g_3 = \frac{R_3}{Z_3^2} = \frac{1,0}{5,0} \frac{\text{Ом}}{\text{Ом}^2} = 0,20 \text{ См,}$$

$$b_2 = \frac{X_{L2} - X_{C2}}{Z_2^2} = \frac{6,0 - 2,0}{25} \frac{\text{Ом}}{\text{Ом}^2} = 0,16 \text{ См,}$$

$$b_3 = \frac{X_{C3}}{Z_3^2} = \frac{-2,0}{5,0} \frac{\text{Ом}}{\text{Ом}^2} = -0,40 \text{ См}^*).$$

Найдем эквивалентные активную  $g_3$ , реактивную  $b_3$  и полную  $y_3$  проводимости разветвления:

$$g_3 = g_2 + g_3 = 0,12 \text{ См} + 0,20 \text{ См} = 0,32 \text{ См,}$$

$$b_3 = b_2 + b_3 = 0,16 \text{ См} - 0,40 \text{ См} = -0,24 \text{ См,}$$

$$y_3 = \sqrt{g_3^2 + b_3^2} = \sqrt{(0,32 \text{ См})^2 + (-0,24 \text{ См})^2} = 0,40 \text{ См.}$$

Вычислим полное эквивалентное сопротивление разветвления:

$$Z_3 = \frac{1}{y_3} = \frac{1}{0,40 \text{ См}} = 2,5 \text{ Ом.}$$

Найдем эквивалентные активное  $R_3$ , и реактивное  $X_3$  сопротивления разветвления:

$$R_3 = g_3 Z_3^2 = 0,32 \cdot 2,5^2 \text{ См} \cdot \text{Ом}^2 = 2,0 \text{ Ом.}$$

$$X_3 = b_3 Z_3^2 = -0,24 \cdot 2,5^2 \text{ См} \cdot \text{Ом}^2 = -1,5 \text{ Ом}^*).$$

Вычислим для всей цепи активное  $R_{\text{общ}}$ , реактивное  $X_{\text{общ}}$  и полное  $Z_{\text{общ}}$  сопротивления:

$$R_{\text{общ}} = R_1 + R_3 = 4,0 \text{ Ом} + 2,0 \text{ Ом} = 6,0 \text{ Ом,}$$

$$X_{\text{общ}} = X_{L1} + X_{C1} + X_3 = 7,0 \text{ Ом} - 3,0 \text{ Ом} - 1,5 \text{ Ом} = 2,5 \text{ Ом,}$$

$$Z_{\text{общ}} = \sqrt{R_{\text{общ}}^2 + X_{\text{общ}}^2} = \sqrt{(6,0 \text{ Ом})^2 + (2,5 \text{ Ом})^2} = 6,5 \text{ Ом.}$$

\*) Знак минус означает, что преобладает емкостное сопротивление (проводимость).

Сдвиг фаз между током и напряжением в неразветвленной части цепи:

$$\cos \varphi = \frac{R_{\text{общ}}}{Z_{\text{общ}}} = \frac{6,0 \text{ Ом}}{6,5 \text{ Ом}} = 0,923; \quad \varphi = \arccos 0,923 = 22,6^\circ;$$

$$\sin \varphi = \frac{X_{\text{общ}}}{Z_{\text{общ}}} = \frac{2,5 \text{ Ом}}{6,5 \text{ Ом}} \approx 0,385.$$

Силу тока в неразветвленной части цепи определим из закона Ома:

$$I_{\text{общ}} = \frac{U_{AB}}{Z_{\text{общ}}} = \frac{220 \text{ В}}{6,5 \text{ Ом}} \approx 34 \text{ А}.$$

Определим напряжение на разветвлении:

$$U_{DE} = I_{\text{общ}} \cdot Z_3 = 34 \cdot 2,5 \text{ А} \cdot \text{Ом} \approx 85 \text{ В}.$$

Сила тока в ветвях определится:

$$I_2 = \frac{U_{DE}}{Z_2} = \frac{85 \text{ В}}{5 \text{ Ом}} \approx 17 \text{ А};$$

$$I_3 = \frac{U_{DE}}{Z_3} = \frac{85 \text{ В}}{2,24 \text{ Ом}} \approx 38 \text{ А}.$$

Найдем полную  $S$ , активную  $P$  и реактивную  $Q$  мощности:

$$S = U_{AB} I_{\text{общ}} = 220 \text{ В} \cdot 34 \text{ А} \approx 7,48 \text{ кВ} \cdot \text{А};$$

$$P = S \cos \varphi = I_{\text{общ}}^2 R_{\text{общ}} = 7,48 \text{ кВ} \cdot \text{А} \cdot 0,923 \approx 6,90 \text{ кВт};$$

$$Q = S \sin \varphi = I_{\text{общ}}^2 X_{\text{общ}} = 7,48 \text{ кВ} \cdot \text{А} \cdot 0,385 \approx 2,88 \text{ квар}.$$

Ответ:  $I_{\text{общ}} \approx 34 \text{ А}$ ;  $I_2 \approx 17 \text{ А}$ ;  $I_3 \approx 38 \text{ А}$ ;  $S \approx 7,48 \text{ кВ} \cdot \text{А}$ ;  $P \approx 6,9 \text{ кВт}$ ;  $Q \approx 2,88 \text{ квар}$ ;  $\varphi \approx 22,6^\circ$ .

### Зависимость ЭДС индукции от времени.

#### Максимальное и действующее значения ЭДС и силы тока

##### 19.1. Какой ток называется переменным?

19.2. Всегда ли при равномерном вращении рамки в магнитном поле в ней возникает синусоидальная ЭДС? при вращении рамки в однородном магнитном поле?

19.3. Что представляет собой переменный ток в цепи с рамкой, равномерно вращающейся в однородном магнитном поле?

19.4. В рамке, равномерно вращающейся в однородном магнитном поле, возникает синусоидальная ЭДС с начальной фазой, равной нулю. Определить мгновенное значение ЭДС при повороте рамки на  $60^\circ$ , если при повороте рамки на  $30^\circ$  мгновенное значение ЭДС равно  $89,8 \text{ В}$ . Записать уравнение для определения мгновенного значения ЭДС как функции от фазы и определить ее действующее значение.

19.5. Проволочная прямоугольная рамка из 100 витков вращается со скоростью 120 об/мин в однородном магнитном поле с индукцией  $0,25 \text{ Тл}$ . Ось вращения перпендикулярна вектору магнитной индукции.

Длина стороны рамки, параллельной оси вращения, равна 20,0 см, а ее расстояние от оси — 5,0 см. Определить зависимость возникающей в рамке ЭДС от времени и ее максимальное значение. Что покажет вольтметр, подключенный к контактам рамки, при разомкнутой внешней цепи? В начальный момент плоскость рамки перпендикулярна вектору индукции.

**19.6.** Напряжение синусоидального переменного тока изменяется с частотой 50 Гц при действующем значении 220 В. Определить мгновенные значения напряжения для моментов времени 5,0; 10 и 12,5 мс. Начальная фаза равна нулю.

**19.7.** Проволочная рамка из  $N$  витков площадью  $S$  равномерно вращается в однородном магнитном поле с индукцией  $B$ , так что действующее значение ЭДС в рамке равно  $\mathcal{E}$ . Записать уравнение для мгновенного значения ЭДС как функции от времени. Определить среднее значение ЭДС за период. Начальная фаза равна нулю.

**19.8.** Квадратная рамка из нескольких витков тонкого медного провода со стороной  $l$  равномерно вращается в однородном магнитном поле с индукцией  $B$ . Ось рамки проходит через середины противоположных сторон перпендикулярно вектору магнитной индукции. Период вращения рамки  $T$ ; вольтметр, подключенный к ее концам, показывает напряжение  $U$ . Зная диаметр провода  $d$  и плотность меди  $\rho$ , определить массу провода.

**19.9.** В рамке, равномерно вращающейся в однородном магнитном поле, поток магнитной индукции изменяется по закону  $\Phi = 2,0 \times 10^{-2} \cos(314t)$ . Найти зависимость ЭДС индукции, возникающей в рамке, от времени. Определить максимальное и действующее значения ЭДС. Определить мгновенное значение ЭДС для момента времени 1,67 мкс.

**19.10.** Определить число витков в проволочной рамке, равномерно вращающейся в однородном магнитном поле, магнитный поток которого определяется уравнением  $\Phi = 4,0 \cdot 10^{-4} \cos(628t)$ , а действующее значение ЭДС равно 17,76 В. Найти зависимость ЭДС индукции в рамке от времени.

**19.11.** Неоновая лампа включена в цепь переменного тока напряжением 220 В и частотой 50 Гц. Напряжение зажигания лампы 145,5 В. Определить продолжительность вспышек неоновой лампы и время между ними, если напряжения гашения и зажигания лампы одинаковы.

**19.12.** Почему для получения переменного тока (особенно в мощных генераторах) вращается индуктор, а якорь остается неподвижным?

**19.13.** На какое напряжение нужно рассчитывать линии электропередачи, если действующее напряжение в линии 500 кВ?

**19.14.** Можно ли конденсатор, рассчитанный на максимальное напряжение 280 В, включать в сеть напряжением 220 В?

**19.15.** Изменение силы тока в цепи описывается уравнением  $i = 8,5 \cdot \sin(314t + 0,651)$ . Определить амплитудное значение силы то-

ка, начальную фазу и частоту колебаний. Найти силу тока в моменты времени  $t_1 = 0,080$  с и  $t_2 = 0,042$  с. Что покажет амперметр, включенный в эту цепь?

**19.16.** Всегда ли частота переменного тока равна частоте вращения рамки в магнитном поле?

**19.17.** Сколько пар магнитных полюсов имеет ротор гидрогенератора, совершающий 125 об/мин, если генератор вырабатывает переменное напряжение стандартной частоты?

**19.18.** Ротор четырехполюсного генератора совершает 1500 об/мин. Записать уравнение зависимости ЭДС от времени, если действующее значение ЭДС генератора 220 В.

**19.19.** По условию задачи 19.5 определить зависимость ЭДС от времени и ее действующее значение для двух пар магнитных полюсов, расположенных взаимно перпендикулярно. Каждая пара магнитных полюсов создает магнитное поле с индукцией 0,25 Тл.

**19.20.** Какие превращения энергии происходят в цепи переменного синусоидального тока на участках с активным, индуктивным и емкостным сопротивлением? Почему индуктивное и емкостное сопротивления называются реактивными?

**19.21.** Сила тока в цепи описывается уравнением  $i = 4,0 \sin(314t)$ . Определить количество теплоты, выделяющейся на активном сопротивлении 10 Ом за 20,0 с; максимальную мощность, выделяющуюся на нем.

**19.22.** По условию задачи 19.21 определить действующее значение напряжения. Записать уравнение для мгновенного значения напряжения. Какова разность фаз между током и напряжением на резисторе?

**19.23.** Сила тока определяется уравнением  $i = 0,564 \sin(12,56t)$ . Какое количество теплоты выделится в проводнике с активным сопротивлением 15 Ом за время, равное 10 периодам?

**19.24.** Проводящая катушка с сердечником из ферромагнетика поочередно включается в цепь постоянного и переменного тока с одинаковым напряжением. Одинакова ли сила тока в катушке в обоих случаях? Изменится ли сила тока после удаления сердечника?

**19.25.** Катушка с индуктивностью 20 мГн включается в цепь переменного тока частотой 50 Гц. Определить индуктивное сопротивление катушки. Построить график зависимости индуктивного сопротивления катушки от частоты.

**19.26.** Катушка с индуктивностью 0,020 Гн присоединена к источнику переменного напряжения частотой 50 Гц. Действующее значение напряжения равно 100 В. Записать зависимость мгновенного значения силы тока и напряжения от времени. Определить сдвиг фаз между током и напряжением. Построить векторную диаграмму. Активным сопротивлением катушки пренебречь.

**19.27.** В катушке индуктивности без сердечника 500 витков изолированного провода сила тока определяется уравнением  $i = 0,01 \times \sin(628t)$ . Длина катушки 20 см, поперечное сечение  $4,0 \text{ см}^2$ . Опре-



делить зависимость напряжения на катушке от времени. Активным сопротивлением проводника пренебречь.

**19.28.** Катушка содержит 250 витков медного провода с тонкой изоляцией и поперечным сечением  $0,50 \text{ мм}^2$ . Длина катушки 40 см, а ее диаметр 5,0 см. При какой частоте переменного тока полное сопротивление катушки в два раза больше ее активного сопротивления?

**19.29.** В катушке индуктивности изменение силы тока определяется уравнением  $i = I_{\text{макс}} \cdot \sin(2\pi\nu t)$ . Определить максимальное напряжение на катушке, сдвиг фаз между током и напряжением и зависимость напряжения от времени, если максимальная энергия магнитного поля катушки равно  $W_{\text{макс}}$ . Активным сопротивлением катушки пренебречь.

**19.30.** Конденсатор емкостью 150 мкФ включен в цепь переменного тока с частотой 50 Гц. Каким будет его сопротивление? Как оно изменится при увеличении частоты в четыре раза?

**19.31.** Конденсатор емкостью 100 мкФ в сети переменного тока имеет сопротивление 31,8 Ом. Как и на сколько изменится его сопротивление при увеличении частоты на 150 Гц?

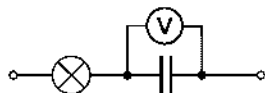
**19.32.** Конденсатор емкостью 2,0 мкФ, рассчитанный на напряжение 500 В, включается в сеть переменного тока, описываемого уравнением  $i = 0,20 \sin(314t)$ . Определить реактивную мощность конденсатора. Во сколько раз расчетное напряжение больше максимального напряжения на конденсаторе?

**19.33.** На плоском слюдяном конденсаторе с площадью пластин  $40,0 \text{ см}^2$  и толщиной диэлектрика 0,12 см напряжение изменяется по закону  $u = 300 \sin(314t - \pi/2)$ . Определить сдвиг фаз между током и напряжением на конденсаторе. Записать уравнения для мгновенного значения силы тока через конденсатор и заряда на нем. Диэлектрическая проницаемость слюды равна 7.

**19.34.** Сила тока в цепи конденсатора определяется уравнением  $i = 0,10 \sin(100t)$ . Определить зависимость напряжения от времени и реактивную мощность конденсатора, если максимальная энергия электрического поля в нем 0,10 Дж.

**19.35.** Напряжение и сила тока в катушке индуктивности определяются уравнениями  $u = 60 \sin(314t + 0,25)$  и  $i = 15 \sin(314t)$ . Определить разность фаз между током и напряжением; полное сопротивление катушки; коэффициент мощности; активное сопротивление катушки; ее индуктивное сопротивление; полную и активную мощности.

**19.36.** В сеть переменного тока частотой 50 Гц и напряжением 220 В последовательно включены электрическая лампа сопротивлением 48,4 Ом и конденсатор емкостью 50,0 мкФ (см. рисунок). Определить: полное сопротивление цепи; коэффициент мощности; сдвиг фаз между током и напряжением; силу тока в цепи; напряжение на лампе и конденсаторе; полную мощность цепи; активную мощность, потреб-

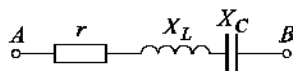


К задаче 19.36

ляемую лампой; реактивную мощность конденсатора. Построить векторную диаграмму напряжений.

**19.37.** По условию задачи 19.36 определить, на сколько изменится показание вольтметра, присоединенного к конденсатору, при уменьшении частоты переменного тока и емкости конденсатора в два раза?

**19.38.** В неразветвленной цепи переменного тока (см. рисунок)  $r = 4,0 \text{ Ом}$ ,  $X_L = 5,0 \text{ Ом}$ ,  $X_C = 2,0 \text{ Ом}$ . Вольтметр,



К задаче 19.38

подключенный к конденсатору, показывает 20 В. Определить полное сопротивление цепи;

коэффициент мощности; сдвиг фаз между током и напряжением; силу тока в цепи; полное напряжение в цепи; полную, активную и реактивную мощности. Построить векторную диаграмму для напряжений.

**19.39.** В неразветвленной цепи переменного тока (см. рисунок к задаче 19.38) на активном участке цепи с сопротивлением 12 Ом падение напряжения равно 30 В. На индуктивном и емкостном сопротивлениях напряжения соответственно 50 и 10 В. Определить полное напряжение в цепи, силу тока, коэффициент мощности, сдвиг фаз между током и напряжением, полное сопротивление, полную мощность, активную мощность. Построить векторную диаграмму напряжений.

**19.40.** Можно ли уменьшить сопротивление цепи переменного тока (см. рисунок к задаче 19.38), увеличивая  $X_L$  или  $X_C$ ?

**19.41.** Может ли при последовательном соединении активного, индуктивного и емкостного сопротивлений напряжение в цепи быть меньше напряжения на индуктивном и емкостном сопротивлениях? на активном сопротивлении?

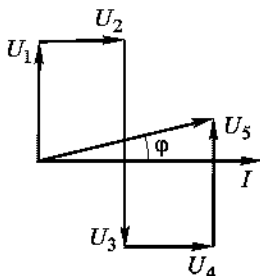
**19.42.** В сеть переменного тока частотой 50 Гц и напряжением 220 В последовательно включены резистор сопротивлением 12 Ом, катушка индуктивностью 64 мГн и конденсатор емкостью 88,5 мкФ. Определить силу тока в цепи; напряжения на емкостном и индуктивном сопротивлениях; полную, активную и реактивную мощности тока.

**19.43.** При какой частоте переменного тока в задаче 19.42 сила тока в цепи становится максимальной? Чему равны при этом напряжения на емкостном и индуктивном сопротивлениях, полная и активная мощности? Как называется это явление? Построить векторную диаграмму напряжений.

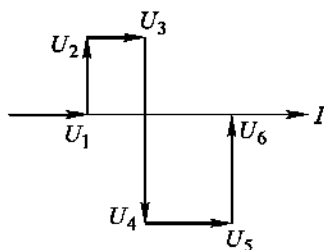
**19.44.** Как следует изменить емкость конденсатора в задаче 19.42, чтобы в цепи возник резонанс напряжений? На какое напряжение должен быть рассчитан конденсатор, чтобы не было пробоя? Чему равна мощность, выделяемая во всей цепи? на активном сопротивлении? Каков коэффициент мощности? Чем может быть опасен резонанс напряжений?

**19.45.** Для неразветвленной цепи переменного тока дана векторная диаграмма (см. рисунок). Начертить схему цепи. Определить полное напряжение цепи и коэффициент мощности.

**19.46.** По векторной диаграмме для неразветвленной цепи (см. рисунок) начертить схему цепи. Определить напряжение в цепи, полное сопротивление, коэффициент мощности, потребляемую мощность. Напряжения на участках цепи равны:  $U_1 = 6,0 \text{ В}$ ,  $U_2 = 5,0 \text{ В}$ ,  $U_3 = 4,0 \text{ В}$ ,



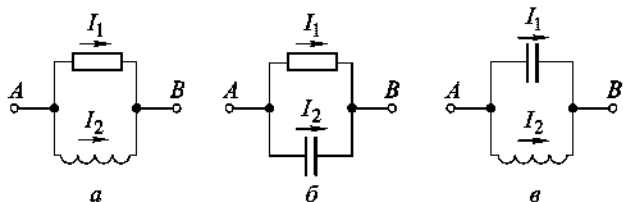
К задаче 19.45



К задаче 19.46

$U_4 = 15 \text{ В}$ ,  $U_5 = 10,0 \text{ В}$ ,  $U_6 = 10,0 \text{ В}$ . Сопротивление первого участка равно  $1,5 \text{ Ом}$ . Какому явлению в цепи переменного тока соответствует векторная диаграмма?

**19.47.** По схемам, изображенным на рисунке, определить силу тока в неразветвленной части цепи, если  $I_1 = 4 \text{ А}$ ,  $I_2 = 3 \text{ А}$ . Построить векторные диаграммы.

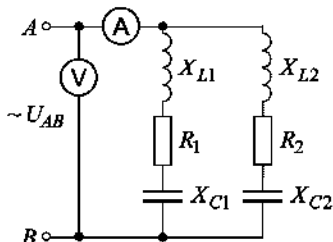


К задаче 19.47

**19.48.** По схемам, изображенным на рисунке к задаче 19.47, определить силу тока в неразветвленной части цепи при  $R = X_L = X_C = 10 \text{ Ом}$  и напряжении  $U_{AB} = 100 \text{ В}$ . Построить векторные диаграммы.

**19.49.** Возможен ли резонанс токов в схемах, изображенных на рисунках а и б к задаче 19.47? При какой частоте переменного тока возникает резонанс токов в схеме, изображенной на рисунке в к задаче 19.47, если индуктивность равна  $20 \text{ мГн}$ , а емкость конденсатора  $15 \text{ мкФ}$ ?

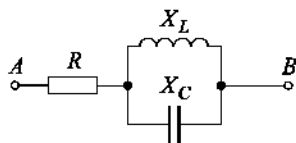
**19.50.** В разветвленной цепи переменного тока (см. рисунок) сопротивления участков равны  $X_{L1} = 5,0 \text{ Ом}$ ,



К задаче 19.50

$X_{C1} = 2,0 \text{ Ом}$ ,  $R_1 = 4,0 \text{ Ом}$ ,  $X_{L2} = 2,0 \text{ Ом}$ ,  $X_{C2} = 10,0 \text{ Ом}$ ,  $R_2 = 3,0 \text{ Ом}$ . Напряжение в цепи  $U_{AB} = 100 \text{ В}$ . Определить силы тока в ветвях и в

неразветвленной части цепи, потребляемую полную и активную мощности.

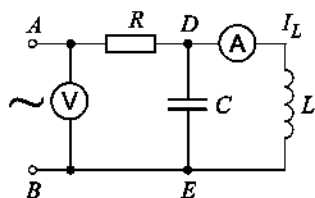


К задаче 19.51

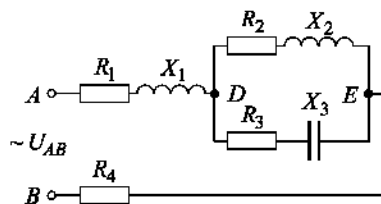
**19.51.** Определить силу тока в неразветвленной части цепи переменного тока (см. рисунок) частотой  $50 \text{ Гц}$  по следующим данным:  $R = 10 \text{ Ом}$ ,  $L = 101,3 \text{ мГн}$ ,  $C = 100 \text{ мкФ}$ ,  $U_{AB} = 100 \text{ В}$ . Чему равна сила тока в ветвях? Как изменится сила тока

в неразветвленной части цепи при изменении частоты?

**19.52.** В цепи, изображенной на рисунке, емкость  $C = 106 \text{ мкФ}$ , индуктивность  $L = 159 \text{ мГн}$  и сопротивление  $R = 56 \text{ Ом}$ . Активное сопротивление катушки ничтожно мало. Частота переменного тока в сети  $50 \text{ Гц}$ . Определить напряжение в сети  $U_{AB}$ , если амперметр показывает  $2,4 \text{ А}$ . Построить векторную диаграмму.



К задаче 19.52



К задаче 19.53

**19.53.** В сеть переменного тока напряжением  $U_{AB} = 220 \text{ В}$  включена цепь (см. рисунок) с сопротивлениями:  $R_1 = 10 \text{ Ом}$ ,  $R_4 = 6 \text{ Ом}$ ,  $X_1 = 17 \text{ Ом}$ ,  $R_2 = 8 \text{ Ом}$ ,  $X_2 = 6 \text{ Ом}$ ,  $R_3 = 3 \text{ Ом}$ ,  $X_3 = 4 \text{ Ом}$ . Определить: полные сопротивления ветвей и всей цепи; силу тока в параллельных ветвях и в неразветвленной части цепи; напряжение на разветвлении  $DE$ ; сдвиг фаз между током и напряжением; полную, активную и реактивную мощности тока.

**19.54.** В цепь переменного тока последовательно включены лампы накаливания, катушка индуктивности и конденсатор переменной емкости. Определить, как будет изменяться накал лампы при уменьшении емкости конденсатора, если в начальный момент его сопротивление было меньше сопротивления катушки ( $X_C < X_L$ ). Действующее напряжение и частота переменного тока не меняются.

## Трансформатор

**19.55.** При работе холостую трансформатор получает из сети небольшую энергию. На что она расходуется? Каков сдвиг фаз в первичной цепи при холостом ходе трансформатора, если не учитывать активное сопротивление?

**19.56.** Что произойдет, если трансформатор, рассчитанный на напряжение переменного тока 127 В, включить в цепь постоянного тока того же напряжения? Почему КПД у трансформатора значительно выше, чем у электродвигателя?

**19.57.** Повышающий трансформатор работает от сети напряжением 120 В. Число витков в первичной обмотке равно 90. Определить коэффициент трансформации  $k$  и число витков во вторичной обмотке, если при холостом ходе трансформатора напряжение на зажимах вторичной обмотки равно 3000 В.

**19.58.** Для определения числа витков в первичной и вторичной обмотках трансформатора поверх вторичной обмотки навили 80 витков провода, и после включения первичной обмотки в цепь напряжением 220 В вольтметр показал напряжение на концах измерительной обмотки 20 В, а на концах вторичной — 36 В. Определить число витков в первичной и вторичной обмотках и коэффициент трансформации.

**19.59.** Если на первичную обмотку трансформатора подается напряжение 220 В, то на вторичной при холостом ходе возникает напряжение 130 В. Определить число витков во вторичной обмотке, если в первичной их 400 и поток рассеяния составляет 3,8%.

**19.60.** Какая обмотка трансформатора — первичная или вторичная — имеет большую площадь поперечного сечения провода, если коэффициент трансформации равен 20? Почему?

**19.61.** Как изменится накал лампы, включенной в первичную обмотку трансформатора, при увеличении нагрузки во вторичной цепи? Проверьте на опыте. Объясните, используя закон сохранения энергии.

**19.62.** Сила тока в первичной обмотке трансформатора равна 4,8 А, напряжение на ее зажимах составляет 127 В. При напряжении на зажимах вторичной обмотки 220 В сила тока в ней 2,5 А. Определить КПД трансформатора при коэффициенте мощности, равном единице.

**19.63.** Первичная обмотка понижающего трансформатора, включенного в цепь переменного тока напряжением 220 В, имеет 1500 витков. Определить число витков во вторичной обмотке, если она питает цепь напряжением 6,3 В при силе тока 0,50 А. Нагрузка активная. Сопротивление вторичной обмотки равно 0,20 Ом. Сопротивлением первичной обмотки пренебречь.

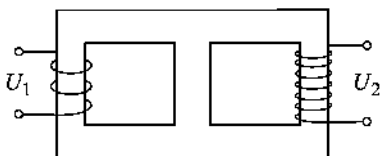
**19.64.** На первичную обмотку трансформатора подается напряжение 3,5 кВ. Его вторичная обмотка соединена проводами с потребителем, у которого напряжение равно 220 В, а потребляемая мощность 25 кВт при коэффициенте мощности, равном единице. Определить сопротивление подводящих проводов, если коэффициент трансформации равен 15. Какова сила тока в первичной обмотке трансформатора? Сопротивлением вторичной обмотки пренебречь.

**19.65.** В повышающем трансформаторе с коэффициентом трансформации 0,50 напряжение на нагрузке, включенной в цепь вторичной обмотки, равно 216 В. Нагрузка сопротивлением 10,8 Ом чисто активная. Определить напряжение в первичной обмотке, силу тока в ней

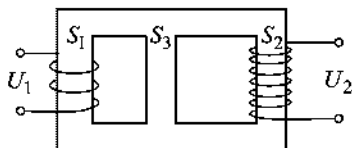
и КПД трансформатора. Сопротивление вторичной обмотки  $0,2 \text{ Ом}$ . Сопротивление подводящих проводов мало.

**19.66.** В первичной обмотке трансформатора, включенной в сеть напряжением  $380 \text{ В}$ , содержится  $1320$  витков. Во вторичную цепь включена активная нагрузка, потребляющая мощность  $360 \text{ Вт}$ . Принимая сопротивление нагрузки равным  $3,6 \text{ Ом}$ , а вторичной обмотки —  $0,20 \text{ Ом}$ , определить ЭДС индукции во вторичной обмотке; число витков в ней; силу тока в первичной обмотке; КПД трансформатора. Коэффициент мощности считать равным единице.

**19.67.** В трансформаторе с сердечником, поперечное сечение которого везде одинаково (см. рисунок), на первичную обмотку, содержащую  $100$  витков, подано напряжение  $200 \text{ В}$ . Каково напряжение на вторичной обмотке, имеющей  $200$  витков? Рассеяние магнитного потока не учитывать.



К задаче 19.67



К задаче 19.68

**19.68.** В трансформаторе с сердечником (см. рисунок) на первичную обмотку, содержащую  $100$  витков, подано напряжение  $50 \text{ В}$ . Определить напряжение на вторичной обмотке, если число витков в ней  $400$ , а площадь поперечного сечения сердечника  $S_2 = 3S_3$ .

**19.69.** В конце линии переменного тока, сопротивление которой равно  $R_{\text{л}} = 12 \text{ Ом}$ , установлен понижающий трансформатор с коэффициентом трансформации  $k = 20$ . Потребитель получает во вторичной обмотке активную мощность  $P_2 = 21 \text{ кВт}$  при силе тока  $I_2 = 60 \text{ А}$ . Определить КПД трансформатора, если напряжение в начале линии  $U = 7,2 \text{ кВ}$ , а потеря мощности в первичной обмотке ничтожно мала. Во вторичной цепи нагрузка чисто активная.

**19.70.** Во сколько раз требуется повысить напряжение генератора, чтобы потери в линии уменьшились в  $n$  раз? Мощность, отдаваемую генератором, считать постоянной.

## § 20. Электромагнитные колебания и волны

**Пример 77.** Колебательный контур состоит из конденсатора емкостью  $48 \text{ мкФ}$ , катушки индуктивностью  $24 \text{ мГн}$  и активного сопротивления, равного  $20 \text{ Ом}$ . Определить частоту свободных электромагнитных колебаний в этом контуре. На сколько изменится частота электромагнитных колебаний в контуре, если пренебречь активным сопротивлением катушки?

Дано:  $C = 4,8 \cdot 10^{-5}$  Ф — емкость конденсатора;  $L = 2,4 \cdot 10^{-2}$  Гн — индуктивность катушки;  $R = 20$  Ом — активное сопротивление катушки.

Найти:  $\nu$  — частоту свободных электромагнитных колебаний в контуре;  $\Delta\nu = \nu_2 - \nu_1$  — изменение частоты колебаний в контуре, если его активное сопротивление будет равно нулю.

Решение. Частоту колебаний можно найти из соотношения

$$\nu_1 = \frac{1}{T_1}, \quad \text{где} \quad T_1 = \frac{2\pi}{\sqrt{1/(LC) - (R/2L)^2}}.$$

Находим частоту  $\nu_1$ :

$$\begin{aligned} \nu_1 &= \frac{1}{2\pi} \sqrt{\frac{1}{LC} - \left(\frac{R}{2L}\right)^2} = \frac{1}{6,28} \times \\ &\times \left[ \frac{1}{2,4 \cdot 10^{-2} \cdot 4,8 \cdot 10^{-5}} - \left(\frac{20}{2 \cdot 2,4 \cdot 10^{-2}}\right)^2 \right]^{1/2} \left( \frac{1}{\text{Гн} \cdot \text{Ф}} - \frac{\text{Ом}}{\text{Гн}} \right) = 132,7 \text{ Гц}. \end{aligned}$$

Если сопротивление  $R$  равно нулю, то формула для периода колебаний примет вид

$$T_2 = 2\pi\sqrt{LC}.$$

Отсюда найдем период колебаний при  $R = 0$  и частоту колебаний  $\nu_2$ , а затем  $\Delta\nu$ . Определяем частоту  $\nu_2$ :

$$\nu_2 = \frac{1}{2\pi\sqrt{LC}} = \frac{1}{6,28\sqrt{2,4 \cdot 10^{-2} \cdot 4,8 \cdot 10^{-5}} \text{ Гн} \cdot \text{Ф}} = 148,4 \text{ Гц}.$$

Вычисляем изменение частоты  $\Delta\nu = \nu_2 - \nu_1 = 148,4 \text{ Гц} - 132,7 \text{ Гц} = 15,7 \text{ Гц}$ .

Ответ:  $\nu_1 = 132,7 \text{ Гц}$ ,  $\Delta\nu = 15,7 \text{ Гц}$ .

**Пример 78.** Определить длину электромагнитной волны в вакууме, на которую настроен колебательный контур, если максимальный заряд конденсатора составляет  $2,0 \cdot 10^{-8}$  Кл, а максимальная сила тока в контуре равна  $1,0$  А. Какова емкость конденсатора, если индуктивность контура равна  $2,0 \cdot 10^{-7}$  Гн? Определить энергию электрического поля конденсатора в тот момент, когда энергия магнитного поля составляет  $3/4$  ее максимального значения. Определить напряжение на конденсаторе в тот же момент. Активным сопротивлением контура пренебречь.

Дано:  $Q_{\text{макс}} = 2,0 \cdot 10^{-8}$  Кл — максимальный заряд конденсатора,  $I_{\text{макс}} = 1$  А — максимальная сила тока,  $L = 2,0 \cdot 10^{-7}$  Гн — индуктивность контура,  $R = 0$  — активное сопротивление контура. Из таблиц:  $c = 3 \cdot 10^8$  м/с — скорость распространения электромагнитных волн в вакууме.

Найти:  $\lambda$  — длину электромагнитной волны, на которую настроен колебательный контур,  $C$  — емкость конденсатора,  $W_{\text{эл}}$  — энергию электрического поля в тот момент, когда энергия магнитного поля

составляет  $3/4$  ее максимального значения,  $U$  — напряжение на конденсаторе в тот же момент времени.

Решение. Длина волны определяется по формуле

$$\lambda = cT,$$

где  $T = 2\pi\sqrt{LC}$ . Для нахождения периода колебаний используем закон сохранения и превращения энергии. При незатухающих колебаниях максимальная энергия магнитного поля равна максимальной энергии электрического поля и равна полной энергии электромагнитных колебаний в контуре, т. е.  $W_{\text{эл. макс}} = W_{\text{маг. макс}} = W$ , откуда

$$\frac{Q_{\text{макс}}^2}{2C} = \frac{LI_{\text{макс}}^2}{2}, \quad LC = \frac{Q_{\text{макс}}^2}{I_{\text{макс}}^2}.$$

Тогда  $T = 2\pi(Q_{\text{макс}}/I_{\text{макс}})$ . Находим длину электромагнитной волны:

$$\lambda = c \cdot 2\pi \frac{Q_{\text{макс}}}{I_{\text{макс}}} = 3 \cdot 10^8 \cdot 2 \cdot \pi \cdot \frac{2,0 \cdot 10^{-8}}{1,0} \frac{\text{м/с} \cdot \text{Кл}}{\text{А}} \approx 38 \text{ м}.$$

Зная индуктивность контура, находим емкость конденсатора:

$$C = \frac{Q_{\text{макс}}^2}{LI_{\text{макс}}^2} = \frac{(2,0 \cdot 10^{-8})^2}{2,0 \cdot 10^{-7} \cdot 1,0^2} \frac{\text{Кл}^2}{\text{Гн} \cdot \text{А}^2} = 2,0 \cdot 10^{-9} \text{ Ф}.$$

Полная энергия электромагнитных колебаний в контуре равна сумме мгновенных значений энергии электрического и магнитного полей и при отсутствии затухания колебаний есть величина постоянная:

$$W = W_{\text{маг. макс}} = W_{\text{маг}} + W_{\text{эл}},$$

где  $W_{\text{маг}} = (3/4)W_{\text{маг. макс}}$ . Следовательно,  $W_{\text{маг. макс}} = (3/4)W_{\text{маг. макс}} + W_{\text{эл}}$ ; отсюда

$$W_{\text{эл}} = \frac{1}{4} W_{\text{маг. макс}} = \frac{1}{4} \frac{LI_{\text{макс}}^2}{2}.$$

Подставляя числовые значения, находим энергию электрического поля для данного момента времени:

$$W_{\text{эл}} = \frac{1}{4} \cdot \frac{2,0 \cdot 10^{-7} \cdot 1,0^2}{2} \text{ Гн} \cdot \text{А}^2 = 2,5 \cdot 10^{-8} \text{ Дж}.$$

Энергия электрического поля определяется по формуле  $W_{\text{эл}} = CU^2/2$ . Следовательно,

$$\frac{CU^2}{2} = \frac{1}{4} \frac{LI_{\text{макс}}^2}{2},$$

откуда находим мгновенное значение напряжения на конденсаторе

$$U = \frac{I_{\text{макс}}}{2} \sqrt{\frac{L}{C}} = \frac{1,0 \text{ А}}{2} \sqrt{\frac{2,0 \cdot 10^{-7}}{2,0 \cdot 10^{-9}} \frac{\text{Гн}}{\text{Ф}}} = 5,0 \text{ А} \sqrt{\frac{\text{В}^2}{\text{А}^2}} = 5,0 \text{ В}.$$

Ответ:  $\lambda \approx 38 \text{ м}$ ,  $C = 2,0 \cdot 10^{-9} \text{ Ф}$ ,  $W_{\text{эл}} = 2,5 \cdot 10^{-8} \text{ Дж}$ ,  $U = 5,0 \text{ В}$ .



**Пример 79.** Определить длину электромагнитной волны в вакууме, если ее частота равна  $4,5 \cdot 10^{11}$  Гц. Чему равна скорость распространения и длина этой же волны в бензоле, если его диэлектрическая проницаемость составляет 2,28? При решении считать бензол практически прозрачным для электромагнитного излучения, а его магнитную проницаемость  $\mu \approx 1^*$ ).

*Дано:*  $\nu = 4,5 \cdot 10^{11}$  Гц — частота волны,  $\varepsilon = 2,28$  — диэлектрическая проницаемость бензола. Из таблиц:  $\varepsilon_0 = 8,85 \cdot 10^{-12}$  Ф/м — электрическая постоянная,  $\mu_0 = 4\pi \cdot 10^{-7}$  Гн/м — магнитная постоянная.

*Найти:*  $\lambda_0$  — длину электромагнитной волны в вакууме;  $v$  — скорость распространения волны в бензоле,  $\lambda$  — длину этой же волны в бензоле.

**Решение.** Вычисляем скорость распространения электромагнитных волн в вакууме:

$$c = \frac{1}{\sqrt{\varepsilon_0 \mu_0}} = \frac{1}{\sqrt{8,85 \cdot 10^{-12} \cdot 4\pi \cdot 10^{-7} \text{ Ф/м} \cdot \text{Гн/м}}} = 3 \cdot 10^8 \text{ м/с.}$$

Определяем длину волны в вакууме:

$$\lambda_0 = \frac{c}{\nu} = \frac{3 \cdot 10^8 \text{ м/с}}{4,5 \cdot 10^{11} \text{ Гц}} = 0,67 \cdot 10^{-3} \text{ м} = 0,67 \text{ мм.}$$

Находим скорость распространения электромагнитной волны в бензоле и вычисляем  $\lambda$ :

$$v = \frac{c}{\sqrt{\varepsilon}} = \frac{3 \cdot 10^8 \text{ м/с}}{\sqrt{2,28}} = 2 \cdot 10^8 \text{ м/с,}$$

$$\lambda = \frac{v}{\nu} = \frac{2 \cdot 10^8 \text{ м/с}}{4,5 \cdot 10^{11} \text{ Гц}} = 0,44 \cdot 10^{-3} \text{ м} = 0,44 \text{ мм.}$$

**Ответ:**  $\lambda_0 = 0,67$  мм,  $v = 2 \cdot 10^8$  м/с,  $\lambda = 0,44$  мм.

**20.1.** Какую роль играют индуктивность и емкость в колебательном контуре?

**20.2.** Как влияет активное сопротивление катушки на электромагнитные колебания в контуре?

**20.3.** Почему в реальных колебательных контурах уменьшается энергия электромагнитных колебаний, что приводит к их затуханию? Как получить незатухающие электромагнитные колебания?

**20.4.** Какими способами можно изменять собственную частоту электромагнитных колебаний в контуре?

\*) Поскольку  $c/v = \sqrt{\varepsilon \mu} = \sqrt{\varepsilon}$ , то  $v = c/\sqrt{\varepsilon}$ . Из последней формулы можно найти длину электромагнитной волны в бензоле, учитывая, что  $\lambda = v/\nu$ .

Применяя эти формулы, необходимо помнить, что диэлектрическая проницаемость обычно сильно зависит от частоты, а в таблицах дается значение для электростатических полей, т. е. приводится значение  $\varepsilon$  при  $\nu = 0$ . Однако у бензола и многих газов  $\varepsilon$  слабо зависит от частоты и поэтому может быть взято из таблиц.

**20.5.** Как увеличить долю энергии, затрачиваемую в колебательном контуре на излучение электромагнитных волн?

**20.6.** В вертикальном магнитном поле индукция  $B$  возрастает, убывает. Как при этом расположено возникающее вихревое электрическое поле? Вектор  $E$ ?

**20.7.** Всегда ли при изменении магнитного поля возникает переменное вихревое электрическое поле?

**20.8.** Всегда ли максимумы напряженности электрической и магнитной составляющих электромагнитной волны в один и тот же момент времени приходятся на одну и ту же точку пространства?

**20.9.** Всегда ли электромагнитные волны переносят энергию?

**20.10.** Вертикальная антенна передающей станции излучает электромагнитные волны. В каких направлениях изменяются электрическая и магнитная составляющие электромагнитной волны? Как нужно расположить антенну приемной станции, чтобы в ней возникли электромагнитные колебания с максимальной амплитудой?

**20.11.** Вертикальная антенна передающей станции излучает электромагнитные волны частотой 200 кГц. В вертикальной антенне приемной радиостанции возбуждаются электромагнитные колебания максимальной напряженностью 60 мкВ/м. Определить максимальную ЭДС, наводимую в антенне электромагнитной волной, и частоту ее изменения. На какой длине волны работает передающая радиостанция? Длина антенны 2,0 м.

**20.12.** По условию задачи 20.11 определить, на сколько изменится максимальная ЭДС, наводимая в антенне электромагнитными волнами, при наклоне приемной антенны в плоскости антенны передающей станции на угол  $60^\circ$  от вертикали? Как изменится при этом частота ЭДС?

**20.13.** За счет какой энергии возбуждается колебательное движение заряженных частиц в антенне приемной радиостанции? Какова частота их колебаний? Какими — свободными или вынужденными — являются колебания?

**20.14 \*)** Как изменятся период и частота собственных колебаний в контуре, если его емкость увеличить в 12 раз, а индуктивность уменьшить в три раза?

**20.15.** Определить период и частоту собственных колебаний в контуре индуктивностью 0,50 мГн и емкостью 4,0 мкФ. Как изменится частота колебаний, если последовательно с конденсатором включить еще три таких же конденсатора?

**20.16.** Чему равна частота собственных колебаний, в контуре с индуктивностью 2,2 мГн и емкостью 1,5 мкФ? Как изменится период собственных колебаний, если параллельно конденсатору присоединить еще три таких же конденсатора?

---

\*) Если в задаче (здесь и ниже) не дано активное сопротивление, то им следует пренебречь.

**20.17.** В колебательном контуре при последовательном соединении двух одинаковых конденсаторов период собственных колебаний  $T_1 = 2,0$  мкс. Каким станет период, если эти конденсаторы присоединить параллельно друг другу?

**20.18.** В колебательном контуре резонанс наступает при частоте 4,2 кГц. Определить индуктивность катушки, если емкость конденсатора равна 2,2 мкФ. Какова разность фаз между током и напряжением в контуре?

**20.19.** Катушка индуктивности без сердечника длиной 0,50 м и площадью поперечного сечения  $2,0 \text{ см}^2$ , имеющая 800 витков провода, соединена параллельно с воздушным конденсатором. Его пластины по  $40 \text{ см}^2$  каждая расположены на расстоянии 6,0 мм одна от другой. Определить резонансную частоту контура.

**20.20.** В колебательном контуре электрический заряд конденсатора изменяется по закону  $Q = 10^{-4} \cos(10^4 \pi t)$ . Определить закон изменения силы тока в цепи; максимальную энергию электрического и магнитного полей в контуре; индуктивность контура. Емкость конденсатора 100 пФ.

**20.21.** В колебательном контуре конденсатор емкостью  $C$  заряжен до максимального напряжения  $U_{\text{макс}}$ . Определить резонансную частоту колебаний в контуре, если максимальная сила тока в нем равна  $I_{\text{макс}}$ .

**20.22.** Колебательный контур состоит из катушки индуктивностью 1,0 мГн и конденсатора емкостью 20 мкФ. Максимальная энергия магнитного поля  $1,0 \cdot 10^{-2}$  Дж. Определить максимальные значения энергии электрического поля, заряда конденсатора и силы тока. Записать уравнение для мгновенного значения силы тока. Колебания считать незатухающими.

**20.23.** В колебательном контуре индуктивностью  $L$  и емкостью  $C$  конденсатор заряжен до максимального напряжения  $U_{\text{макс}}$ . Определить силу тока в момент, когда напряжение на конденсаторе уменьшится в два раза. Колебания считать незатухающими.

**20.24.** В колебательном контуре индуктивностью 0,40 Гн и емкостью 20 мкФ амплитудное значение силы тока равно 0,10 А. Каким будет напряжение на конденсаторе в момент, когда энергия электрического и магнитного полей будет одинакова? Колебания считать незатухающими.

**20.25.** В колебательном контуре конденсатору сообщили заряд 1 мКл, после чего в контуре возникли затухающие электромагнитные колебания. Какое количество теплоты выделится к моменту, когда максимальное напряжение на конденсаторе станет меньше начального максимального напряжения в четыре раза? Емкость конденсатора равна 10 мкФ.

**20.26.** Определить частоту свободных колебаний в контуре, который состоит из конденсатора емкостью 0,41 мкФ, катушки индуктивностью 0,11 мГн и активного сопротивления 20,5 Ом.

**20.27.** В колебательном контуре, состоящем из параллельно включенных конденсатора, катушки индуктивностью  $0,31 \text{ мГн}$  и активного сопротивления  $8,9 \text{ Ом}$ , период свободных колебаний  $0,209 \text{ мс}$ . Каким станет период, если емкость конденсатора увеличить в два раза?

**20.28.** В каком случае резонансный контур радиоприемника получает максимальную энергию от электромагнитных колебаний в антенне, возбужденных электромагнитной волной?

**20.29.** При какой частоте колебаний радиопередатчик излучает электромагнитные волны длиной  $49 \text{ м}$ ? К каким волнам — длинным, средним, коротким — относятся они?

**20.30.** Определить длину волны электромагнитного излучения частотой  $10 \text{ МГц}$ , распространяющегося в среде с диэлектрической проницаемостью, равной  $7$ , и магнитной проницаемостью равной  $1$ . Как изменится частота колебаний и длина волны при переходе в вакуум?

**20.31.** Электромагнитные волны какой длины излучает колебательный контур емкостью  $33,1 \text{ пФ}$  и индуктивностью  $15 \text{ мкГн}$ ?

**20.32.** Какой индуктивностью должен обладать контур емкостью  $50 \text{ пФ}$ , настроенный на электромагнитные волны длиной  $32 \text{ м}$ ?

**20.33.** Колебательный контур радиоприемника имеет индуктивность  $40 \text{ мкГн}$  и переменную емкость. Радиоприемник может принимать волны длиной от  $500$  до  $1000 \text{ м}$ . В каких пределах изменяется при этом емкость контура?

**20.34.** На какой диапазон длин волн рассчитан радиоприемник, если индуктивность приемного контура  $0,25 \text{ мГн}$ , а емкость конденсатора может изменяться от  $0,113$  до  $11,8 \text{ пФ}$ ?

**20.35.** Входной контур радиоприемника состоит из катушки индуктивностью  $2,0 \text{ мГн}$  и плоского конденсатора с площадью пластин  $10 \text{ см}^2$  и расстоянием между ними  $2,0 \text{ мм}$ . Пространство между пластинами заполнено слюдой с диэлектрической проницаемостью  $7,5$ . На какую длину волны настроен приемник?

**20.36.** На какую длину волны настроен колебательный контур с индуктивностью  $L$ , если максимальная сила тока в нем равна  $I_{\text{макс}}$ , а максимальное напряжение на конденсаторе составляет  $U_{\text{макс}}$ ? Скорость распространения электромагнитных волн равна  $v$ .

**20.37.** Определить длину волны, на которую настроен колебательный контур, если максимальный заряд конденсатора равен  $Q_{\text{макс}}$ , а максимальная сила тока в контуре  $I_{\text{макс}}$ . Скорость распространения электромагнитных волн равна  $v$ .

**20.38.** На какую длину волны настроен колебательный контур, состоящий из емкости  $70 \text{ нФ}$ , индуктивности  $0,28 \text{ мГн}$  и активного сопротивления  $40 \text{ Ом}$ ?

**20.39.** Почему колебания высокой частоты, используемые при радиосвязи, называют несущими?

**20.40.** За счет чего в радиоприемнике происходит усиление принимаемых сигналов?

**20.41.** Во сколько раз нужно увеличить мощность радиолокатора для увеличения его радиуса действия в два раза? в три раза?

**20.42.** Чему равно расстояние до цели, если радиолокационный импульс, отраженный от цели, возвратился через 0,80 мс после выхода из локатора?

**20.43.** Радиолокатор, работающий в импульсном режиме, обнаруживает цель на максимальном расстоянии 300 км. Какое количество импульсов в секунду излучает локатор? На каком минимальном расстоянии можно обнаружить цель, если продолжительность одного импульса составляет 200 нс?

**20.44.** Радиолокатор, работающий в импульсном режиме на волне 200 см, может обнаруживать цели, находящиеся на расстояниях от 60 м до 150 км. Определить частоту посылаемых импульсов, их длительность и число полных колебаний в импульсе.

**20.45.** С какой скоростью приближается космическое тело к Земле, если радиолокатор, работающий на волне 10 см, принимает отраженный от тела сигнал на частоте, большей излучаемой на 120 кГц?

**20.46.** Автомобиль движется навстречу излучению радиолокатора, работающего на длине волны 20 см. С какой скоростью приближается автомобиль, если частота принимаемого отраженного сигнала возросла на 83,3 Гц? Как изменилась бы частота отраженного сигнала при удалении автомобиля с той же скоростью?

## Глава IV

# ОПТИКА. ОСНОВЫ СПЕЦИАЛЬНОЙ ТЕОРИИ ОТНОСИТЕЛЬНОСТИ

### § 21. Скорость света. Природа света

**Пример 80.** Длина волны видимого излучения (света) в стекле (тяжелый флинт) равна 366 нм при энергии фотонов  $3,37 \cdot 10^{-19}$  Дж. Определить длину волны видимого излучения в вакууме, абсолютный показатель преломления данного сорта стекла и скорость распространения излучения в нем.

*Дано:*  $\lambda = 366 \text{ нм} = 3,66 \cdot 10^{-7} \text{ м}$  — длина волны излучения в стекле;  $\epsilon = 3,37 \cdot 10^{-19} \text{ Дж}$  — энергия фотонов. Из таблиц:  $c = 3 \cdot 10^8 \text{ м/с}$  — скорость распространения видимого излучения в вакууме;  $h = 6,62 \times 10^{-34} \text{ Дж} \cdot \text{с}$  — постоянная Планка.

*Найти:*  $\lambda_0$  — длину волны в вакууме;  $n$  — абсолютный показатель преломления данного сорта стекла;  $v$  — скорость распространения излучения (света) в нем.

**Решение.** Длину волны излучения в вакууме определим из соотношения

$$\epsilon = \frac{hc}{\lambda_0}.$$

Отсюда

$$\lambda_0 = \frac{hc}{\epsilon} = \frac{6,62 \cdot 10^{-34} \cdot 3 \cdot 10^8 \text{ Дж} \cdot \text{с} \cdot \text{м/с}}{3,37 \cdot 10^{-19} \text{ Дж}} \approx 5,90 \cdot 10^{-7} \text{ м} = 590 \text{ нм}.$$

При переходе света из одной среды в другую частота колебаний остается неизменной. Поэтому можно написать  $\nu = \lambda_0/c = \lambda/v$ , откуда  $\lambda_0/\lambda = c/v = n$ . Тогда

$$n = \frac{5,90 \cdot 10^{-7} \text{ м}}{3,66 \cdot 10^{-7} \text{ м}} = 1,61.$$

Абсолютный показатель преломления характеризует оптическую плотность среды и отвечает на вопрос, во сколько раз скорость излучения в вакууме больше, чем в данной среде. Поэтому

$$v = \frac{c}{n} = \frac{3 \cdot 10^8}{1,61} \text{ м/с} = 1,86 \cdot 10^8 \text{ м/с}.$$

**Ответ:**  $\lambda_0 = 590 \text{ нм}$ ;  $n = 1,61$ ;  $v = 1,86 \cdot 10^8 \text{ м/с}$ .

**21.1.** Любые ли электромагнитные волны вызывают у человека световые ощущения?

**21.2.** Какому интервалу длин волн соответствуют частоты, указанные в ответе к задаче 21.1?

**21.3.** Определить частоту колебаний, соответствующую наиболее яркой линии в спектре излучения Солнца с длиной волны 555 нм.

**21.4.** Согласно электромагнитной теории Максвелла скорость света в среде определяется из формулы  $v = c/\sqrt{\epsilon\mu}$ . Почему же для прозрачных диа- и парамагнитных сред применяется формула  $v = c/\sqrt{\epsilon}$ ?

**21.5.** Как объясняется видимое излучение заданной частоты на основе квантовой теории?

**21.6.** Какова максимальная и минимальная энергии фотонов видимого излучения?

**21.7.** Какая существует зависимость между энергией кванта и длиной волны?

**21.8.** Что можно сказать об энергии фотона при переходе излучения из вакуума в какую-либо прозрачную среду?

**21.9.** Оценить, во сколько раз энергия кванта гамма-лучей с длиной волны порядка  $10^{-2} \text{ \AA}$  ( $1 \text{ \AA} = 10^{-10} \text{ м}$ ) больше энергии кванта жесткого рентгеновского излучения с длиной волны  $0,1 \text{ \AA}$ .

**21.10.** Сколько фотонов зеленого света с длиной волны  $5,52 \cdot 10^{-7} \text{ м}$  излучает за 1 с источник, мощность видимого излучения которого равна 10 Вт?

**21.11.** Квант излучения имеет энергию  $2,2 \cdot 10^{-19} \text{ Дж}$ . Будет ли человек с нормальным зрением воспринимать это излучение, как видимое?

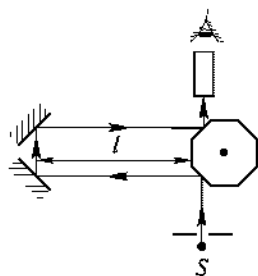
**21.12.** Точечный источник равномерно излучает свет по всем направлениям. Что является фронтом волны?

**21.13.** В каком случае фронт волны представляет собой сферическую поверхность?

**21.14.** Что такое световые лучи? Переносят ли они энергию?

**21.15.** В 1676 г. датский ученый Ремер, определяя скорость света астрономическим методом, наблюдал затмение Ио — одного из спутников Юпитера. Почему начало очередного затмения запаздывало по сравнению с расчетным на 16 мин 40 с? Принимая диаметр земной орбиты за  $3,0 \cdot 10^8 \text{ км}$ , оценить результат определения скорости света.

**21.16.** Для определения скорости света Майкельсон использовал метод вращающегося зеркала (см. рисунок). Наблюдатель непрерывно видел источник света  $S$  при минимальной частоте вращения зеркала 530 об/с. Зная, что  $l = 35,4263 \text{ км}$ , оценить результат по определению скорости света.



К задаче 21.16

**21.17.** Через какое время после начала солнечного затмения его увидит земной наблюдатель? Принять скорость света равной  $299\,792\text{ км/с}$ , радиус земной орбиты  $1,49 \cdot 10^8\text{ км}$ .

**21.18.** Какой смысл вложен в понятие оптической плотности среды?

**21.19.** От чего зависит оптическая плотность среды?

**21.20.** Определить оптическую плотность среды, если ее диэлектрическая проницаемость равна 2,28, а магнитная проницаемость приближенно может быть принята за единицу.

**21.21.** Определить показатель преломления и назвать жидкость, в которой видимое электромагнитное излучение с частотой  $5 \cdot 10^{14}\text{ Гц}$  имеет длину волны  $450\text{ нм}$ .

**21.22.** Длина световой волны в вакууме  $0,55\text{ мкм}$ , а в прозрачной среде  $0,44\text{ мкм}$ . Определить показатель преломления среды, скорость света в ней и частоту электромагнитных колебаний.

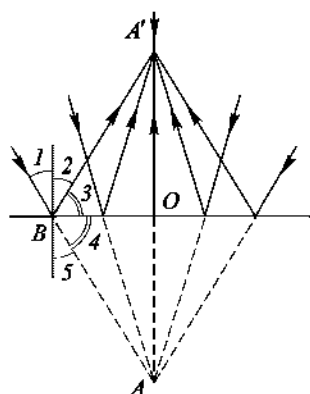
## § 22. Отражение света.

### Плоские и сферические зеркала

**Пример 81.** На пути лучей, сходящихся в точке  $A$ , поставили плоское зеркало, как показано на рисунке. После отражения лучи пересекались в точке  $A'$ . Определить положение этой точки, если расстояние от точки  $A$  до зеркала  $35\text{ см}$ .

*Дано:*  $AO = 0,35\text{ м}$  — расстояние от точки  $A$  до зеркала.

*Найти:*  $A'O$  — расстояние от изображения точки  $A$  до зеркала.



К примеру 81

**Решение.** Известно, что луч, идущий в точку  $A$  по перпендикуляру к зеркалу, отражаясь от него, меняет направление своего распространения на обратное, поэтому изображение точки  $A$  должно находиться на продолжении перпендикуляра  $AO$ , опущенного из точки  $A$  на зеркало. Положение точки  $A'$  можно найти, определив точку пересечения какого-либо другого

отраженного луча (например, из точки  $B$ ) с продолжением перпендикуляра  $AO$ . Расстояние  $A'O$  можно найти из треугольника  $ABA'$ . Из законов отражения следует, что  $\angle 1 = \angle 2$ ,  $\angle 1 = \angle 5$  (см. рисунок). Таким образом,  $\angle 2 = \angle 5$  и  $\angle 3 = \angle 4$ . Отсюда следует, что в треугольнике  $ABA'$  линия  $BO$ , служащая по построению высотой, является также биссектрисой, а следовательно, и медианой, т. е.  $AO = A'O$ . Поскольку приведенные выше рассуждения остаются справедливыми для любого другого луча, отраженного от зеркала, можно утверждать, что все лучи после отражения пройдут через точку  $A'$ , в которой и получится



действительное изображение точки  $A$ . Так как при наличии зеркала никаких лучей в точке  $A$  реально нет, ее называют мнимым точечным источником света.

*Ответ:* В плоском зеркале получается действительное изображение мнимого источника света, расположенное симметрично ему относительно зеркала ( $AO = A'O$ ), т. е. на расстоянии 35 см от него.

**Пример 82.** Зная радиус кривизны и расстояние от предмета до фокуса сферического зеркала, показать, что линейное увеличение, которое дают сферические зеркала, равно отношению половины радиуса кривизны к расстоянию от предмета до фокуса, считая вдоль главной оптической оси. Сделать построение изображений предмета в сферических зеркалах, вывести формулу сферического зеркала.

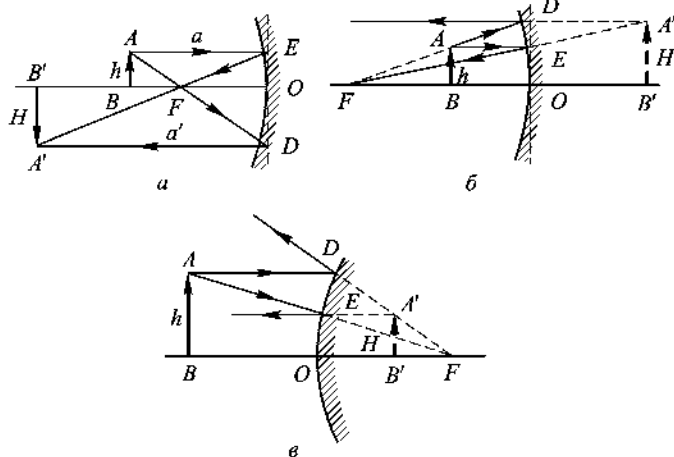
*Дано:*  $R$  — радиус кривизны сферического зеркала,  $b$  — расстояние от предмета до фокуса зеркала.

*Найти:*  $\beta$  — увеличение зеркала, вывести формулу зеркала.

*Решение.* Сферическое зеркало может быть собирающим или рассеивающим. Рассмотрим все возможные случаи.

1. *Собирающее (вогнутое) сферическое зеркало.*

$A$ . Допустим, что предмет находится между фокусом и центром кривизны зеркала (см. рисунок  $a$ ). Для построения изображения предмета  $AB$  воспользуемся двумя лучами, идущими из точки  $A$ : проходящим через фокус  $F$  и лучом  $a$ , параллельным главной оптической оси. Пересечение отраженных от зеркала лучей в точке  $A'$  определит положение изображения  $A'B'$ .



К примеру 82

Учитывая подобие треугольников  $ODF$ ,  $BAF$  и  $A'B'F$ ,  $EOF$ , можно написать:

$$\frac{H}{h} = \frac{f}{a - f}, \quad \frac{H}{h} = \frac{a' - f}{f}, \quad \text{где } f = OF.$$

Приравнивая правые части пропорций и производя преобразования, получаем формулу для сферического зеркала

$$\frac{1}{f} = \frac{1}{a} + \frac{1}{a'}.$$

По условию задачи  $BF = a - f = b$ ; следовательно,

$$\beta = \frac{H}{h} = \frac{f}{a - f} = \frac{f}{b} = \frac{R}{2b}.$$

Б. Предмет находится между фокусом и зеркалом ( $a < f$ ). Используем для построения изображения те же, что и в первом случае, лучи (см. рисунок б). Как видно из построения, изображение мнимое. Из подобия треугольников  $ABF$  и  $ODF$ , учитывая, что  $OD = A'B'$ , имеем

$$\frac{H}{h} = \frac{f}{f - a}.$$

Из чертежа видно, что  $b = f - a$ , следовательно,

$$\beta = \frac{H}{h} = \frac{f}{f - a} = \frac{f}{b} = \frac{R}{ab}.$$

Для вывода формулы зеркала напомним

$$\frac{a'}{a} = \frac{f}{f - a}, \quad \text{или} \quad a'f - a'a = af.$$

После почленного деления на произведение  $aa'f$  получим

$$\frac{1}{a} - \frac{1}{f} = \frac{1}{a'}, \quad \text{или} \quad \frac{1}{f} = \frac{1}{a} + \frac{1}{a'}.$$

Знак «-» перед  $1/a'$  подтверждает правильность построенного мнимого изображения.

2. Зеркало рассеивающее (выпуклое). Используя известные приемы, построим изображение предмета в выпуклом зеркале. Как видно из рисунка в, изображение  $A'B'$  мнимое, так как получилось оно на пересечении не самих отраженных лучей, а их продолжений.

Рассматривая подобные треугольники  $ODF$ ,  $A'B'F$  и  $OEF$ ,  $ABF$ , можем написать:

$$\frac{H}{h} = \frac{f - a}{f}, \quad \beta = \frac{H}{h} = \frac{f}{a + f} = \frac{f}{b} = \frac{R}{2b}.$$

Приведенные соотношения позволяют вывести формулу для выпуклого зеркала

$$\frac{a'}{a} = \frac{f}{a + f} \quad \text{или} \quad af = aa' + a'f.$$

После деления на произведение  $aa'f$  получим

$$\frac{1}{a'} = \frac{1}{f} + \frac{1}{a}, \quad \text{или} \quad -\frac{1}{f} = \frac{1}{a} - \frac{1}{a'}.$$

Знаки «—» в формуле показывают, что фокус выпуклого зеркала и изображение предмета в нем — мнимые.

*Ответ:* Увеличение сферического зеркала во всех случаях равно отношению половины радиуса кривизны к расстоянию от предмета до фокуса зеркала.

**Пример 83.** Предмет расположен перед вогнутым сферическим зеркалом перпендикулярно его главной оптической оси так, что отношение линейных размеров изображения и предмета оказалось равным  $\beta_1 = 1,5$ . После того как предмет отодвинули на  $l = 16$  см от зеркала, отношение размеров изображения и предмета стало равным  $\beta_2 = 0,5$ . Найти радиус кривизны вогнутого зеркала.

*Дано:*  $\beta_1 = 1,5$  — линейное увеличение в первом случае,  $\beta_2 = 0,5$  — линейное увеличение во втором случае,  $l = 0,16$  м — расстояние между положениями предмета.

*Найти:*  $R$  — радиус кривизны вогнутого зеркала.

**Решение.** Радиус кривизны  $R$  и фокусное расстояние  $f$  вогнутого сферического зеркала связаны соотношением  $R = 2f$ , следовательно, задача сводится к нахождению фокусного расстояния зеркала. Используя формулы для вогнутого зеркала

$$\frac{1}{f} = \frac{1}{a} + \frac{1}{a'}, \quad \beta = \frac{a'}{a},$$

для первого положения предмета напомним

$$f = \frac{a_1 a'_1}{a_1 + a'_1}, \quad a'_1 = \beta_1 a_1,$$

или после замены  $a'_1$

$$f = \frac{\beta_1}{1 + \beta_1} a_1. \quad (1)$$

Аналогично для второго положения предмета

$$f = \frac{a_2 a'_2}{a_2 + a'_2}, \quad a'_2 = \beta_2 a_2, \quad f = \frac{\beta_2}{1 + \beta_2} a_2.$$

Но по условию задачи  $a_2 = a_1 + l$ , следовательно,

$$f = \frac{\beta_2}{1 + \beta_2} (a_1 + l). \quad (2)$$

Из уравнения (1) определяем  $a_1$  и его значение подставляем в уравнение (2)

$$f = \frac{\beta_2}{1 + \beta_2} \left( \frac{1 + \beta_1}{\beta_1} f + l \right).$$

Отсюда

$$f = \frac{\beta_1 \beta_2}{\beta_1 - \beta_2} l.$$

Подставляя числовые значения, получаем

$$f = \frac{1,5 \cdot 0,5}{1,5 - 0,5} \cdot 0,16 \text{ м} = 0,12 \text{ м}; \quad R = 0,24 \text{ м}.$$

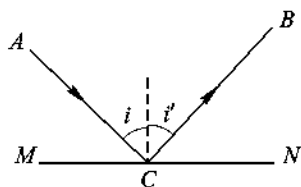
Ответ:  $R = 0,24 \text{ м}$ .

**22.1.** При каких условиях в плоском зеркале можно получить действительное изображение?

**22.2.** На сколько изменится угол между падающим и отраженным лучами при повороте плоского зеркала на угол  $\alpha$ ?

**22.3.** Угловая высота Солнца над горизонтом равна  $60^\circ$ . Под каким углом к вертикали следует поместить плоское зеркало, чтобы осветить дно колодца?

**22.4.** Под каким углом к солнечному лучу необходимо расположить плоское зеркало, чтобы отраженный от него солнечный луч направить вертикально вверх? Угловая высота Солнца над горизонтом  $\alpha = 50^\circ$ .



К задаче 22.5

**22.5.** Геометрически доказать, что если луч света попадает из точки  $A$  в точку  $B$  после отражения от зеркала  $MN$ , то длина пути  $ACB$ , пройденного светом, будет наименьшей (см. рисунок).

**22.6.** Плоское зеркало  $MN$  удаляется от источника света  $S$  со скоростью  $v$ . С какой скоростью при этом будет удаляться относительно неподвижного источника его изображение?

**22.7.** Под каким углом расположены два плоских зеркала, если луч света после поочередного отражения от зеркал будет параллелен падающему?

**22.8.** Небольшой предмет расположен между двумя плоскими зеркалами, образующими некоторый угол. Определить этот угол, если расстояние от предмета до каждого изображения и между ними одинаково.

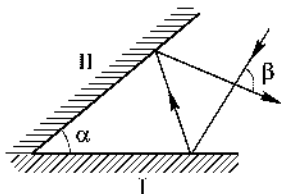
**22.9.** Два плоских зеркала образуют двугранный угол  $90^\circ$ ,  $60^\circ$ ,  $45^\circ$ . Сколько изображений предмета, поставленного между зеркалами, можно получить в каждом случае?

**22.10.** Между двумя параллельными плоскими зеркалами поместили свечу. Сколько изображений ее получается при этом? Каким будет расстояние между первыми изображениями свечи?

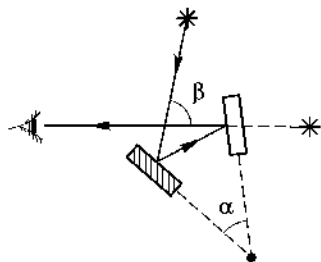
**22.11.** На стене вертикально укреплено зеркало, верхний край которого расположен на уровне глаз человека. Какой наименьшей длины должно быть зеркало, чтобы человек ростом  $180 \text{ см}$  видел себя в нем во весь рост?

**22.12.** Рассматривая предметы в плоском зеркале, мы их воспринимаем перевернутыми справа налево. Почему же зеркало не переворачивает изображение сверху вниз?

**22.13.** Два плоских зеркала расположены так, что образуют двугранный угол  $\alpha$  (см. рисунок). Каким будет угол  $\beta$ , образованный лучом, падающим на зеркало I, и лучом, отраженным от зеркала II? Зависит ли этот угол от угла падения? Падающий и отраженный лучи лежат в плоскости, перпендикулярной ребру двугранного угла.



К задаче 22.13



К задаче 22.14

**22.14.** В навигационном приборе — секстанте — два плоских зеркала, из которых одно полупрозрачное, образуют двугранный угол  $\alpha$ . Глядя сквозь полупрозрачное зеркало, достигают совмещения изображения светила в нем с линией горизонта при угле  $\alpha = 32^\circ$  (см. рисунок). Чему равна угловая высота светила над горизонтом  $\beta$ ?

**22.15.** Как зависит коэффициент отражения света от угла падения лучей, падающих на границу с прозрачной средой?

**22.16.** Для пассажира в самолете, летящего над морем, вода под самолетом кажется более темной, чем вдали у горизонта. Почему?

**22.17 \*).** Предмет высотой 10 см помещают перед вогнутым сферическим зеркалом на расстоянии 24 см от его полюса. Какое и где получится изображение? Определить его высоту, если радиус кривизны зеркала 18 см.

**22.18.** Предмет высотой 4,0 см располагают перед вогнутым сферическим зеркалом так, что его действительное, увеличенное в два раза изображение получается на расстоянии 36 см от полюса зеркала. Определить положение предмета по отношению к зеркалу, фокусное расстояние, радиус кривизны и оптическую силу зеркала.

**22.19.** Предмет высотой 10 см поместили на расстоянии 4,0 см от полюса вогнутого сферического зеркала, радиус кривизны которого 24 см. Определить, какое и где получилось изображение. Какова его высота и увеличение, даваемое зеркалом.

**22.20.** Перед вогнутым сферическим зеркалом с радиусом кривизны 30 см поместили предмет высотой 6 см на расстоянии 20 см от полюса зеркала. На каком расстоянии от зеркала и какое получится изображение предмета? Определить его высоту и увеличение. Куда по

\*) Если в условии нет других указаний, здесь и далее считать, что предмет расположен перпендикулярно главной оптической оси.

отношению к зеркалу и на сколько надо переместить предмет, чтобы его мнимое изображение было в два раза больше предмета?

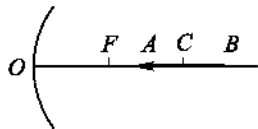
**22.21.** Радиус кривизны вогнутого сферического зеркала равен 0,6 м. На каком расстоянии от полюса зеркала получится действительное изображение предмета, если от изображения до предмета 25 см? Где следует поместить предмет, чтобы его действительное изображение получилось в натуральную величину?

**22.22.** Предмет находится на расстоянии  $1,5f$  от полюса вогнутого сферического зеркала. На каком расстоянии от зеркала получится изображение? Каков коэффициент его линейного увеличения?

**22.23.** В вогнутом сферическом зеркале получено в четыре раза увеличенное действительное изображение предмета. Расстояние от предмета до изображения равно 75 см. Определить расстояние от полюса зеркала до фокуса, до предмета и изображения.

**22.24.** Предмет расположен на расстоянии  $4f$  от вогнутого сферического зеркала. Какой высоты получится изображение, если известно, что изображение высотой 30 см получается, когда предмет находится от зеркала на расстоянии  $2f$ ?

**22.25.** Предмет  $AB$  длиной 10 см расположен, как показано на рисунке. Точка  $A$  удалена от полюса зеркала на 15 см. Найти построением изображение  $A'B'$  предмета и подсчитать его длину, учитывая, что если в точке  $A$



К задаче 22.25

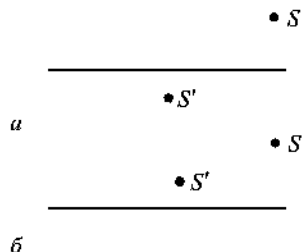
предмет расположить перпендикулярно главной оптической оси, то получится действительное изображение, увеличенное в два раза.

**22.26.** Светящаяся точка расположена на главной оптической оси вогнутого сферического зеркала на расстоянии  $l_1 = 4,0$  см от главного фокуса, а ее изображение — на расстоянии  $l_2 = 25$  см. Определить оптическую силу зеркала.

**22.27.** Точечный источник света  $S$  находится на главной оптической оси вогнутого сферического зеркала, радиус кривизны которого 20 см. Расстояние от полюса зеркала до  $S$  равно  $1,2f$ . На каком расстоянии от сферического зеркала надо поставить плоское, чтобы лучи после отражения от сферического и затем от плоского зеркала вновь пересеклись в точке  $S$ ?

**22.28.** Светящаяся точка находится на расстоянии 60 см от полюса выпуклого зеркала с фокусным расстоянием 20 см. На каком расстоянии от светящейся точки находится ее изображение? Какое оно?

**22.29.** На рисунке дана главная оптическая ось сферического зеркала; показаны светящаяся точка  $S$  и ее изображение  $S'$ . Найти построением положение зеркала в случаях  $a$  и  $b$ , определить, вогнутое оно



К задаче 22.29

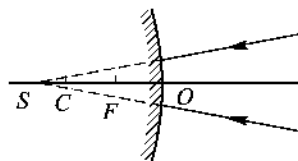
или выпуклое, и отметить на главной оптической оси точки фокуса и центра кривизны.

**22.30.** В выпуклом сферическом зеркале получилось мнимое изображение, уменьшенное в пять раз. На каком расстоянии от зеркала находятся предмет и его изображение, если расстояние между ними равно 60 см?

**22.31.** Пучок сходящихся лучей падает на сферическое зеркало радиусом кривизны  $R$  так, что их продолжения пересекаются на главной оптической оси на расстоянии  $R/4$  от полюса за зеркалом. На каком расстоянии пересекутся отраженные лучи, если зеркало вогнутое? выпуклое?

**22.32.** На пути сходящихся лучей поставили выпуклое сферическое зеркало, оптическая сила которого  $-3$  дптр (см. рисунок). Расстояние  $SO = 75$  см. Где будет находиться  $S'$  — изображение точки  $S$ ? Что можно сказать относительно точки  $S$ ?

**22.33.** Предмет высотой 30 см расположен на расстоянии 60 см от выпуклого сферического зеркала радиусом кривизны 40 см. Какова высота изображения? Какое линейное увеличение дает зеркало? В каком направлении будет перемещаться изображение при приближении предмета к зеркалу? Как оно будет изменяться по высоте?



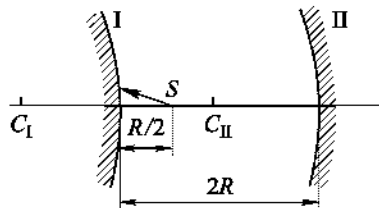
К задаче 22.32

**22.34.** Предмет высотой 20 см помещен на расстоянии 40 см от полюса выпуклого сферического зеркала радиусом кривизны 80 см. Какое и где получится изображение? На каких расстояниях от фокуса находятся предмет и его изображение?

**22.35.** Определить радиус кривизны выпуклого сферического зеркала, если расположенные на главной оптической оси предмет и его изображение удалены от фокуса соответственно на 16 и 9,0 см.

**22.36.** Выпуклое сферическое зеркало с оптической силой  $-5$  дптр дает изображение светящейся точки на расстоянии 0,96 м от нее. Определить расстояния от зеркала до светящейся точки и ее изображения.

**22.37.** Выпуклое и вогнутое зеркала одинаковой кривизны и светящаяся точка расположены на расстояниях, обозначенных на рисунке. На каком расстоянии от точки  $S$  пересекутся с главной оптической осью лучи света после отражения от выпуклого, а затем от вогнутого зеркал?



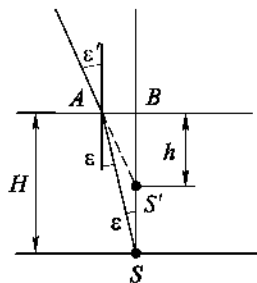
К задаче 22.37

**22.38.** В настоящее время на транспорте наряду с плоскими зеркалами стали применять выпуклые сферические зеркала. Каковы их достоинства и недостатки?

## § 23. Преломление света. Линзы.

### Угол зрения и оптические приборы

**Пример 84.** Пластика с плоскими параллельными гранями изготовлена из прозрачного материала с показателем преломления 1,8. На нижней ее грани нанесена темная точка. Какова толщина пластинки, если наблюдатель, смотрящий сверху вниз, видит эту точку на расстоянии 4,5 см от верхней преломляющей грани (см. рисунок)?



К примеру 84

*Дано:*  $n = 1,8$  — абсолютный показатель преломления материала пластинки;  $h = 4,5 \text{ см} = 4,5 \cdot 10^{-2} \text{ м}$  — расстояние от верхней грани до мнимого изображения точки.

*Найти:*  $H$  — толщину пластинки.

**Решение.** Для определения положения мнимого изображения  $S'$  точки  $S$  воспользуемся двумя лучами, исходящими от точки  $S$ , один из которых перпендикулярен преломляющей поверхности, а другой падает на поверхность раздела сред под таким малым углом  $\epsilon$ , что после выхода из пластинки оба они попадают в глаз наблюдателя. В этом случае наблюдатель видит изображение точки на пересечении продолжения лучей на расстоянии  $h$  от верхней грани. Соотношение между действительной и кажущейся толщиной пластинки получим из рассмотрения подобия треугольников  $SAB$  и  $S'AB$ :

$$AB = H \operatorname{tg} \epsilon \quad \text{и} \quad AB = h \operatorname{tg} \epsilon', \quad \text{или} \quad H \operatorname{tg} \epsilon = h \operatorname{tg} \epsilon'.$$

Отсюда

$$\frac{h}{H} = \frac{\operatorname{tg} \epsilon}{\operatorname{tg} \epsilon'}.$$

С учетом того, что углы  $\epsilon$  и  $\epsilon'$  очень малые (для них синусы и тангенсы практически одинаковы) и что свет переходит в среду с меньшей оптической плотностью, можно написать

$$\frac{h}{H} = \frac{\sin \epsilon}{\sin \epsilon'} = \frac{1}{n}.$$

Отсюда

$$H = nh = 1,8 \cdot 4,5 \cdot 10^{-2} \text{ м} = 8,1 \cdot 10^{-2} \text{ м} = 8,1 \text{ см}.$$

*Ответ:*  $H = 8,1 \text{ см}.$

**Пример 85.** Определить угол отклонения луча трехгранной равнобоковой призмой из стекла, если угол падения  $\epsilon_1$  луча равен  $30^\circ$  (см. рисунок). При каком минимальном угле падения на грань  $AB$  свет не выйдет через правую грань? Показатель преломления стекла 1,5. Преломляющий угол призмы  $60^\circ$ .

*Дано:*  $\epsilon_1 = 30^\circ$  — угол падения луча на призму;  $n = 1,5$  — показатель преломления стекла;  $\varphi = 60^\circ$  — преломляющий угол призмы.



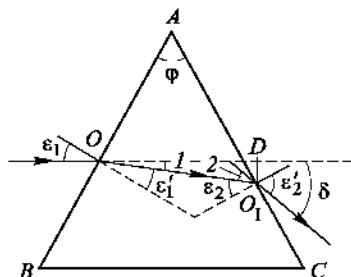
**Найти:**  $\delta$  — угол отклонения луча света призмой;  $\varepsilon_{\min}$  — минимальный угол падения луча, при котором свет не выйдет через правую грань призмы.

**Решение.** Искомый угол  $\delta$  является внешним для треугольника  $ODO_1$  и по известной теореме равен сумме двух углов ( $\angle 1$  и  $\angle 2$ ), с ним не смежных. Так как  $\angle 1 = \varepsilon_1 - \varepsilon'_1$ ,  $\angle 2 = \varepsilon'_2 - \varepsilon_2$ , то можно написать

$$\delta = \varepsilon_1 - \varepsilon'_1 + \varepsilon'_2 - \varepsilon_2$$

или

$$\delta = \varepsilon_1 + \varepsilon'_2 - (\varepsilon'_1 + \varepsilon_2).$$



К примеру 85

Учитывая, что сумма всех углов в треугольнике равна  $180^\circ$ , для треугольника  $OAO_1$  можно написать  $90^\circ - \varepsilon'_1 + 90^\circ - \varepsilon_2 + \varphi = 180^\circ$ . Откуда  $\varphi = \varepsilon'_1 + \varepsilon_2$ ; следовательно,  $\delta = \varepsilon_1 + \varepsilon'_2 - \varphi$ . По закону преломления для грани  $AB$  имеем

$$\frac{\sin \varepsilon_1}{\sin \varepsilon'_1} = n; \quad \sin \varepsilon'_1 = \frac{\sin 30^\circ}{n} = \frac{0,5}{1,5} = 0,333 \dots; \quad \varepsilon'_1 = 19^\circ 28'.$$

Поскольку  $\varepsilon'_1 + \varepsilon_2 = 60^\circ$ , получаем  $\varepsilon_2 = 60^\circ - 19^\circ 28' = 40^\circ 32'$ .

По закону преломления для грани  $AC$  имеем

$$\frac{\sin \varepsilon_2}{\sin \varepsilon'_2} = \frac{1}{n}$$

(свет переходит в среду с меньшей оптической плотностью), откуда  $\sin \varepsilon'_2 = n \sin \varepsilon_2 = 1,5 \cdot 0,6498 = 0,9747$ ;  $\varepsilon'_2 = 77^\circ 4'$ . Вычислим угол смещения:

$$\delta = 30^\circ + 77^\circ 4' - (19^\circ 28' + 40^\circ 32') = 47^\circ 4'.$$

Для решения второй задачи запишем выражение для предельного угла падения луча:

$$\sin \varepsilon_2 = \frac{1}{n} = \frac{1}{1,5} = 0,667, \quad \varepsilon_2 = 41^\circ 50'.$$

Из соотношения  $\varphi = \varepsilon'_1 + \varepsilon_2$  определим угол преломления  $\varepsilon'_1$ :

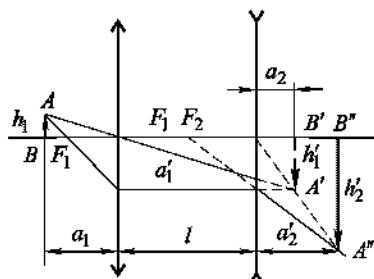
$$\varepsilon'_1 = 60^\circ - 41^\circ 50' = 18^\circ 10'.$$

По закону преломления для грани  $AB$  определим минимальный угол падения:  $\frac{\sin \varepsilon_{\min}}{\sin \varepsilon'_1} = n$ ;  $\sin \varepsilon_{\min} = n \sin 18^\circ 10' = 1,5 \cdot 0,3118 = 0,4677$ ,  $\varepsilon_{\min} = 27^\circ 53'$ .

**Ответ:**  $\delta = 47^\circ 4'$ ,  $\varepsilon_{\min} = 27^\circ 53'$ .

**Пример 86.** Две линзы, изготовленные из стекла с показателем преломления 1,5, расположены так, что имеют общую оптическую ось, а расстояние между их оптическими центрами составляет 1,64 м (см. рисунок). Радиусы кривизны первой двояковыпуклой линзы 0,40

и 1,0 м. Вторая линза выпукло-вогнутая с радиусами кривизны вогнутой поверхности 0,25 м и выпуклой 1,0 м. На расстоянии 0,80 м от



К примеру 86

первой линзы находится предмет  $AB$  высотой 0,20 м, расположенный перпендикулярно главной оптической оси. Определить, где и какое изображение даст оптическая система.

*Дано:*  $n = 1,5$  — показатель преломления стекла;  $R_1 = 0,40$  м,  $R_2 = 1,0$  м — радиусы кривизны поверхностей первой линзы;  $R_3 = -0,25$  м;  $R_4 = 1,0$  м — радиусы кривизны соответственно вогнутой и выпуклой поверхностей второй линзы;  $l = 1,64$  м — расстояние между опти-

ческими центрами линз;  $a_1 = 0,80$  м — расстояние от предмета до первой линзы;  $h_1 = 0,20$  м — высота предмета.

*Найти:*  $a_2'$  — расстояние от второй линзы до изображения;  $\beta_c$  — увеличение, даваемое системой;  $h_2'$  — высоту полученного изображения.

*Решение.* Оптическая сила и фокусное расстояние линз определяются по формуле

$$D = \frac{1}{f} = \left( \frac{n}{n_{\text{ср}}} - 1 \right) \left( \frac{1}{R_1} + \frac{1}{R_2} \right).$$

Когда линза находится в воздухе, для которого  $n_{\text{ср}} \approx 1$ , формула приобретает вид

$$D = \frac{1}{f} = (n - 1) \left( \frac{1}{R_1} + \frac{1}{R_2} \right);$$

$$D_1 = \frac{1}{f_1} = (1,5 - 1) \left( \frac{1}{0,40} + \frac{1}{1,0} \right) = 1,75 \text{ [дптр]}; \quad f_1 = 0,57 \text{ м};$$

$$D_2 = \frac{1}{f_2} = (1,5 - 1) \left( \frac{1}{1,0} - \frac{1}{0,25} \right) = -1,5 \text{ [дптр]}; \quad f_2 = -0,67 \text{ м}.$$

Знак минус указывает на то, что линза рассеивающая. Определим положение изображения, полученного от первой линзы:

$$\frac{1}{f_1} = \frac{1}{a_1} + \frac{1}{a_1'}; \quad a_1' = \frac{f_1 a_1}{a_1 - f_1} = \frac{0,57 \cdot 0,80}{0,80 - 0,57} \frac{\text{м}^2}{\text{м}} = 1,98 \text{ м}.$$

Изображение предмета действительное, поскольку  $a_1' > 0$ .

Найдем линейное увеличение изображения и его высоту

$$\beta_1 = \frac{a_1'}{a_1} = \frac{h_1'}{h_1} = \frac{1,98 \text{ м}}{0,80 \text{ м}} = 2,48; \quad h_1' = \beta_1 h_1 = 2,48 \cdot 0,20 \text{ м} \approx 0,5 \text{ м}.$$

Расстояние  $a_2$  от первого изображения до второй линзы равно

$$a_2 = l - a_1' = 1,64 \text{ м} - 1,98 \text{ м} = -0,34 \text{ м}.$$

Знак минус означает, что первое изображение следует считать мнимым предметом для второй линзы. Определим по отношению к ней расстоя-

ние до второго изображения  $a'_2$ , при этом все величины в формулах берем со своими знаками:

$$\frac{1}{f_2} = \frac{1}{a_2} + \frac{1}{a'_2}; \quad a'_2 = \frac{f_2 a_2}{a_2 - f_2} = \frac{-0,67 \cdot (-0,34)}{-0,34 - (-0,67)} \frac{\text{м}^2}{\text{м}} = 0,69 \text{ м}.$$

Найдем линейное увеличение изображения и его высоту, даваемые второй линзой:

$$\beta_2 = \frac{a'_2}{a_2} = \frac{h'_2}{h'_1} = \frac{0,69 \text{ м}}{-0,34 \text{ м}} = -2; \quad h'_2 = \beta_2 h'_1 = -2 \cdot 0,5 \text{ м} = -1 \text{ м}.$$

В данном случае знак минус означает, что полученное изображение является прямым по отношению к первому изображению, т. е. направлено в ту же сторону.

Определим увеличение, даваемое системой:

$$\beta_c = \frac{h'_2}{h_1} = \frac{1 \text{ м}}{0,20 \text{ м}} = 5.$$

Покажем, что  $\beta_c = \beta_1 \beta_2$ :

$$\beta_c = \frac{h'_2}{h_1} = \frac{h'_1 h'_2}{h_1 h'_1} = \beta_1 \beta_2; \quad \beta_c = 2,48 \cdot 2 \approx 5.$$

Ответ:  $\beta_c \approx 5$ ;  $h'_2 = -1 \text{ м}$ ;  $a'_2 = 0,69 \text{ м}$ .

## Преломление света

**23.1.** В каких случаях граница раздела двух прозрачных сред невидима?

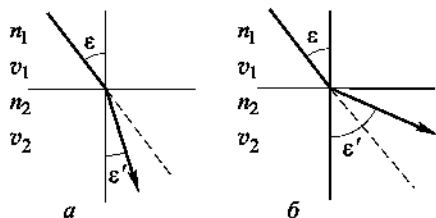
**23.2.** Луч света переходит из вакуума в прозрачную среду. Может ли он приблизиться к границе раздела, если среда изотропная?

**23.3.** Угловую высоту Солнца над горизонтом одновременно определяют два наблюдателя: первый, погрузившись на дно водоема, и второй, находящийся на его берегу. Для кого из них Солнце будет казаться выше?

**23.4.** Определить абсолютный показатель преломления для льда и скорость света в нем, если углы падения и преломления соответственно равны  $30^\circ$  и  $22^\circ 26'$ .

**23.5.** В некоторой прозрачной среде свет распространяется со скоростью  $225 \cdot 10^3 \text{ км/с}$ . Определить угол падения светового луча из вакуума на границу раздела с этой средой, если угол преломления равен  $24^\circ 51'$ .

**23.6.** Оптические плотности двух прозрачных сред равны  $n_1$  и  $n_2$ . Как связаны оптические плотности сред и скорости света в них, если преломленный луч идет, как показано на рисунках *a* и *б*?



К задаче 23.6

**23.7.** Луч света падает на границу раздела двух прозрачных сред под углом  $37^\circ$ , а преломляется под углом  $24^\circ$ . Определить показатель преломления второй среды относительно первой. Какая среда более оптически плотная? Как и на сколько изменится угол преломления, если угол падения светового луча увеличится на  $8^\circ$ ?

**23.8.** Свет переходит из среды, в которой его скорость равна  $194 \cdot 10^3$  км/с, в среду с оптической плотностью 2,42. Определить показатель преломления второй среды относительно первой и скорость света во второй среде.

**23.9.** Луч света переходит из стекла (легкий крон) в воду. Определить угол преломления, если угол падения на границу раздела сред равен  $45^\circ$ .

**23.10.** Луч света переходит из воды в кварцевое стекло и образует с границей раздела этих сред в воде угол  $36^\circ$ , а в стекле — угол  $45^\circ 40'$ . Определить показатель преломления кварцевого стекла относительно воды, уменьшение скорости света и длины световой волны при этом переходе, абсолютный показатель преломления кварцевого стекла и скорость света в нем.

**23.11.** Находясь в воде, аквалангист установил, что направление на Солнце образует с вертикалью угол  $28^\circ$ . На сколько ниже окажется Солнце для нырнувшего аквалангиста?

**23.12.** Под каким углом падает луч света из воздуха на поверхность воды, если угол, образованный отраженным и преломленным лучами, равен  $90^\circ$ ?

**23.13.** При переходе луча света из воздуха в ацетон отраженный и преломленный лучи образуют угол  $120^\circ$ . Определить угол преломления луча.

**23.14.** Почему трудно попасть в рыбу, стреляя в нее из ружья с берега, если она находится на глубине нескольких десятков сантиметров от поверхности воды?

**23.15.** Вбитый в дно пруда шест достигает поверхности воды. Как и на сколько изменится длина тени на горизонтальной поверхности дна, если высота Солнца над горизонтом увеличится от  $30$  до  $40^\circ$ ? Глубина пруда  $2,0$  м.

**23.16.** Вертикальный столб вбит в дно реки глубиной  $4,0$  м и на  $1,00$  м выступает из воды. Определить угловую высоту Солнца над горизонтом и длину тени на дне, если она длиннее тени на поверхности воды на  $2,208$  м.

**23.17.** Доказать, что кажущаяся глубина водоема при рассматривании его дна под малым углом от вертикали составляет  $3/4$  его истинной глубины. Как изменяется кажущаяся глубина при увеличении этого угла?

**23.18.** Светящаяся точка находится на расстоянии  $50$  см от глаза. На каком расстоянии человек увидит изображение светящейся точки, если между ней и глазом поместить стеклянную пластинку толщиной  $10$  см с показателем преломления  $1,5$ ?

**23.19.** В воздухе на расстоянии 2,4 м от поверхности воды находится точечный источник света. На каком расстоянии над поверхностью воды находится изображение источника для наблюдателя, погруженного в воду? Каким будет изображение источника?

**23.20.** В ванночку с зеркальным дном налит слой воды толщиной 12 см. На каком расстоянии от поверхности наблюдатель увидит в воде изображение источника света, находящегося на высоте 40 см над поверхностью воды?

**23.21.** Предмет находится на расстоянии 0,9 м от стеклянной пластинки с параллельными гранями, тыльная сторона которой посеребрена. Определить расстояние от предмета до его мнимого изображения, если толщина пластинки 15 см и показатель преломления стекла 1,5.

**23.22.** В сосуд с зеркальным дном налиты две прозрачные несмешивающиеся жидкости: внизу слой жидкости толщиной 6,0 см с показателем преломления 1,5, выше слой толщиной 5,6 см с показателем преломления 1,4. На каком расстоянии от поверхности жидкости находится источник света, если расстояние от него до его мнимого изображения равно 76 см?

**23.23.** В каком случае может наблюдаться полное отражение? В чем оно проявляется?

**23.24.** Почему имеющиеся в воде мелкие пузырьки воздуха кажутся зеркальными? Пустая стеклянная пробирка, частично погруженная в воду под некоторым углом к ее поверхности, тоже кажется зеркальной. Почему? Сохранится ли этот эффект при заполнении пробирки водой?

**23.25.** Световоды изготовлены в виде тонких нитей из чистого кварца, покрытого веществом с меньшим показателем преломления. Почему свет не выходит через боковую поверхность изогнутого световода?

**23.26.** В чем преимущество передачи информации по световодам по сравнению с передачей по металлическим проводникам?

**23.27.** Определить предельный угол падения для граничащих сред: вода–воздух; сероуглерод–воздух.

**23.28.** Определить предельный угол падения для прозрачной среды, граничащей с воздухом, если скорость света в ней  $2,0 \cdot 10^8$  м/с.

**23.29.** Луч света падает на границу раздела стекло–воздух под углом  $44^\circ$ . Выйдет ли он в воздух? Показатель преломления стекла равен 1,6.

**23.30.** Свет распространяется в среде со скоростью  $v$ . При каком угле падения на границу с воздухом луч света останется в среде?

**23.31.** На границу раздела двух сред луч света падает под углом  $50^\circ$ , а преломляется под углом  $30^\circ$ . Возможно ли при таком переходе полное отражение? Под каким углом свет выйдет в первую среду, если из второй его направить на границу раздела под углом  $50^\circ$ ?

**23.32.** Свет, падающий на границу раздела двух прозрачных сред, испытывает полное отражение при углах падения  $\epsilon \geq 56^\circ 14'$ . Определить скорость света во второй среде; абсолютные показатели прелом-

ления сред и относительный показатель преломления. Скорость света в первой среде  $1,88 \cdot 10^8$  м/с.

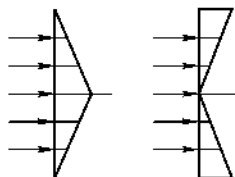
**23.33.** Свет от точечного источника, находящегося на дне водоема, образует на поверхности воды над источником круглое освещенное пятно радиусом 11,4 м. Определить глубину водоема.

**23.34.** Точечный источник света, находящийся на дне водоема, ярче освещает отраженным от поверхности воды светом участки горизонтального дна, расположенные не ближе  $SA = 23$  м от источника. Какова глубина водоема  $H$ ? На каком наименьшем расстоянии от водолаза  $EA$ , находящегося на дне, расположены участки дна, которые он четко видит в свете, отраженном от поверхности воды, если рост водолаза  $h = 1,7$  м?

**23.35.** Луч света падает на пластинку с параллельными гранями под углом  $60^\circ$ . На сколько сместится луч от первоначального направления после преломления в пластинке? Толщина пластинки 5,0 см. Показатель преломления 1,6. Под каким углом луч выйдет в воздух?

**23.36.** Луч, падающий на пластинку с параллельными гранями, пройдя в ней путь 11,6 см, выходит под углом  $50^\circ$ . Определить, под каким углом луч света падает на пластину. На сколько сместится он от первоначального направления? Чему равен показатель преломления? Толщина пластинки 10 см.

**23.37.** Две плоскопараллельные пластины сложены вплотную. На верхнюю пластинку с показателем преломления 1,5 падает луч света под углом  $45^\circ$ . Определить угол преломления луча при выходе из пластины с показателем преломления 1,8. Чему будет равен этот угол, если нижняя пластинка будет касаться воды?



К задаче 23.39

**23.38.** Всегда ли луч света, проходящий через призму, смещается к ее основанию?

**23.39.** Видимое излучение одной длины волны падает на призмы, как показано на рисунке. Как пойдут лучи после прохождения через призмы в случаях  $n_{\text{пр}} > n_{\text{ср}}$ ;  $n_{\text{пр}} < n_{\text{ср}}$ ?

**23.40.** На трехгранную призму с преломляющим углом  $50^\circ$  падает луч света под углом  $40^\circ$ . Под каким углом луч выйдет из призмы, если показатель преломления стекла, из которого она изготовлена 1,54? На сколько сместится луч от первоначального направления?

**23.41.** Призма с преломляющим углом  $60^\circ$  изготовлена из стекла с показателем преломления 1,5. Определить угол падения луча света на боковую грань, если после преломления в призме луч шел вдоль боковой грани. На сколько сместится луч от первоначального направления?

**23.42.** Луч света, падающий на прямоугольную стеклянную призму с преломляющим углом  $35^\circ$  перпендикулярно ее грани, после прохождения через призму смещается на  $25^\circ$ . Определить показатель преломления стекла.

**23.43.** Свет падает на равнобочную трехгранную призму из воздуха и после преломления в призме входит в воду, граничащую с другой (правой) ее гранью. Определить, под каким углом луч света входит в воду. Насколько сместится луч от первоначального направления? Показатель преломления стекла 1,6.

**23.44.** Луч света падает на прямоугольную трехгранную призму с преломляющим углом  $3,2^\circ$  перпендикулярно ее боковой грани. На сколько сместится от первоначального направления луч света после прохождения через призму? Показатель преломления стекла 1,6.

### Линзы собирающие и рассеивающие

**23.45.** Определить оптическую силу собирающих линз с фокусными расстояниями 10 и 40 см и рассеивающих линз с фокусными расстояниями 12,5 и 50 см.

**23.46.** Определить фокусные расстояния линз с оптической силой 2, 10,  $-5$ ,  $-8$  дптр.

**23.47.** На линзу падают лучи параллельно главной оптической оси. Где пересекутся лучи после преломления в линзе с оптической силой 10 дптр? Как пойдут лучи после преломления, если оптическая сила линзы  $-10$  дптр?

**23.48.** На пути лучей, параллельных главной оптической оси, расположены две линзы, имеющие общую оптическую ось. На каком расстоянии нужно расположить линзы, чтобы после преломления в них лучи остались параллельными? Оптическая сила первой линзы 5 дптр, второй 10 дптр. Каким было бы расстояние до второй линзы с оптической силой  $-8$  дптр?

**23.49.** Определить оптическую силу и главное фокусное расстояние двояковыпуклой линзы из стекла с показателем преломления 1,6. Радиусы кривизны поверхности линзы 20 и 50 см.

**23.50.** Определить оптическую силу и радиус кривизны плоско-выпуклой линзы с фокусным расстоянием 1,0 м, изготовленной из стекла с показателем преломления 1,5. На каком расстоянии после преломления в линзе пересекутся лучи, падающие узким параллельным пучком вблизи главной оптической оси?

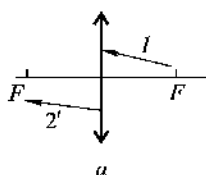
**23.51.** Линза с радиусами кривизны выпуклой поверхности 40 см и вогнутой 20 см изготовлена из стекла с показателем преломления 1,8. Какая это линза? Какое и где получится изображение светящейся точки, расположенной на главной оптической оси на расстоянии 0,50 м от линзы?

**23.52.** Двояковыпуклая линза с радиусами кривизны 20 см изготовлена из стекла с показателем преломления 1,5. Определить оптическую силу этой линзы в воде и в сероуглероде.

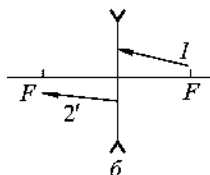
**23.53.** Линза, изготовленная из стекла с показателем преломления 1,5, имеет в воздухе главное фокусное расстояние 10 см. Определить оптическую силу и фокусное расстояние в воде.

**23.54.** Может ли вогнутая линза быть собирающей, а выпуклая рассеивающей?

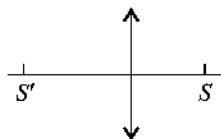
**23.55.** Как пойдут лучи света  $1$  после преломления в линзах (см. рисунок). Как шли лучи света  $2$  до преломления в линзах?



а



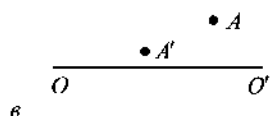
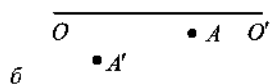
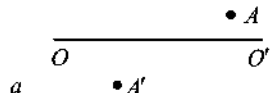
б



К задаче 23.55

К задаче 23.56

**23.56.** На рисунке показаны положения линзы, главной оптической оси, светящейся точки  $S$ , и ее изображения  $S'$ . Найти построением положения главных фокусов линзы.



К задаче 23.57

**23.57.** На рисунке показаны положения главных оптических осей  $OO'$ , светящихся точек  $A$  и их изображения  $A'$ . Какие линзы (собирающие или рассеивающие) соответствуют рисункам а, б, в? Определить положение линз и их главных фокусов.

**23.58.** Предмет высотой 10 см находится на расстоянии 30 см от собирающей линзы с фокусным расстоянием 20 см. Определить, на каком расстоянии и какое получится изображение; его высоту, линейное увеличение и оптическую силу линзы.

**23.59.** Предмет и его изображение находятся по обе стороны линзы на расстоянии 40 см от нее. На каком расстоянии и какое получится изображение светящейся точки, лежащей на главной оптической оси на расстоянии 30 см от линзы? Какова оптическая сила линзы?

**23.60.** Собирающая линза дает на экране изображение, увеличенное в 20 раз. Определить фокусное расстояние и оптическую силу линзы. Расстояние от экрана до линзы 6,3 м.

**23.61.** Собирающая линза дает действительное, увеличенное в два раза изображение на расстоянии 1,8 м от предмета. На каком расстоянии нужно поместить предмет, чтобы получить его действительное и равное изображение?

**23.62.** Свеча находится на расстоянии 1,0 м от экрана. Когда на расстоянии 20 см от свечи поместили собирающую линзу, на экране появилось изображение свечи. При каком другом положении линзы на экране вновь будет отчетливое изображение свечи? Во сколько раз будут различаться изображения по высоте?



**23.63.** На каком расстоянии от плосковыпуклой линзы с радиусом кривизны 40 см, изготовленной из стекла с показателем преломления 1,5, нужно поместить предмет на главной оптической оси, чтобы получить изображение, уменьшенное в четыре раза?

**23.64.** Расстояние от предмета до экрана 1,8 м. На каком расстоянии между ними следует поместить собирающую линзу с фокусным расстоянием 0,40 м, чтобы на экране получилось действительное изображение? Чему равны при этом линейные увеличения?

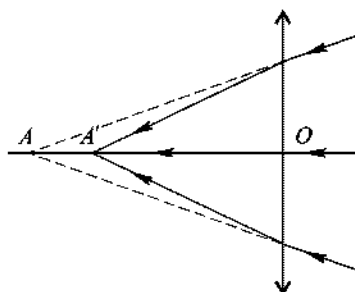
**23.65.** Предмет находится на расстоянии 25 см от экрана. Его четкое изображение на экране получается при двух положениях линзы, расстояние между которыми 5,0 см. Определить фокусное расстояние линзы и увеличение изображения в этих случаях. Считать, что в первом случае линза располагается ближе к предмету.

**23.66.** На экране, расположенном на расстоянии 5,5 м от собирающей линзы, площадь изображения в 100 раз больше площади проецируемого предмета. Определить оптическую силу и фокусное расстояние линзы. На каком расстоянии от линзы находится предмет?

**23.67.** Объектив проекционного аппарата имеет оптическую силу 5,4 дптр. Расстояние от экрана до объектива 4,0 м. Определить размеры экрана, на котором поместится изображение диапозитива размером  $6 \times 9$  см.

**23.68.** При фотографировании предмета с расстояния 10 м на пленке получилось изображение высотой 8,04 мм, а при фотографировании с расстояния 3,0 м — высотой 27,1 мм. Определить фокусное расстояние объектива.

**23.69.** Если на пути сходящихся в точке  $A$  лучей (см. рисунок) поместить собирающую линзу на расстоянии 40 см от точки  $A$ , то лучи пересекутся в точке  $A'$ , находящейся на расстоянии 30 см от линзы. Определить ее главное фокусное расстояние.



К задаче 23.69

**23.70.** Предмет равномерно перемещается вдоль главной оптической оси к собирающей линзе с фокусным расстоянием 20 см и за 10 с с расстояния 60 см приближается на 36 см.

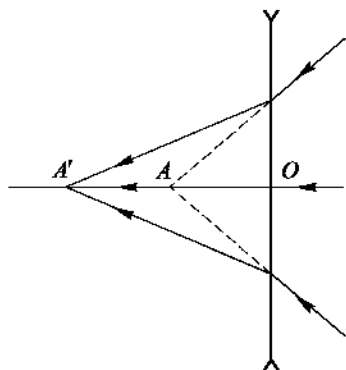
С какой средней скоростью и куда перемещается изображение?

**23.71.** При фотографировании пули, летящей перпендикулярно главной оптической оси, с расстояния 2,0 м размытость изображения составила 0,05 мм. В момент съемки пуля находилась на главной оптической оси объектива с главным фокусным расстоянием 50,0 мм. Определить скорость пули, если экспозиция при съемке была  $2,25 \cdot 10^{-6}$  с.

**23.72.** Предмет высотой 20 см удален на 30 см от линзы с оптической силой  $-5$  дптр. Определить, какое изображение и на каком расстоянии дает линза.

**23.73.** Линза дает прямое, уменьшенное в два раза изображение предмета на расстоянии 4,0 см от нее. Какая это линза? Чему равно ее фокусное расстояние? На каком удалении от линзы находится предмет?

**23.74.** Линза дает прямое, уменьшенное в два раза изображение, находящееся на расстоянии 10 см от предмета. Какая это линза? Определить ее оптическую силу и фокусное расстояние.



К задаче 23.76

**23.75.** Можно ли, имея рассеивающую линзу, получить сходящийся пучок лучей света?

**23.76.** Пучок сходящихся лучей собирается в точке  $A$  (см. рисунок). Если на их пути поместить рассеивающую линзу на расстоянии 30 см от точки  $A$ , то лучи пересекутся в точке  $A'$  на расстоянии 60 см от линзы. Определить ее главное фокусное расстояние.

**23.77.** Тонкие линзы с оптической силой 3 и  $-2$  дптр, сложенные вплотную, имеют общую оптическую ось. На каком расстоянии от них нужно поместить предмет, чтобы получить действительное и равное изображение?

**23.78.** Линза с оптической силой 5,0 дптр дает действительное изображение светящейся точки, расположенной на главной оптической оси, на расстоянии 60 см от линзы. Когда к линзе приложили вплотную другую линзу так, что их оптические оси совпали, действительное изображение приблизилось на 38,6 см. Определить оптическую силу второй линзы.

**23.79.** Рассеивающая линза с оптической силой  $-2$  дптр и собирающая с фокусным расстоянием 20 см сложены вплотную. Определить оптическую силу системы линз. Как и на сколько она изменится, если линзы раздвинуть на 40 см?

**23.80.** С помощью фотоаппарата с фокусным расстоянием объектива 5,0 см можно фотографировать с минимального расстояния 1,0 м. Какой толщины переходное кольцо нужно поставить между объективом и корпусом для фотографирования с расстояния 0,20 м?

**23.81.** Близорукий человек без очков читает мелкий шрифт не далее 20 см. Определить оптическую силу необходимых ему очков для чтения.

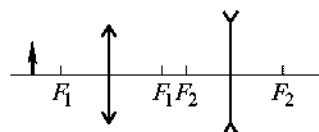
**23.82.** Определить оптическую силу очков для дальновзорного человека с ближней точкой аккомодации глаза 50 см.

**23.83.** Объектив фотоаппарата позволяет фотографировать с минимального расстояния 1,0 м. Определить оптическую силу тонкой линзы, которую нужно приставить вплотную к объективу, чтобы фотографировать с расстояния 20 см.

**23.84.** Рассеивающая и собирающая линзы с фокусными расстояниями соответственно  $-10$  и  $15$  см имеют общую оптическую ось. Слева от рассеивающей линзы на расстоянии  $10$  см находится предмет, а справа на расстоянии  $15$  см от нее — собирающая линза. Где получится изображение и каково его увеличение?

**23.85.** Две тонкие собирающие линзы с фокусным расстоянием  $4,0$  см, расположенные на расстоянии  $4,0$  см одна от другой, имеют общую оптическую ось. На расстоянии  $5,0$  см от первой линзы на главной оптической оси находится светящаяся точка. Где будет ее изображение после преломления света в первой и второй линзах? Каким было бы линейное увеличение, если на место светящейся точки поместить предмет?

**23.86.** Собирающая и рассеивающая линзы с фокусными расстояниями соответственно  $20$  и  $-20$  см удалены на  $50$  см одна от другой. Предмет высотой  $5,0$  см находится на расстоянии  $30$  см от собирающей линзы (см. рисунок). Где и какое изображение дает оптическая система? Какова его высота?

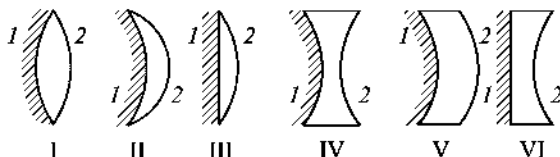


К задаче 23.86

**23.87.** Светящаяся точка находится на главной оптической оси собирающей линзы с фокусным расстоянием  $20$  см на расстоянии  $30$  см от нее. Перпендикулярно главной оптической оси в  $50$  см справа от линзы расположено плоское зеркало. Какое и где получится изображение светящейся точки после отражения лучей в зеркале и повторного преломления в линзе?

**23.88.** Светящаяся точка находится на главной оптической оси линзы с фокусным расстоянием  $6,0$  см в  $10,0$  см от нее. На сколько изменится расстояние от линзы до изображения, если между светящейся точкой и линзой перпендикулярно оси поместить плоскопараллельную пластинку толщиной  $6,0$  см из стекла с показателем преломления  $1,5$ ?

**23.89.** Линзы I–VI (см. рисунок) изготовлены из стекла с показателем преломления  $n$ . Радиусы кривизны поверхностей  $R_1$  и  $R_2$ . Одна из сторон линзы посеребрена. Определить оптическую силу системы линза–зеркало.



К задаче 23.89

из сторон линзы посеребрена. Определить оптическую силу системы линза–зеркало.

**23.90.** Предмет удален от плоского зеркала на  $30$  см. Какое и где получится изображение, если вплотную к зеркалу поместить тонкую

собирающую линзу с фокусным расстоянием 40 см? Рассеивающую с оптической силой  $-2,5$  дптр?

**23.91.** В вогнутое сферическое зеркало радиусом кривизны 40 см налит тонкий слой воды. На главной оптической оси зеркала в 30 см от него находится светящаяся точка. Где получится ее изображение?

### Угол зрения. Оптические приборы

**23.92.** В каком случае глаз не может разделить зрительные впечатления от двух элементов какого-либо предмета?

**23.93.** На каком расстоянии от человека находится дом высотой 14 м, если он видим под углом зрения  $11^\circ$ ?

**23.94.** Почему, когда мы смотрим на Солнце, Луну, звезды нам кажется, что удалены они от нас одинаково? Почему видимые размеры Солнца и Луны одинаковы?

**23.95.** Лупа изготовлена из стекла с показателем преломления 1,8. Радиусы кривизны поверхностей линзы одинаковы и равны 10 см. Определить увеличение лупы, когда глаз аккомодирован на бесконечность. Как изменится увеличение, если этой лупой воспользуется человек, обладающий близорукостью?

**23.96.** При пользовании лупой достигается увеличение угла зрения. Почему же нельзя создать это увеличение, приближая предмет и рассматривая его невооруженным глазом?

**23.97.** Найти фокусное расстояние и оптическую силу лупы с шестикратным увеличением, если глаз аккомодирован на расстояние наилучшего зрения.

**23.98.** Линза с оптической силой 24 дптр используется как лупа. Определить, какого увеличения можно достичь, если глаз аккомодирован на расстояние наилучшего зрения.

**23.99.** В микроскопе с 400-кратным увеличением использован окуляр с оптической силой 20 дптр, аккомодированный на расстояние наилучшего зрения. Определить увеличение, даваемое объективом.

**23.100.** Длина тубуса микроскопа 16 см. Главные фокусные расстояния объектива и окуляра соответственно равны 4,0 мм и 2,0 см. Определить увеличение микроскопа для нормального зрения.

**23.101.** Главное фокусное расстояние объектива микроскопа 3,0 мм, окуляра 5,0 см. Предмет удален от объектива на 3,1 мм. Определить увеличение микроскопа для нормального зрения и длину тубуса.

**23.102.** Микроскоп дает увеличение в 600 раз. Фокусное расстояние объектива 4,0 мм. Предмет отстоит от объектива на 4,1 мм. Определить фокусное расстояние окуляра, аккомодированного на расстояние наилучшего зрения; увеличение окуляра; длину тубуса микроскопа.

**23.103.** Разрешающая способность микроскопа (и других оптических приборов) определяется как величина, обратная тому наименьшему расстоянию, на котором два соседних элемента наблюдаемого объекта будут видны раздельно. Чем объясняется существование предела

разрешающей способности, а следовательно, полезного увеличения не более 1000 раз?

**23.104.** Какое увеличение дает зрительная труба, у которой фокусные расстояния объектива и окуляра соответственно равны 1,2 м и 2,0 см?

**23.105.** Труба Кеплера, имея длину 15 м, дает увеличение в 249 раз. Определить фокусные расстояния окуляра и объектива.

**23.106.** С помощью зрительной трубы, фокусное расстояние объектива которой равно 25 см, наблюдатель отчетливо видит предметы, находящиеся на расстоянии 30 м от объектива. На какое расстояние и как потребуется передвинуть окуляр, чтобы установить трубу на бесконечность?

**23.107.** Невооруженным глазом полная Луна видна под углом  $31'$ . Под каким углом зрения будет видна Луна, если ее рассматривать в телескоп, у которого фокусные расстояния объектива и окуляра соответственно равны 1,5 м и 10 см?

## § 24. Фотометрия

**Пример 87.** Поверхность круглого стола освещается лампой в 100 кд, подвешенной над его центром на высоте 4,2 м (см. рисунок). Диаметр стола 1,8 м. Определить освещенность у края стола и в точке  $O$ . Как и во сколько раз изменится освещенность в этой точке, если на стене укрепить плоское зеркало так, чтобы оно отражало свет в точку  $O$ ? Точки  $B$  и  $O$  удалены от лампы одинаково. Считать зеркало идеально отражающим свет.

*Дано:*  $I = 100$  кд — сила света лампы;  $h = 1,2$  м — расстояние от лампы до центра стола;  $D = 1,8$  м — диаметр стола;  $SO = SB$ .

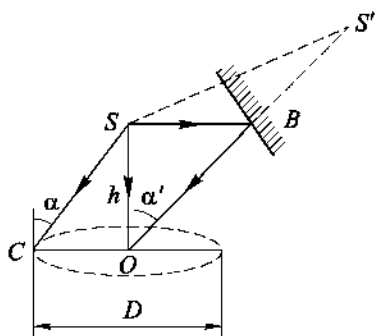
*Найти:*  $E_C$  и  $E_O$  — освещенности на краю стола и в его центре;  $E'_O/E_O$  — изменение освещенности в центре стола при наличии зеркала.

*Решение.* Освещенность  $E_C$  на краю стола можно найти, используя второй закон освещенности:

$$E_C = \frac{I}{(SC)^2} \cos \alpha,$$

где  $SC = \sqrt{h^2 + (0,5D)^2} = 1,5$  м и  $\cos \alpha = (h/SC) = 0,8$ . Произведя вычисления, получим

$$E_C = \frac{100}{2,25} \cdot 0,8 \frac{\text{кд}}{\text{м}^2} = 35 \text{ лк.}$$



К примеру 87

Для определения освещенности  $E_O$  в центре стола запишем первый закон освещенности и, подставив данные из условия задачи, произведем вычисления

$$E_O = \frac{I}{h^2} = \frac{100 \text{ кд}}{1,44 \text{ м}^2} \approx 70 \text{ лк.}$$

При наличии плоского зеркала поверхность стола дополнительно освещается мнимым изображением источника света в плоском зеркале. Следовательно,

$$E'_O = \frac{I}{h^2} + \frac{I}{(S'O)^2} \cos \alpha'.$$

Вследствие симметрии  $S$  и  $S'$  треугольник  $SBS'$  будет равнобедренным, в котором  $SB = BS' = h$ . Так как  $\alpha' = 45^\circ$  и  $BO = h\sqrt{2}$ , получаем

$$E'_O = \frac{I}{h^2} + \frac{I}{(h + h\sqrt{2})^2} \cos \alpha',$$

или

$$E'_O = \frac{I}{h^2} \left[ 1 + \frac{\sqrt{2}}{2(1 + \sqrt{2})^2} \right] = 1,12 \frac{I}{h^2}.$$

Ответ на вопрос задачи получим, взяв отношение  $E'_O$  и  $E_O$ :

$$E'_O/E_O = 1,12.$$

Ответ:  $E_C = 35$  лк;  $E_O = 70$  лк;  $E'_O/E_O = 1,12$  раз.

**24.1.** Определить центральный телесный угол, вырезающий на поверхности шара площадь  $3,2 \cdot 10^3 \text{ см}^2$ . Радиус шара  $0,80 \text{ м}$ .

**24.2.** Центральный телесный угол  $1,5 \text{ ср}$  вырезает на поверхности шара площадь  $0,54 \text{ м}^2$ . Чему равен радиус шара?

**24.3.** Центральный телесный угол вырезает на поверхности шара радиусом  $30 \text{ см}$  площадь  $360 \text{ см}^2$ . Какую площадь вырежет он на поверхности шара, радиус которого больше в  $1,5$  раза? Определить этот угол.

**24.4.** Определить силу света точечного источника, испускающего внутрь телесного угла  $0,35 \text{ ср}$  световой поток  $42 \text{ лм}$ .

**24.5.** Точечный источник света, помещенный в центре сферы радиусом  $0,80 \text{ м}$ , посылает световой поток  $55 \text{ лм}$  на поверхность сферы площадью  $4,4 \cdot 10^3 \text{ см}^2$ . Определить силу света источника и полный световой поток, испускаемый им.

**24.6.** Точечный источник света в  $60 \text{ кд}$  расположен в центре полый сферы радиусом  $0,60 \text{ м}$ . Определить световой поток, падающий на внутреннюю поверхность сферы площадью  $100 \text{ см}^2$ ; телесный угол, который ограничивает этот поток; полный световой поток, испускаемый источником света.

**24.7.** Полный световой поток от точечного источника света, находящегося в центре сферы, равен  $1256 \text{ лм}$ . Определить силу света источника; световой поток, посылаемый им внутрь телесного угла в  $0,25 \text{ ср}$ ; площадь, которую вырезает этот угол на поверхности сферы радиусом  $60 \text{ см}$ .

**24.8.** В центре полой сферы радиусом 80 см находится источник, сила света которого 40 кд. Определить световой поток, падающий на внутреннюю поверхность сферы площадью  $320 \text{ см}^2$ , и ее освещенность.

**24.9.** В кинопроекторе используется лампа, сила света которой 500 кд. Определить, какой будет освещенность экрана площадью  $5 \text{ м}^2$ , если на него попадет 0,4% полного светового потока, идущего от лампы.

**24.10.** Световая эффективность лампочки накаливания мощностью 25 Вт составляет 9,0 лм/Вт. Определить полный световой поток, излучаемый ею, и среднюю силу света лампочки.

**24.11.** Полный световой поток, испускаемый лампой накаливания мощностью 40 Вт, составляет 380 лм. При той же мощности световой поток от люминесцентной лампы приблизительно равен 1700 лм. Определить световую эффективность (световую отдачу) ламп. Какая из них экономичнее?

**24.12.** Лампа накаливания мощностью 100 Вт имеет световую эффективность 12,75 лм/Вт. Какова средняя освещенность поверхности площадью  $1,8 \text{ м}^2$ , если на нее попадает 25% светового потока, излучаемого лампой?

**24.13.** Сила света поверхности расплавленной платины в направлении, перпендикулярном этой поверхности, составляет 30 кд. Определить яркость поверхности. Площадь поверхности платины равна  $0,50 \text{ см}^2$ .

**24.14.** Определить силу света горящей стеариновой свечи, если яркость ее пламени составляет  $5 \cdot 10^3 \text{ кд/м}^2$ , а площадь поперечного сечения пламени равна  $2 \text{ см}^2$ .

**24.15.** Точечный источник с силой света  $I$ , освещающий темную комнату, расположен к одной стене в два раза ближе, чем к противоположной. Каково отношение освещенностей поверхностей этих стен нормально падающими лучами?

**24.16.** На высоте 1,4 м над столом висит лампа, сила света которой 100 кд. Определить освещенность поверхности стола под лампой. Как и во сколько раз изменится освещенность в той же точке, если лампу опустить на 20 см?

**24.17.** Поверхность стола освещается лампой мощностью 60 Вт со световой эффективностью 11,9 лм/Вт. После того как лампа перегорела, ее заменили другой — мощностью 40 Вт со световой эффективностью 10 лм/Вт. Как потребуются изменить расстояние от лампы до поверхности стола, чтобы его освещенность под лампой не изменилась?

**24.18.** С помощью пружины, длина которой в нерастянутом состоянии 70 см, подвешен в лифте точечный источник света массой 80 г и силой света 50 кд. Расстояние от точки подвеса пружины до пола лифта 2,2 м. Определить освещенность пола под источником при движении лифта вверх с ускорением  $2,2 \text{ м/с}^2$ . Жесткость пружины равна  $3,2 \text{ Н/м}$ , а ускорение свободного падения  $9,8 \text{ м/с}^2$ .

**24.19.** Освещенность книги солнечными лучами, падающими перпендикулярно ее поверхности, равна 40 лк. Какой будет освещенность, если книгу повернуть на угол  $30^\circ$ ?

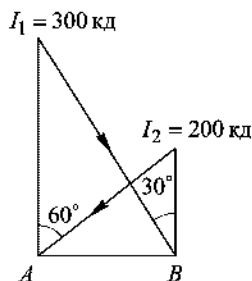
**24.20.** Освещенность плоской поверхности в ближайшей к точечному источнику точке составляет 120 лк. Определить освещенность поверхности в точках, в которые свет падает под углом  $60^\circ$ .

**24.21.** Лампа накаливания висит над центром круглого стола на такой высоте, что лучи, падающие на край стола, образуют с вертикалью угол  $53^\circ$  и при этом создают освещенность 64,5 лк. Диаметр стола 1,6 м. Определить силу света лампы, принимая ее за точечный источник; световой поток, распределенный на площади стола; мощность лампы, если ее световая эффективность 13,5 лм/Вт.

**24.22.** Какую освещенность поверхности Земли создадут лучи Солнца, находящегося в зените, если его яркость  $1,5 \cdot 10^9$  кд/м<sup>2</sup>. Принять диаметр солнечного диска равным  $1,4 \cdot 10^6$  км, а расстояние от Земли до Солнца  $1,5 \cdot 10^8$  км.

**24.23.** Угловая высота Солнца над горизонтом  $26^\circ$ . В каком случае и во сколько раз освещенность площадки будет больше, если ее расположить горизонтально? вертикально?

**24.24.** Угловая высота Солнца над горизонтом 22 июня (в день летнего солнцестояния) в Петербурге  $53^\circ 30'$ , а 22 декабря (в день зимнего солнцестояния)  $6^\circ 30'$ . Найти, во сколько раз меняется освещенность поверхности Земли в эти дни.



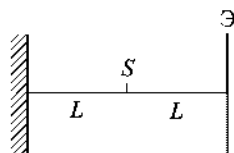
К задаче 24.26

**24.25.** Для освещения двора на столбе высотой 6 м повесили лампу мощностью 500 Вт, световая эффективность которой 16,6 лм/Вт. На каком удалении от основания столба освещенность на земле составит 4 лк?

**24.26.** Лампы, сила света которых 300 и 200 кд, освещают площадку на земле (см. рисунок). Во сколько раз освещенность в точке *A* будет больше освещенности в точке *B*, если расстояние между этими точками равно 4,0 м, а лучи, идущие от источников  $I_1$  и  $I_2$  в точки *B* и *A*, составляют с вертикалью углы соответственно  $30^\circ$  и  $60^\circ$ ?

**24.27.** Точечный источник света, расположенный на расстоянии  $L$  от экрана, создает в его центре освещенность 3,0 лк. Как и на сколько изменится освещенность той же точки экрана, если параллельно и на расстоянии  $2L$  от него поместить идеально отражающее плоское зеркало (см. рисунок)?

**24.28.** На высоте 1,8 м от освещаемой поверхности расположен точечный источник света, над которым параллельно освещаемой поверхности укрепили плоское зеркало, отражающее



К задаче 24.27



80% падающего на него света. Определить расстояние от зеркала до освещаемой поверхности, освещенность которой под источником увеличилась в 1,2 раза.

**24.29.** При печатании фотоснимка контактным способом негатив освещался 4,0 с, если лампа силой света 60 кд находилась от него на расстоянии 0,80 м. Как и на сколько потребуется изменить время экспозиции, если лампу, сила света которой 25 кд, поместить на расстоянии 40 см от негатива?

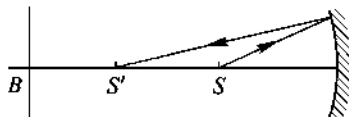
**24.30.** В темной комнате между стеной и свечой на расстоянии 25 см от последней находится тонкая собирательная линза, оптическая сила которой 4,0 дптр. Определить освещенность светлого пятна на стене. Силу света свечи принять равной 1 кд. Потерями света в линзе пренебречь.

**24.31.** На экране при помощи собирательной линзы получили дважды изображение пламени свечи с увеличением 4 и 2. Определить отношение освещенностей частей экрана, где были получены эти изображения.

**24.32.** Две лампы, сила света которых 128 и 72 кд, расположены на расстоянии 1,4 м одна от другой. Где между ними следует поместить фотометр, чтобы освещенность его граней была одинаковой?

**24.33.** Чему равна сила света испытуемой лампы, помещенной на расстоянии 60 см справа от фотометра, если для создания одинаковой освещенности его граней эталонную лампу в 75 кд пришлось расположить на расстоянии 0,90 м слева от него?

**24.34.** Точечный источник, сила света которого 60 кд, идеально отражающее вогнутое сферическое зеркало с радиусом кривизны 0,60 м и экран расположены, как показано на рисунке. Определить освещенность экрана в точке  $B$ , если расстояния от источника света до зеркала и экрана соответственно равны 0,4 и 2 м.



К задаче 24.34

**24.35.** В каком случае время экспозиции должно быть большим, если предмет фотографируют с ближнего и более далекого расстояний? В обоих случаях все прочие условия одинаковы.

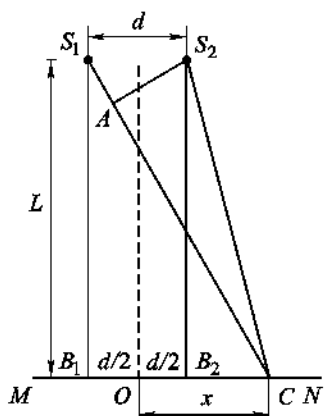
## § 25. Явления, объясняемые волновыми свойствами света

**Пример 88.** Два когерентных источника монохроматического света —  $S_1$  и  $S_2$ , находящиеся в воздухе, освещают экран  $MN$ , параллельный линии  $S_1S_2$  и отстоящий от нее на 4,0 м (см. рисунок). Определить, для какой длины волны в точке  $C$  будет находиться первый максимум освещенности, если расстояние между источниками света равно 0,50 мм, а точка  $C$  удалена от середины нулевой (центральной) полосы на 6,0 мм.

Дано:  $L = 4,0$  м — расстояние от экрана до линии, соединяющей источники света;  $d = 5,0 \cdot 10^{-4}$  м — расстояние между источниками света;  $x = 6,0 \cdot 10^{-3}$  м — расстояние между серединами нулевой полосы и первой светлой;  $k = 1$  — порядок боковой светлой полосы. Из таблиц:  $n = 1$  — абсолютный показатель преломления воздуха.

Найти:  $\lambda$  — длину волны монохроматического света, для которой в точке  $C$  будет первый максимум освещенности.

Решение. Максимальная освещенность в точке  $C$  возможна, если оптическая разность хода  $\Delta = S_1A n = 2k\lambda/2$ . Поскольку свет распространяется в воздухе, для которого абсолютный показатель преломления  $n$  можно считать равным единице, оптическая разность хода лучей будет равна геометрической, и для ее нахождения рассмотрим треугольники  $B_1S_1C$  и  $B_2S_2C$ :



К примеру 88

$$S_1A = S_1C - S_2C.$$

По теореме Пифагора

$$(S_1C)^2 = (S_1B_1)^2 + (B_1C)^2, \quad (S_2C)^2 = (S_2B_2)^2 + (B_2C)^2.$$

Учитывая, что  $S_1B_1 = S_2B_2 = L$ ,  $OC = x$ ,  $B_1O = B_2O = d/2$ , можем написать

$$(S_1C)^2 = L^2 + \left(x + \frac{d}{2}\right)^2, \quad (S_2C)^2 = L^2 + \left(x - \frac{d}{2}\right)^2.$$

После почленного вычитания последних выражений получим

$$(S_1C)^2 - (S_2C)^2 = \left(x + \frac{d}{2}\right)^2 - \left(x - \frac{d}{2}\right)^2,$$

или

$$(S_1C + S_2C)(S_1C - S_2C) = \left(x + \frac{d}{2} + x - \frac{d}{2}\right) \left(x + \frac{d}{2} - x + \frac{d}{2}\right).$$

С учетом того, что при интерференции  $d$  и  $x$  малы по сравнению с  $L$ , сумму  $S_1C + S_2C$  можно заменить на  $2L$ , а  $n(S_1C - S_2C)$  есть искомая разность хода  $\delta$ :

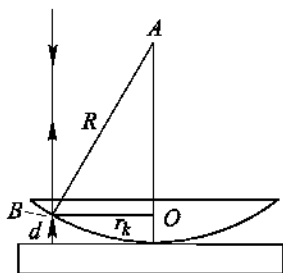
$$2L \cdot \delta = 2x \cdot 2 \frac{d}{2}, \quad \text{или} \quad \delta = \frac{xd}{nL}.$$

Так как  $\delta = k\lambda$ , то  $\lambda = xd/(knL)$ . Производя вычисления, получим

$$\lambda = \frac{6,0 \cdot 10^{-3} \cdot 5,0 \cdot 10^{-4}}{1 \cdot 4,0 \cdot 1} \frac{\text{м} \cdot \text{м}}{\text{м}} = 7,5 \cdot 10^{-7} \text{ м} = 0,75 \text{ мкм}.$$

Ответ:  $\lambda = 0,75$  мкм.

**Пример 89.** Установка для наблюдения колец Ньютона состоит из плосковыпуклой линзы с показателем преломления 1,8, помещенной выпуклой поверхностью на плоскопараллельную пластинку (см. рисунок). На плоскую поверхность линзы параллельно ее главной оптической оси падает монохроматический свет с длиной волны 0,65 мкм. Определить радиус кривизны линзы и ее оптическую силу, если расстояние между четвертым и третьим светлыми кольцами равно 0,50 мм. Чему будет равен радиус четвертого светлого кольца, если пространство между пластинкой и линзой заполнить жидкостью с показателем преломления 1,3? Наблюдение интерференции ведется в отраженном свете.



К примеру 89

*Дано:*  $n_1 = 1,8$  — абсолютный показатель преломления материала линзы;  $\lambda = 6,5 \times 10^{-7}$  м — длина волны монохроматического света;  $\Delta r = 5,0 \cdot 10^{-4}$  м — расстояние между четвертым и третьим светлыми кольцами;  $n_2 = 1,3$  — абсолютный показатель преломления жидкости. Из таблиц:  $n = 1$  — абсолютный показатель преломления воздуха.

*Найти:*  $R$  — радиус кривизны поверхности линзы;  $\Phi$  — оптическую силу линзы;  $r_k$  — радиус четвертого светлого кольца после заполнения воздушного промежутка жидкостью.

**Решение.** Для решения задачи установим связь между радиусами светлых колец, длиной волны света и радиусом кривизны линзы. Из треугольника  $ABO$ , используя теорему Пифагора, можно записать:

$$R^2 = (R - d)^2 + r_k^2, \quad \text{или} \quad R^2 = R^2 - 2dR + d^2 + r_k^2.$$

Пренебрегая из-за малости слагаемым  $d^2$ , после преобразований получаем

$$r_k^2 = 2dR. \quad (1)$$

Поскольку наблюдение интерференции ведется в отраженном свете и при отражении света от пластинки происходит потеря половины длины волны, оптическая разность хода для светлых колец выразится в виде

$$\Delta = 2dn - \frac{\lambda}{2} = 2k \frac{\lambda}{2}.$$

Откуда

$$2dn = (2k + 1) \frac{\lambda}{2}. \quad (2)$$

Сравнивая выражения (1) и (2), можем записать

$$r_k = \sqrt{(2k + 1) \frac{R}{n} \frac{\lambda}{2}},$$

здесь  $n$  — абсолютный показатель преломления воздуха, заполняющего пространство между пластинкой и линзой;  $k$  — порядковый номер

светлого кольца. Радиусы третьего и четвертого светлых колец равны:

$$r_3 = \sqrt{(2 \cdot 3 + 1) \frac{R \lambda}{n \cdot 2}}, \quad r_4 = \sqrt{(2 \cdot 4 + 1) \frac{R \lambda}{n \cdot 2}}.$$

По условию  $r_4 - r_3 = \Delta r$ , отсюда

$$\Delta r = \sqrt{\frac{R \lambda}{n \cdot 2}} (\sqrt{9} - \sqrt{7}), \quad \text{или} \quad \frac{R \lambda}{2n} = \frac{(\Delta r)^2}{(\sqrt{9} - \sqrt{7})^2}.$$

В окончательном виде получаем

$$R = \frac{2n(\Delta r)^2}{(\sqrt{9} - \sqrt{7})^2 \lambda} = \frac{2 \cdot 1 \cdot 2,5 \cdot 10^{-7} \text{ м}^2}{(0,35)^2 \cdot 6,5 \cdot 10^{-7} \text{ м}} \approx 6,3 \text{ м}.$$

Используя формулу линзы  $\Phi = (n_1 - 1)(1/R_1 + 1/R_2)$ , найдем оптическую силу (здесь  $1/R_2 = 1/\infty = 0$ )

$$\Phi = (n_1 - 1) \frac{1}{R} = (1,8 - 1) \cdot \frac{1}{6,3 \text{ м}} \approx 0,13 \text{ дптр}.$$

После заполнения пространства между пластинкой и линзой жидкостью с показателем преломления  $n_2$  радиус четвертого светлого кольца  $r_4$  определится по формуле

$$r_4 = \sqrt{(2 \cdot 4 + 1) \frac{R \lambda}{n_2 \cdot 2}}.$$

Отсюда

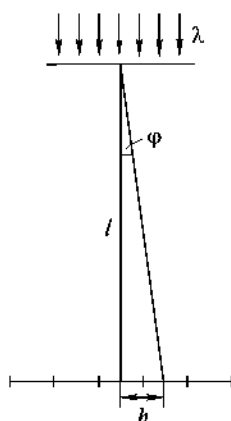
$$r_4 = \sqrt{\frac{9 \cdot 6,3 \cdot 6,5 \cdot 10^{-7} \text{ м}}{1,3 \cdot 2}} \approx 3,8 \cdot 10^{-3} \text{ м}.$$

Ответ:  $R \approx 6,3 \text{ м}$ ;  $\Phi \approx 0,13 \text{ дптр}$ ;  $r_4 \approx 3,8 \text{ мм}$ .

**Пример 90.** Пучок параллельных лучей монохроматического света с длиной волны  $450 \text{ нм}$  падает нормально на дифракционную решетку, на  $1 \text{ мм}$  которой имеется  $90$  штрихов. На каком расстоянии от дифракционной решетки должен находиться экран, чтобы на нем второй максимум освещенности (вторая светлая полоса) получился на расстоянии  $90 \text{ мм}$  от центральной (нулевой) полосы?

Дано:  $d = \frac{1}{90} \text{ мм} = \frac{10^{-3}}{90} \text{ м}$  — постоянная решетки;  $\lambda = 450 \text{ нм} = 4,5 \cdot 10^{-7} \text{ м}$  — длина световой волны;  $k = 2$  — номер полосы;  $h = 90 \text{ мм} = 9,0 \cdot 10^{-2} \text{ м}$  — расстояние от нулевой полосы до второй.

Найти:  $l$  — расстояние от дифракционной решетки до экрана.



К примеру 90

Решение. Расстояние  $l$  можно определить из треугольника (см. рисунок):  $l = h / \operatorname{tg} \varphi$ . Используя формулу для дифракционной решетки  $k\lambda = d \cdot \sin \varphi$ , определяем  $\sin \varphi$ :

$$\sin \varphi = \frac{k\lambda}{d} = \frac{2 \cdot 4,50 \cdot 10^{-7} \cdot 90}{10^{-3}} \frac{\text{м}}{\text{м}} \approx 0,081.$$

Из-за малости угла можно допустить, что

$$\operatorname{tg} \varphi \approx \sin \varphi.$$

Тогда

$$l = \frac{h}{\sin \varphi} = \frac{90 \cdot 10^{-3} \text{ м}}{0,081} \approx 1,1 \text{ м}.$$

Ответ:  $l \approx 1,1 \text{ м}$ .

## Интерференция света

**25.1.** Возможно ли получить когерентные световые волны от одного источника?

**25.2.** Два когерентных источника монохроматического света создают на экране интерференционную картину. Что образуется в части экрана, равноудаленной от этих источников?

**25.3.** Определить разность фаз двух когерентных волн монохроматического света, если оптическая разность хода для них равна  $0,5\lambda$ .

**25.4.** Разность фаз колебаний равна  $\pi/2$ . Определить геометрическую разность хода двух интерферирующих волн монохроматического света.

**25.5.** Два параллельных луча монохроматического света, расстояние между которыми  $2\sqrt{3}$  мм, падают нормально на одну из граней прямоугольной прозрачной призмы с преломляющим углом  $30^\circ$ . Определить оптическую разность хода лучей при выходе из призмы, если показатель преломления материала, из которого она изготовлена, равен 1,6.

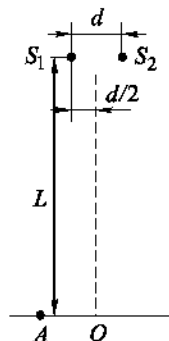
**25.6.** Известно, что световые волны, как всякие другие, несут энергию. Что же происходит с энергией на тех участках, где при наложении когерентные волны взаимно гасятся? Нет ли при этом перехода энергии видимого излучения в другие формы энергии?

**25.7.** Разность хода интерферирующих волн в воздухе равна 2,4 мкм. Для каких длин волн видимого излучения возможно максимальное усиление? максимальное ослабление?

**25.8.** При рассматривании пламени спиртовки с парами солей натрия в свете, отраженном от двух сжатых плоскопараллельных прозрачных пластинок, видны чередующиеся желтые и темные полосы. Что изменится, если пламя наблюдать в проходящем свете?

**25.9.** Два когерентных источника монохроматического света ( $S_1$  и  $S_2$ ), расстояние между которыми  $d = 0,16$  мм, удалены от экрана на  $L = 3,2$  м (см. рисунок). С какой оптической разностью хода придут

волны света к точке  $A$ , если  $OA = 12$  мм, а показатель преломления среды, в которой распространяется свет, равен 1,8? Во сколько раз оптическая разность хода лучей в воздухе будет меньше?



К задаче 25.9

**25.10.** Два когерентных источника света расположены один от другого на расстоянии 0,5 мм так, что линия, их соединяющая, параллельна плоскости экрана и удалена от него на 2 м. Свет какой длины волны посылают источники на экран, если расстояние между соседними максимумами освещенности равно 2,4 мм?

**25.11.** Определить расстояние между двумя источниками монохроматического света с длиной волны 600 нм, если середина третьего максимума удалена от середины центральной полосы на 14 мм, а расстояние от линии, соединяющей когерентные источники, до экрана 2,8 м.

**25.12.** Белый свет направляется на экран через узкие щели, расстояние между которыми 0,24 мм. На расстоянии 2,4 м от щелей расположен экран, на котором наблюдается интерференционная картина. На каком расстоянии уместится весь спектр четвертого порядка от крайних красных лучей (0,76 мкм) до фиолетовых (0,40 мкм)?

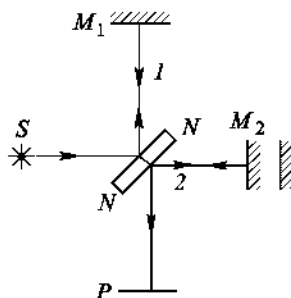
**25.13.** Чем объяснить радужную окраску масляных и нефтяных пятен на поверхности воды?

**25.14.** Что такое просветление оптики? На чем оно основано? Что достигается применением просветленной оптики?

**25.15.** Какую наименьшую толщину должна иметь пластинка, изготовленная из материала с показателем преломления 1,54, чтобы при ее освещении светом с длиной волны 0,75 мкм, идущим нормально к поверхности пластинки, она в отраженном свете была красной? черной?

**25.16.** На пленку толщиной 0,50 мкм падает нормально свет с длиной волны 0,59 мкм. Считая показатель преломления пленки равным 1,48, определить, какой будет казаться пленка в проходящем свете. Как будет меняться цвет пленки при ее наклоне относительно лучей?

**25.17.** На рисунке дана упрощенная схема интерферометра Майкельсона. Свет от источника  $S$  падает на полупрозрачное зеркало  $NN$  и при этом делится на два пучка: отраженный 1, идущий к зеркалу  $M_1$ , и проходящий 2, идущий к зеркалу  $M_2$ . Зеркало  $M_2$  может перемещаться параллельно себе. Что положено в основу прибора? Каким будет направление пучков 1 и 2 после отражения от зеркал? Что увидит наблюдатель на экране?



К задаче 25.17

**25.18.** Что произойдет, если в интерферометре Майкельсона (см. задачу 25.17) переместить зеркало  $M_2$  вдоль линии распространения пучка? Где возможно применение интерферометра Майкельсона?

**25.19.** В астрофизике используется звездный интерферометр Майкельсона. Каково его назначение?

**25.20.** При освещении клина с очень малым углом  $\alpha$ , изготовленного из стекла с показателем преломления 1,5, пучком света, падающим нормально к его поверхности, на нем наблюдаются чередующиеся темные и светлые полосы. Определить угол  $\alpha$ , если длина волны света равна 650 нм, а расстояние между двумя соседними темными полосами на поверхности клина равно 12 мм.

**25.21.** При освещении кварцевого клина с углом  $5,0''$  монохроматическим светом с длиной волны 0,60 мкм, лучи которого перпендикулярны поверхности клина, наблюдаются интерференционные полосы. Определить ширину этих полос.

**25.22.** Для измерения толщины волоса его положили на стеклянную пластинку и сверху прикрыли другой пластинкой. Расстояние от волоса до линии соприкосновения пластинок, параллельной волосу, равно 20 см. При освещении пластинок красным светом ( $\lambda = 750$  нм) на 1 см длины образовавшегося таким образом клина уместается восемь интерференционных полос. Определить толщину волоса.

**25.23.** Между двумя стеклянными пластинками зажата металлическая проволочка диаметром 0,085 мм. Расстояние от нее до линии соприкосновения пластинок, образующих воздушный клин, равно 25 см. При освещении пластинок монохроматическим светом с длиной волны 700 нм видны интерференционные полосы, параллельные линиям соприкосновения пластинок с проволочкой. Определить число полос на 1,0 см длины клина. Свет падает на пластинку перпендикулярно ее поверхности.

**25.24.** На мыльной пленке, затягивающей вертикально расположенную проволочную рамку, образуются радужные полосы, постепенно сдвигающиеся вниз. В верхней части пленка при этом чернеет, а затем разрывается. Чем это можно объяснить?

**25.25.** Радиусы светлых колец Ньютона в отраженном свете определяются формулой  $r_k = \sqrt{(2k+1)R\lambda/2}$ , где  $k$  — номер кольца, а  $R$  — радиус кривизны выпуклой поверхности линзы, соприкасающейся с плоскопараллельной пластиной (см. рисунок к примеру 89). Определить расстояние между 14-м и 13-м светлыми кольцами, если между третьим и вторым оно равно 1,0 мм; наблюдение ведется в отраженном свете.

**25.26.** Радиусы темных колец, полученных в отраженном свете на установке кольца Ньютона, определяются формулой  $r_k = \sqrt{kR\lambda}$ . Определить расстояние между девятым и восьмым темными кольцами Ньютона, если между третьим и вторым оно равно 1 мм; наблюдение ведется в отраженном свете. Каким будет ответ, если наблюдение проводить в проходящем свете?

**25.27.** Монохроматический (красный) свет с длиной волны 0,64 мкм падает нормально на установку для получения колец Ньютона. Определить радиус пятого красного кольца, если радиус кривизны линзы 5 м и наблюдение ведется в проходящем свете.

**25.28.** В установке для наблюдения колец Ньютона используется плосковыпуклая линза с радиусом кривизны 8,6 м. При освещении установки монохроматическим светом, падающим нормально на плоскую поверхность линзы, радиус четвертого темного кольца был равен 4,5 мм. Определить длину волны света, если наблюдение велось в отраженном свете.

**25.29.** Определить, светлое или темное кольцо Ньютона появится при освещении установки светом с длиной волны 450 нм, падающим параллельно главной оптической оси линзы, радиус кривизны которой 18 м, а радиус исследуемого кольца 5,3 мм. Каким будет радиус кольца того же порядка, если зазор между линзой и пластинкой заполнить этиловым спиртом? Наблюдение ведется в отраженном свете.

**25.30.** Установка для наблюдения колец Ньютона освещается нормально падающим на плоскую поверхность линзы светом с длиной волны 0,589 мкм. Диаметр четвертого темного кольца в отраженном свете равен 2,4 мм. Определить радиус кривизны плосковыпуклой линзы и ее главное фокусное расстояние, если показатель преломления стекла, из которого изготовлена линза, равен 1,8.

### Дифракция и поляризация света

**25.31.** Изображение предмета на экране можно получить с помощью малого отверстия — камеры обскура. Чем объяснить, что четкость полученного изображения при уменьшении отверстия сначала улучшается, а затем ухудшается?

**25.32 \*).** Определить постоянную дифракционной решетки, если наибольший порядок спектра монохроматического света с длиной волны 500 нм равен четырем.

**25.33.** Монохроматический свет с длиной волны 0,65 мкм падает нормально на дифракционную решетку. Для этой линии в спектре второго порядка угол дифракции равен  $45^\circ$ . Определить, каким будет этот угол в спектре того же порядка для света с длиной волны 0,75 мкм.

**25.34.** Дифракционное изображение щели третьего порядка расположено на расстоянии 10 см от центральной щели и 113 см от середины решетки. Определить длину волны монохроматического света, если на 1 см дифракционной решетки имеется 500 штрихов.

**25.35.** На какую линию в спектре третьего порядка накладывается монохроматический свет паров лития с длиной волны 0,67 мкм в спектре второго порядка?

\*) Во всех задачах о преломлении света на дифракционной решетке следует считать, что свет падает перпендикулярно к поверхности решетки.



**25.36.** Дифракционная решетка, имеющая 100 штрихов на 1 мм, удалена от экрана на 1,8 м. На каком расстоянии от центральной щели находится первый максимум освещенности, если на решетку падает монохроматический свет с длиной волны 410 нм? Каково расстояние между спектрами первого порядка?

**25.37.** На дифракционную решетку падает нормально монохроматический свет с длиной волны 600 нм. Чему равна постоянная решетки, если на экране, удаленном от нее на 1 м, расстояние между спектрами первого порядка равно 12 см?

**25.38.** Определить наибольший порядок спектра, который получится, если дифракционную решетку, на 1 мм которой имеется 500 штрихов, освещать нормально падающим монохроматическим светом с длиной волны 450 нм. Свет какой наибольшей длины волны можно наблюдать в спектре этой решетки?

**25.39.** Что такое голография? На чем основано это явление? Кем были заложены основы голографии?

**25.40.** В чем преимущества голографического изображения (голограммы) перед обычной фотографией? Каковы перспективы в развитии голографии?

**25.41.** Углом полной поляризации называется такой угол падения луча света на поверхность раздела сред, при котором отраженный свет полностью поляризуется. Определить угол полной поляризации для случая перехода света из воздуха в воду.

**25.42.** Имеется кристалл, для которого предельный угол падения луча света при его переходе из кристалла в воздух оказался равным  $44^\circ 12'$ . Определить угол падения, при котором отраженный луч будет полностью поляризован.

**25.43.** Луч света на границе раздела воздух–жидкость частично отражается, частично преломляется. Определить показатель преломления жидкости и назвать ее, если отраженный луч полностью поляризуется при угле преломления  $57^\circ 46'$ .

## § 26. Излучение и спектры. Рентгеновское излучение

**Пример 91.** Максимальная мощность излучения в спектре Солнца приходится на длину волны 500 нм. Принимая Солнце за черное тело, определить температуру его поверхности; энергию теплового излучения Солнца за единицу времени (мощность); мощность теплового излучения, падающего нормально на  $1 \text{ м}^2$  на границе земной атмосферы (солнечную постоянную). Какое давление производит солнечное излучение на расположенную нормально к нему черную поверхность?

*Дано:*  $\lambda = 500 \text{ нм} = 5,0 \cdot 10^{-7} \text{ м}$  — длина волны, соответствующая максимуму излучения в спектре черного тела. Из таблиц:  $b = 2,89782 \times 10^{-3} \text{ м} \cdot \text{К}$  — постоянная Вина,  $\sigma = 5,67032 \cdot 10^{-8} \text{ Вт}/(\text{м}^2 \cdot \text{К}^4)$  — постоянная Стефана–Больцмана,  $R_\odot = 6,95 \cdot 10^8 \text{ м}$  — радиус Солнца,

$r = 1,496 \cdot 10^{11}$  м — среднее расстояние от Земли до Солнца,  $c = 3 \times 10^8$  м/с — скорость света в вакууме.

*Найти:*  $T$  — температуру поверхности Солнца;  $P$  — мощность теплового излучения;  $j_{\odot}$  — солнечную постоянную;  $p$  — давление, производимое солнечным излучением на черную поверхность, расположенную нормально к лучам.

**Решение.** Используя закон Вина

$$\lambda_{\max} T = b,$$

определяем температуру

$$T = \frac{b}{\lambda_{\max}} = \frac{2,89782 \cdot 10^{-3}}{5,0 \cdot 10^{-7}} \frac{\text{м} \cdot \text{К}}{\text{м}} = 5796 \text{ К}.$$

Мощность теплового излучения, идущего от Солнца, определим на основании закона Стефана–Больцмана:

$$\begin{aligned} P &= \sigma T^4 \cdot 4\pi R_{\odot}^2 = \\ &= 5,67032 \cdot 10^{-8} \cdot 5796^4 \cdot 4\pi \cdot (6,95 \cdot 10^8)^2 \frac{\text{Вт} \cdot \text{К}^4 \cdot \text{м}^2}{\text{м}^2 \cdot \text{К}^4} = \\ &= 3,88 \cdot 10^{26} \text{ Вт} \approx 3,9 \cdot 10^{26} \text{ Вт}. \end{aligned}$$

Солнечная постоянная  $j_{\odot}$  есть мощность теплового излучения Солнца, приходящаяся на площадку в  $1 \text{ м}^2$ , расположенную нормально к лучам на границе земной атмосферы:

$$j_{\odot} = \frac{P}{S} = \frac{P}{4\pi r^2} = \frac{3,88 \cdot 10^{26}}{4\pi (1,496 \cdot 10^{11})^2} \frac{\text{Вт}}{\text{м}^2} = 1372 \text{ Вт/м}^2 = 1,37 \text{ кВт/м}^2.$$

Световое давление  $p$  определяется по формуле

$$p = \frac{j_{\odot}}{c} (1 + \rho),$$

где  $\rho$  — коэффициент отражения. Для черного тела  $\rho = 0$ ; поэтому

$$p = \frac{j_{\odot}}{c} = \frac{1372}{3 \cdot 10^8} \frac{\text{Вт/м}^2}{\text{м/с}} = 4,57 \cdot 10^{-6} \text{ Дж/м}^3 = 4,57 \text{ мкПа}.$$

**Ответ:**  $T = 5796 \text{ К}$ ;  $P \approx 3,9 \cdot 10^{26} \text{ Вт}$ ;  $j_{\odot} = 1,37 \text{ кВт/м}^2$ ;  $p = 4,57 \text{ мкПа}$ .

**26.1.** От чего зависит показатель преломления света?

**26.2.** Как проявляется нормальная дисперсия?

**26.3.** Чем отличаются дифракционные спектры от дисперсионных?

**26.4.** В темноте наблюдают сигналы светофора. Одинаково ли кажущееся расстояние до светофора при красном, желтом, зеленом свете?

**26.5.** Как отклоняются красные и фиолетовые лучи в дисперсионных и дифракционных спектрах?

**26.6.** Длина волны крайних красных лучей в вакууме 770 нм. Чему равны длина волны и скорость распространения их в воде? Изменится ли в воде цвет этих лучей (показатель их преломления 1,329)?

**26.7.** Чем обусловлен цвет прозрачных и непрозрачных тел, не являющихся самостоятельными источниками света?

**26.8.** Какие лампы целесообразнее использовать для освещения магазина с текстильными товарами?

**26.9.** Изображения Солнца наблюдают в свете, отраженном от толстой красной стеклянной пластинки с параллельными гранями. Чем отличаются изображения, полученные от передней и задней граней?

**26.10.** От чего зависит цвет тел? Какие цвета называются дополнительными?

**26.11.** Можно ли увидеть предмет, глядя на него через два сложенных цветных стекла — синее и красное?

**26.12.** При наложении каких трех цветов можно получить белый цвет? От чего зависит полученный цвет?

**26.13.** В чем преимущество спектрального анализа перед другими методами?

**26.14.** Что можно определить по спектру звезды?

**26.15.** Как объясняется наличие темных фраунгоферовых линий в спектре Солнца?

**26.16.** Как в спектре белого света можно обнаружить ультрафиолетовое и инфракрасное излучение? Какие интервалы длин волн соответствуют этим излучениям?

**26.17.** Какие лучи вызывают загар, а также ожоги при неумеренном использовании солнечного излучения? Можно ли загореть в холодную солнечную погоду?

**26.18.** Почему на экваторе и в горах интенсивность ультрафиолетового излучения больше?

**26.19.** Почему с увеличением концентрации углекислого газа в атмосфере повышается средняя температура на земном шаре, возникает парниковый эффект?

**26.20.** Почему исчезновение озонового слоя грозит гибелью всему живому на Земле?

**26.21.** Почему небольшое отверстие в непрозрачном полом шаре кажется черным?

**26.22.** Известно, что падающий на поверхность тела поток оптического излучения частично отражается, частично проходит через него и частично поглощается телом. Какие преобразования претерпевает поглощенная часть энергии?

**26.23.** От каких условий зависят лучеиспускательная и поглощательная способности тела?

**26.24.** Определить, на какую длину волны приходится максимум энергии в спектре излучения черного тела с температурой 0 °С. В какой части шкалы электромагнитных волн он находится?

**26.25.** Длина волны, соответствующая максимуму энергии в спектре черного тела, равна 722 нм; излучающая поверхность —  $4 \text{ см}^2$ . Определить мощность излучения в киловаттах.

**26.26.** Определить, на какую длину волны приходится максимум теплового излучения от человека с температурой  $36,6^\circ$ . В какую сторону переместится этот максимум при повышении температуры?

**26.27.** Каждую секунду Земля с  $1 \text{ см}^2$  своей поверхности излучает в среднем  $9 \cdot 10^{-3}$  Дж энергии. При какой температуре черное тело будет излучать такую же энергию? Какой длине волны соответствует максимум излучаемой энергии?

**26.28.** Расстояние от Солнца до Юпитера в 5,2 раза больше, чем до Земли. Какая из этих планет получает от Солнца меньше энергии? Принять радиус Земли равным  $6,3 \cdot 10^3 \text{ км}$ , а Юпитера —  $70,2 \cdot 10^3 \text{ км}$ .

**26.29.** Длина волны, соответствующая максимальной яркости в спектре Солнца, равна 500 нм. Считая поверхность Марса черной, определить давление, создаваемое солнечным излучением на планету. Радиус Солнца  $6,95 \cdot 10^8 \text{ м}$ , его расстояние до поверхности Марса  $2,28 \cdot 10^{11} \text{ м}$ .

**26.30.** Чем отличается тормозное рентгеновское излучение от характеристического?

**26.31.** Рентгеновская трубка работает при напряжении 50 кВ. Определить наименьшую длину волны спектра тормозного рентгеновского излучения.

**26.32.** Как зависят энергия фотонов рентгеновского излучения и его проникающая способность от температуры катода? от напряжения на трубке?

**26.33.** При какой температуре средняя кинетическая энергия частиц равна энергии фотонов рентгеновского излучения с длиной волны  $1,0 \cdot 10^{-8} \text{ м}$ ?

**26.34.** При какой длине волны рентгеновского излучения энергия фотона равна энергии покоя электрона?

**26.35.** Что произойдет при столкновении космического корабля с протонами большой энергии?

**26.36.** Какие свойства рентгеновского излучения используются в науке, технике, медицине?

## § 27. Явления, объясняемые квантовыми свойствами электромагнитного излучения

**Пример 92.** Цинковый шарик радиусом 2,0 см облучается фотонами ультрафиолетового излучения с длиной волны 0,20 мкм. Определить работу выхода электронов из цинка, красную границу фотоэффекта, максимальную скорость вылетающих электронов, длину волны де Бройля, соответствующую вылетающим электронам, значение задерживающего потенциала, при котором прекращается фотоэффект, число

фотонов, которое при этом попадет в шарик, если считать, что каждый фотон выбивает один электрон. Потенциал работы выхода для цинка 3,74 В.

Дано:  $r = 2,0 \text{ см} = 2,0 \cdot 10^{-2} \text{ м}$  — радиус шарика;  $\lambda = 0,20 \text{ мкм} = 2,0 \cdot 10^{-7} \text{ м}$  — длина волны облучающего излучения,  $\varphi_{\text{вых}} = 3,74 \text{ В}$  — потенциал работы выхода для цинка. Из таблиц:  $h = 6,62 \cdot 10^{-34} \text{ Дж} \cdot \text{с}$  — постоянная Планка,  $c = 3 \cdot 10^8 \text{ м/с}$  — скорость света в вакууме,  $e = 1,6 \cdot 10^{-19} \text{ Кл}$  — элементарный заряд,  $m_e = 9,1 \cdot 10^{-31} \text{ кг}$  — масса электрона,  $\epsilon_0 = 8,85 \cdot 10^{-12} \text{ Ф/м}$  — электрическая постоянная.

Найти:  $A_{\text{вых}}$  — работу выхода электронов;  $\lambda_{\text{гр}}$  — красную границу фотоэффекта;  $v_{\text{макс}}$  — максимальную скорость вылетающих электронов;  $\lambda_e$  — длину волны де Бройля, соответствующую вылетающим электронам;  $\varphi_3$  — значение задерживающего потенциала, при котором прекращается фотоэффект;  $N$  — число фотонов, попавших в шарик.

Решение. Работа выхода электронов из металла определяется формулой

$$A_{\text{вых}} = h\nu_{\text{гр}} = \frac{hc}{\lambda_{\text{гр}}} = e\varphi_{\text{вых}} = (1,6 \cdot 10^{-19} \text{ Кл}) \cdot 3,74 \text{ В} \approx 5,98 \cdot 10^{-19} \text{ Дж}.$$

Найдем красную границу фотоэффекта, т.е. наибольшую длину волны, при которой еще возможен внешний фотоэффект:

$$\lambda_{\text{гр}} = \frac{hc}{A_{\text{вых}}} = \frac{6,62 \cdot 10^{-34} \cdot 3 \cdot 10^8 \text{ Дж} \cdot \text{с} \cdot \text{м/с}}{5,98 \cdot 10^{-19}} = 3,32 \cdot 10^{-7} \text{ м}.$$

Максимальную скорость вылетающих электронов определим, используя закон сохранения и превращения энергии для внешнего фотоэффекта (формулу Эйнштейна):

$$\begin{aligned} \frac{hc}{\lambda} &= A_{\text{вых}} + \frac{m_e v_{\text{макс}}^2}{2}, \quad v_{\text{макс}} = \sqrt{\left(\frac{hc}{\lambda} - A_{\text{вых}}\right) \frac{2}{m_e}} = \\ &= \sqrt{\left(\frac{6,62 \cdot 10^{-34} \cdot 3 \cdot 10^8}{2,0 \cdot 10^{-7}} - 5,98 \cdot 10^{-19}\right) \cdot \frac{2 \text{ Дж}}{9,1 \cdot 10^{-31} \text{ кг}}} \approx 9,31 \cdot 10^5 \text{ м/с}. \end{aligned}$$

Длина волны де Бройля, соответствующая движущемуся телу или частице, определяется по формуле:

$$\lambda_e = \frac{h}{m_e v_{\text{макс}}} = \frac{6,62 \cdot 10^{-34}}{9,1 \cdot 10^{-31} \cdot 9,31 \cdot 10^5} \frac{\text{Дж} \cdot \text{с}}{\text{кг} \cdot \text{м/с}} = 7,81 \cdot 10^{-10} \text{ м}.$$

Определим задерживающий потенциал. Работа тормозящего электрического поля равна максимальной кинетической энергии выбитого электрона  $e\varphi_3 = m_e v_{\text{макс}}^2/2$ ; отсюда

$$\varphi_3 = \frac{m_e v_{\text{макс}}^2}{2e} = \frac{9,1 \cdot 10^{-31} \cdot (9,31 \cdot 10^5)^2}{2 \cdot 1,6 \cdot 10^{-19}} \frac{\text{кг} \cdot \text{м}^2}{\text{Кл} \cdot \text{с}^2} = 2,46 \text{ В}.$$

Для определения числа фотонов, попавших в шарик, достаточно в соответствии с условием найти число выбитых электронов:

$$Q = Ne; \quad \varphi_3 = \frac{Q}{4\pi\epsilon_0 r} = \frac{Ne}{4\pi\epsilon_0 r};$$

отсюда

$$N = \frac{4\pi\epsilon_0 r \varphi_3}{e} = \frac{4 \cdot 3,14 \cdot 8,85 \cdot 10^{-12} \cdot 2,0 \cdot 10^{-2} \cdot 2,46 \text{ Ф/м} \cdot \text{м} \cdot \text{В}}{1,6 \cdot 10^{-19} \text{ Кл}} = 3,42 \cdot 10^7.$$

**Ответ:**  $A_{\text{вых}} \approx 5,98 \cdot 10^{-19}$  Дж;  $\lambda_{\text{гр}} = 3,32 \cdot 10^{-7}$  м;  $v_{\text{макс}} \approx 9,31 \times 10^5$  м/с;  $\lambda_e = 7,81 \cdot 10^{-10}$  м;  $\varphi_3 = 2,46$  В;  $N = 3,42 \cdot 10^7$ .

**27.1.** Во сколько раз масса фотона ультрафиолетового излучения с длиной волны 5,0 нм меньше массы покоя электрона?

**27.2.** Лампочка накаливания мощностью 60 Вт за 1 с испускает  $3 \times 10^{20}$  фотонов. Определить среднюю частоту излучения лампочки. Потери энергии не учитывать. Дать объяснение полученному ответу.

**27.3.** Сколько фотонов попадет на сетчатку глаза человека за 1 с, если при мощности светового потока  $2 \cdot 10^{-17}$  Вт глаз воспринимает свет с длиной волны 500 нм?

**27.4.** Источник света излучает в секунду  $2,795 \cdot 10^{19}$  фотонов с длиной волны 555 нм. Определить полный световой поток, излучаемый источником.

**27.5.** Как объясняется световое давление электромагнитной теории света? Квантовой теорией света?

**27.6.** Как влияет световое давление в звезде на ее устойчивость?

**27.7.** Во сколько раз возрастет световое давление, создаваемое излучением звезды, при повышении температуры ее поверхности в два раза?

**27.8.** Как влияет световое давление на положение кометных хвостов?

**27.9.** На поверхность  $2,0 \text{ м}^2$  перпендикулярно ей за 1 с падает  $3,87 \cdot 10^{21}$  фотонов излучения с длиной волны 0,64 мкм. Определить световое давление на зеркальную поверхность, черную поверхность и поверхность с коэффициентом отражения 0,6?

**27.10.** Сколько фотонов с длиной волны  $5,55 \cdot 10^{-7}$  м падает в единицу времени на черную поверхность площадью  $2,0 \text{ м}^2$  перпендикулярно ей, если производимое ими световое давление равно  $4,57 \cdot 10^{-6}$  Па? Определить световое давление этого излучения на зеркальную поверхность и поверхность с коэффициентом отражения 0,8?

**27.11.** Определить силу давления солнечного излучения на поверхность Венеры, если для нее коэффициент отражения равен 0,77. Радиус Венеры 6200 км, солнечная постоянная для нее  $2,62 \cdot 10^3$  Вт/м<sup>2</sup>.

**27.12.** Черная сферическая частица находится от Солнца на таком же расстоянии, как Земля. При каких размерах частицы сила притяжения ее к Солнцу уравновешивается силой давления солнечного

излучения? Плотность частицы  $7,8 \cdot 10^3 \text{ кг/м}^3$ . Какая сила будет преобладать при уменьшении размеров частицы?

**27.13.** В чем проявляется фотохимическое действие света? Приведите примеры.

**27.14.** На что расходуется энергия, затрачиваемая в процессе совершения работы выхода электрона из металла?

**27.15.** В чем различие фотоэффекта в полупроводниках и металлах? Возможен ли внешний фотоэффект в полупроводниках?

**27.16.** Цинковая пластинка, заряженная отрицательно и присоединенная к электromетру, освещается светом электрической дуги. Почему стрелка электromетра сначала возвращается в нулевое положение, а затем вновь отклоняется?

**27.17.** Работа выхода электронов из калия равна  $3,55 \cdot 10^{-19} \text{ Дж}$ . Определить длину волны красной границы фотоэффекта.

**27.18.** Работа выхода электронов из серебра равна  $4,30 \text{ эВ}$ . При какой наименьшей частоте излучения, падающего на поверхность серебра, будет наблюдаться фотоэффект?

**27.19.** Длина волны, соответствующая красной границе фотоэффекта, для лития равна  $5,22 \cdot 10^{-7} \text{ м}$ . Определить потенциал работы выхода из лития.

**27.20.** Потенциал работы выхода электрона из бария  $2,4 \text{ В}$ . Работа выхода электрона из никеля  $4,50 \text{ эВ}$ . Возникнет ли фотоэффект при облучении этих металлов видимым излучением?

**27.21.** Работа выхода электронов из натрия  $3,63 \cdot 10^{-19} \text{ Дж}$ . Возникнет ли фотоэффект при облучении натрия видимым излучением? инфракрасным?

**27.22.** Определить максимальную кинетическую энергию электронов, вылетающих с поверхности платины при облучении ее излучением с длиной волны  $1,5 \cdot 10^{-7} \text{ м}$ . Работа выхода электронов из платины  $5,3 \text{ эВ}$ .

**27.23.** Максимальная кинетическая энергия электронов, вылетающих из вольфрама при освещении его излучением с длиной волны  $1,9 \cdot 10^{-7} \text{ м}$ , равна  $3,2 \cdot 10^{-19} \text{ Дж}$ . Определить работу выхода электронов из вольфрама и красную границу фотоэффекта.

**27.24.** Определить постоянную Планка, если с увеличением частоты электромагнитного излучения в процессе фотоэффекта на  $1,21 \times 10^{11} \text{ кГц}$  задерживающий потенциал возрос на  $0,5 \text{ В}$ .

**27.25.** Поверхность платины облучается ультрафиолетовым излучением с длиной волны  $1,5 \cdot 10^{-7} \text{ м}$ . Определить максимальную скорость вылетающих электронов. При какой задерживающей разности потенциалов прекратится фотоэмиссия? Длина волны, соответствующая красной границе фотоэффекта, для платины равна  $2,35 \cdot 10^{-7} \text{ м}$ .

**27.26.** Определить красную границу фотоэффекта для стронция, если при облучении его светом с длиной волны  $4,29 \cdot 10^{-7} \text{ м}$  максимальная скорость вылетающих электронов была  $3,47 \cdot 10^5 \text{ м/с}$ .

**27.27.** Какую задерживающую разность потенциалов нужно приложить к цезиевому фотоэлементу для прекращения фотоэмиссии электронов при облучении его светом с длиной волны  $4,0 \cdot 10^{-7}$  м? Работа выхода электронов из цезия равна 1,3 эВ.

**27.28.** До какого положительного потенциала необходимо зарядить поверхность цезия, чтобы при облучении ее ультрафиолетовым излучением с длиной волны 200 нм электроны не вылетали с поверхности металла? Потенциал работы выхода электронов для цезия 1,93 В.

**27.29.** Какой максимальный заряд получит медный шарик радиусом 2,0 см, расположенный в вакууме, при облучении его фотонами с длиной волны  $4,0 \cdot 10^{-8}$  м? Потенциал работы выхода электрона для меди равен 4,47 В.

**27.30.** Возможен ли внешний фотоэффект при облучении металла фотонами, энергия которых меньше работы выхода?

**27.31.** Фотон с длиной волны  $\lambda_0$  после комптоновского рассеяния на свободном электроне движется в сторону, противоположную первоначальному направлению. Определить длину волны фотона после рассеяния.

**27.32.** На сколько изменится длина волны фотона, если после взаимодействия с электроном он движется в том же направлении, что и до соударения? Изменится ли при этом скорость фотона? энергия?

**27.33.** Записать уравнения законов сохранения импульса и энергии для взаимодействия фотона со свободным электроном и со связанным электроном.

**27.34.** Зависит ли комптоновская длина волны электрона от энергии и импульса фотонов?

**27.35.** В чем проявляется эффект Комптона при столкновении кванта рентгеновского излучения с электроном?

**27.36.** Рентгеновское излучение с длиной волны  $8,2 \cdot 10^{-11}$  м испытывает комптоновское рассеяние на парафине. Определить длину волны фотонов рентгеновского излучения, рассеянных под углом  $60^\circ$  к первоначальному направлению.

**27.37.** С движущимися частицами и телами связана волна де Бройля. Определить ее длину для электрона при скорости  $10^4$  км/с. При какой скорости длина волны, связанная с протоном, станет такой же?

**27.38.** Определить длину волны де Бройля, связанной с автомобилем, движущимся со скоростью 60 км/ч. Масса автомобиля 1,5 т. Почему мы не замечаем волновых свойств движущихся тел?

**27.39.** Почему электронные микроскопы имеют большую разрешающую способность, чем оптические?

## § 28. Основы специальной теории относительности

**Пример 93.** Ракета движется относительно неподвижного наблюдателя со скоростью  $v = 0,99c$  ( $c$  — скорость света в вакууме). Какое время пройдет по часам неподвижного наблюдателя, если по часам,



движущимся вместе с ракетой, прошел один год? Как изменятся линейные размеры тел в ракете (в направлении ее движения) для неподвижного наблюдателя? Как изменится для этого наблюдателя плотность вещества в ракете?

*Дано:*  $v = 0,99c$  — скорость движения ракеты относительно неподвижной системы отсчета,  $t_0 = 1,00$  год — время, прошедшее по часам, движущимся вместе с ракетой (собственное время).

*Найти:*  $t$  — время, прошедшее по часам неподвижного наблюдателя;  $l$  — линейные размеры тел в ракете (в направлении ее движения) для неподвижного наблюдателя,  $\rho$  — плотность вещества в ракете для неподвижного наблюдателя.

*Решение.* Время, прошедшее по часам неподвижного наблюдателя, найдем по формуле

$$t = \frac{t_0}{\sqrt{1 - v^2/c^2}} = \frac{1,00 \text{ год}}{\sqrt{1 - (0,99c/c)^2}} \approx 7,1 \text{ года}.$$

Размеры тел (вдоль линии движения) найдем из соотношения

$$l = l_0 \sqrt{1 - \frac{v^2}{c^2}},$$

где  $l_0$  — собственная длина тех же тел. Тогда

$$l = l_0 \sqrt{1 - \left(\frac{0,99c}{c}\right)^2} \approx 0,14l_0.$$

Плотность вещества в ракете для неподвижного наблюдателя найдем по формуле

$$\rho = \frac{m}{V}, \quad \text{где } m = \frac{m_0}{\sqrt{1 - v^2/c^2}}, \quad V = lS.$$

Так как поперечные (по отношению к линии движения) размеры тел не изменяются, то

$$V = l_0 S \sqrt{1 - \frac{v^2}{c^2}}.$$

Тогда

$$\begin{aligned} \rho &= \frac{m_0}{\sqrt{1 - v^2/c^2} \cdot l_0 S \sqrt{1 - v^2/c^2}} = \frac{m_0}{V_0 (1 - v^2/c^2)} = \frac{\rho_0}{1 - v^2/c^2} = \\ &= \frac{\rho_0}{1 - (0,99c/c)^2} = \frac{\rho_0}{0,0199} \approx 50,2\rho_0. \end{aligned}$$

*Ответ:*  $t \approx 7,1$  года,  $l \approx 0,14l_0$ ,  $\rho \approx 50,2\rho_0$ .

**Пример 94.** Две ракеты движутся навстречу друг другу со скоростями  $v_1 = v_2 = (3/4)c$  относительно неподвижного наблюдателя. Определить скорость сближения ракет по классической и релятивистской формулам сложения скоростей.

*Дано:*  $v_1 = v_2 = (3/4)c$  — скорости соответственно первой и второй ракет относительно неподвижного наблюдателя.

**Найти:**  $u$  — скорость сближения ракет по классической и релятивистской формулам.

**Решение.** Найдем относительную скорость ракет. По классической формуле сложения скоростей

$$u_{\text{кл}} = v_1 + v_2 = \frac{3}{4}c + \frac{3}{4}c = 1,5c.$$

По релятивистской формуле сложения скоростей

$$u_{\text{рел}} = \frac{v_1 + v_2}{1 + v_1 v_2 / c^2} = \frac{(3/4)c + (3/4)c}{1 + (3/4)^2 / c^2} = 0,96c.$$

Приемлемым является значение скорости сближения ракет, найденное по релятивистской формуле, поскольку не противоречит второму постулату теории относительности, утверждающему, что для любого тела скорость не может быть больше скорости света  $c$ .

**Ответ:**  $u_{\text{кл}} = 1,5c$ ,  $u_{\text{рел}} = 0,96c$ .

**Пример 95.** Электрон движется со скоростью  $0,80c$ . Масса покоя электрона равна приблизительно  $9,1 \cdot 10^{-31}$  кг. Определить энергию покоя электрона (в джоулях и электронвольтах), массу электрона, его полную и кинетическую энергию.

**Дано:**  $m_0 \approx 9,1 \cdot 10^{-31}$  кг — масса покоя электрона;  $v = 0,80c$  — скорость электрона. Из таблиц:  $e = 1,6 \cdot 10^{-19}$  Кл — заряд электрона,  $c = 3 \cdot 10^8$  м/с — скорость света в вакууме.

**Найти:**  $E_0$  — энергию покоя электрона,  $m_e$  — массу движущегося электрона,  $E$  и  $E_k$  — соответственно полную и кинетическую энергию электрона.

**Решение.** Энергию покоя электрона найдем по формуле

$$E_0 = m_0 c^2 = 9,1 \cdot 10^{-31} \cdot 9,0 \cdot 10^{16} \text{ кг} \cdot (\text{м/с})^2 \approx 8,2 \cdot 10^{-14} \text{ Дж}.$$

Выразим энергию электрона в электронвольтах, учитывая, что  $1 \text{ эВ} = 1,6 \cdot 10^{-19} \text{ Дж}$ :

$$E_0 = \frac{8,2 \cdot 10^{-14} \text{ Дж}}{1,6 \cdot 10^{-19} \text{ Дж/эВ}} = 5,12 \cdot 10^5 \text{ эВ} \approx 0,51 \text{ МэВ}.$$

Массу движущегося электрона определим из соотношения

$$m_e = \frac{m_0}{\sqrt{1 - v^2/c^2}} = \frac{9,1 \cdot 10^{-31} \text{ кг}}{\sqrt{1 - (0,80c/c)^2}} \approx 1,52 \cdot 10^{-30} \text{ кг}.$$

Полную энергию электрона получим по формуле

$$E = m_e c^2 = 1,52 \cdot 10^{-30} \cdot 9,0 \cdot 10^{16} \text{ кг} \cdot (\text{м/с})^2 \approx 13,7 \cdot 10^{-14} \text{ Дж}.$$

Из соотношения  $E = E_0 + E_k$  найдем кинетическую энергию электрона:

$$E_k = E - E_0 \approx 13,7 \cdot 10^{-14} \text{ Дж} - 8,2 \cdot 10^{-14} \text{ Дж} \approx 5,5 \cdot 10^{-14} \text{ Дж}.$$

Ответ:  $E_0 \approx 8,2 \cdot 10^{-14}$  Дж (0,51 МэВ),  $m_e \approx 1,52 \cdot 10^{-30}$  кг,  $E \approx 13,7 \cdot 10^{-14}$  Дж,  $E_k \approx 5,5 \cdot 10^{-14}$  Дж.

**28.1.** Что включает в себя понятие «система отсчета»?

**28.2.** В чем различие инерциальных и неинерциальных систем отсчета, движущихся с ускорением?

**28.3.** Всегда ли систему отсчета, связанную с Землей, можно считать инерциальной?

**28.4.** Когда Галилеем был сформулирован принцип относительности? В чем его сущность?

**28.5.** В неподвижном лифте человек поднимает равномерно груз массой  $m$  на высоту  $\Delta h$ . Изменится ли работа, произведенная человеком при равномерном движении лифта?

**28.6.** Положение материальной точки, покоящейся относительно инерциальной системы  $K$ , определяется координатами  $x = 200$  м,  $y = 5$  м,  $z = 15$  м. Система  $K'$  движется равномерно и прямолинейно относительно системы  $K$  в сторону положительных значений  $x$  со скоростью  $v_x = 20$  м/с. Ось  $x'$  совпадает с осью  $x$ , а оси  $y'$  и  $y$  параллельны друг другу. В момент времени, равный нулю, начала координат  $O$  и  $O'$  совпадают. Определить координаты материальной точки в системе  $K'$  для моментов времени:  $t_1 = 0$ ;  $t_2 = 5,0$  с;  $t_3 = 15$  с.

**28.7.** Инерциальные системы  $K$  и  $K'$  ориентированы, как указано в задаче 28.6. Система  $K'$  движется относительно системы  $K$  со скоростью  $v_x = 10$  м/с в сторону положительных значений  $x$ . Материальная точка покоится относительно системы  $K$ . Определить координаты материальной точки в системе  $K$ , если ее положение в системе  $K'$  через 20 с от начала отсчета определяется координатами:  $x'_1 = 100$  м,  $y'_1 = 0$ ,  $z'_1 = 0$ ,  $x'_2 = -200$  м,  $y'_2 = 0$ ,  $z'_2 = 0$ ,  $x'_3 = -300$  м,  $y'_3 = 20$  м,  $z'_3 = 15$  м.

**28.8.** Положение материальной точки, покоящейся относительно инерциальной системы  $K$ , определяется координатами  $x = 400$  м,  $y = 25$  м,  $z = 12$  м. В момент времени  $t = 0$  начала координат систем  $K$  и  $K'$  совпадают. С какой скоростью движется в сторону положительных значений  $x$  инерциальная система  $K'$ , если при  $t = 50$  с положение материальной точки относительно системы  $K'$  определяется координатами  $x' = 150$  м,  $y' = 25$  м,  $z' = 12$  м?

**28.9.** Записать формулу сложения скоростей в классической механике. Пользуясь этой формулой, определить, с какой скоростью движутся навстречу друг другу два автомобиля, скорости которых относительно Земли равны  $v_1 = 30$  м/с и  $v_2 = 20$  м/с. Какова их относительная скорость при движении в одном направлении с такими же скоростями?

**28.10.** Лодка движется перпендикулярно течению воды со скоростью 4,0 м/с. С какой скоростью движется лодка относительно берега, если скорость течения воды равна 3,0 м/с?

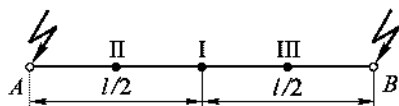
**28.11.** Под действием усилий гребцов лодка перемещается со скоростью  $v_1 = 4,0 \text{ м/с}$  так, что направление ее движения составляет угол  $\alpha = 60^\circ$  с направлением течения воды. Определить скорость движения лодки относительно берега, если скорость течения воды равна  $v_2 = 3,0 \text{ м/с}$ .

**28.12.** Зависит ли от скорости движения инерциальной системы отсчета скорость тела? скорость света?

**28.13.** Инерциальная система  $K'$  и инерциальная система  $K$ , принятая за неподвижную, ориентированы, как указано в задаче 28.6. Система  $K'$  движется относительно системы  $K$  со скоростью  $v_x = 0,8c$  в сторону положительных значений  $x$ . Пользуясь преобразованиями Лоренца, определить координаты события в системе  $K'$ , если в системе  $K$  координаты события равны: 1)  $x = 0, y = 0, z = 0, t = 0$ ; 2)  $x = 3,0 \cdot 10^8 \text{ м}, y = 0, z = 0, t = 1 \text{ с}$ ; 3)  $x = 3,0 \cdot 10^8 \text{ м}, y = 0, z = 0, t = 5 \text{ с}$ .

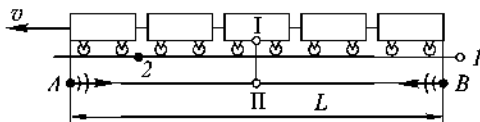
**28.14.** Материальная точка покоится относительно инерциальной системы  $K$ . Инерциальная система  $K'$  движется относительно системы  $K$  со скоростью  $v_x = 0,8c$  в сторону положительных значений  $x$  так, что оси  $x$  и  $x'$  совпадают, а оси  $y$  и  $y'$ ,  $z$  и  $z'$  соответственно параллельны. В момент  $t = 0$  начала координат  $O$  и  $O'$  совпадают. Пользуясь преобразованиями Лоренца, определить координаты материальной точки в системе  $K$ , если ее координаты в системе  $K'$  следующие:  $x' = 6,0 \cdot 10^3 \text{ м}, y' = 2,0 \cdot 10^2 \text{ м}, z' = 15 \text{ м}, t' = 2,0 \cdot 10^{-5} \text{ с}$ .

**28.15.** Неподвижный наблюдатель  $I$ , находившийся посередине между точками  $A$  и  $B$ , увидел, что в эти точки одновременно попала молния (см. рисунок). Одновременны ли эти события для неподвижных наблюдателей  $II$  и  $III$ ? Для каких еще неподвижных относительно точек  $A$  и  $B$  наблюдателей, кроме наблюдателя  $I$ , события в  $A$  и  $B$  будут одновременными?



К задаче 28.15

**28.16.** В тот момент, когда середина поезда, движущегося равномерно и прямолинейно, проходит мимо наблюдателя  $II$ , стоящего посередине перрона, одновременно для этого наблюдателя на концах



К задаче 28.16

перрона зажигаются фонари  $A$  и  $B$  (см. рисунок). Одновременны ли эти события для наблюдателя  $I$ , находящегося в середине движущегося поезда?

**28.17.** С учетом условия задачи 28.16 определить, какой фонарь для наблюдателя I загорится раньше, если фонари зажгли в тот момент, когда этот наблюдатель находился (см. рисунок к задаче 28.16) в точке I; в точке B, в точке 2. Где должен находиться наблюдатель I в момент зажигания фонарей, чтобы свет из точек A и B пришел к нему одновременно?

**28.18.** Можно ли утверждать, что события, одновременные в одной инерциальной системе отсчета, одновременны и во всех других инерциальных системах?

**28.19.** Что такое собственная длина стержня? Одинакова ли она в различных инерциальных системах отсчета? Имеет ли смысл понятие «длина стержня» вне связи с системой отсчета?

**28.20.** Собственная длина стержня равна 1,0 м. Определить его длину для наблюдателя, относительно которого стержень перемещается со скоростью 0,60c, направленной вдоль стержня.

**28.21.** На какую часть от собственной длины изменяется длина стержня для неподвижного наблюдателя, относительно которого стержень движется со скоростью  $(4/5)c$ , направленной вдоль стержня?

**28.22.** При какой скорости движения релятивистское сокращение длины движущегося тела составляет 1%? 25%?

**28.23.** Какой стала бы длина тела в направлении движения относительно неподвижного наблюдателя при  $v = c$ ?

**28.24.** Плоский воздушный конденсатор с зарядом  $Q$  движется со скоростью  $v$ . Считая, что отношением  $v/c$  пренебречь нельзя, определить, как изменятся заряд конденсатора, напряжение на его пластинах и напряженность электрического поля в конденсаторе, если: а) вектор скорости перпендикулярен плоскости пластин; б) параллелен им.

**28.25.** Две ракеты движутся равномерно и прямолинейно параллельными курсами в одном направлении со скоростью 0,6c относительно Земли. В первой ракете происходят два последовательных события через промежуток времени 8 ч. Какое время прошло между этими событиями по часам наблюдателя, находящегося во второй ракете? на Земле?

**28.26.** Частицы космического излучения мю-мезоны ( $\mu$ -мезоны) рождаются в верхних слоях атмосферы. При скорости 0,995c они успевают пролететь до своего распада расстояние  $6,0 \cdot 10^3$  м. Определить время жизни  $\mu$ -мезона для наблюдателя на Земле; собственное время его жизни; собственную длину пути, пройденного  $\mu$ -мезоном.

**28.27.** Какое время пройдет по часам в ракете, движущейся равномерно и прямолинейно со скоростью  $v$ , если на часах, покоящихся в инерциальной системе отсчета, относительно которой движется ракета, прошел 1 ч? Скорость ракеты: 3000 км/с; 105 км/с;  $2,5 \cdot 10^5$  км/с.

**28.28.** Какое время пройдет на Земле, если в ракете, движущейся со скоростью 0,99c относительно Земли, пройдет 10 лет?

**28.29.** Сколько времени для земного наблюдателя и для космонавтов займет космическое путешествие до звезды и обратно на ракете,

летящей со скоростью  $0,99c$ ? Расстояние от земного наблюдателя до звезды 40 световых лет.

**28.30.** Мю-мезон, рождающийся в верхних слоях атмосферы, пролетает до своего распада 5,0 км. Определить, с какой скоростью летит  $\mu$ -мезон, если его собственное время жизни составляет 2,21 мкс.

**28.31.** Собственное время жизни  $\mu$ -мезона составляет 2,21 мкс. Определить, прилетают ли  $\mu$ -мезоны, наблюдаемые у поверхности Земли, из мирового пространства или рождаются в земной атмосфере. Скорость  $\mu$ -мезона относительно Земли принять равной  $0,99c$ .

**28.32.** Два тела движутся навстречу друг другу со скоростью  $2,0 \cdot 10^5$  км/с относительно неподвижного наблюдателя. На сколько различаются скорости их движения относительно друг друга, вычисленные по классической и релятивистской формулам сложения скоростей?

**28.33.** Два электрона движутся вдоль одной прямой со скоростями  $0,9c$  и  $0,8c$  относительно неподвижного наблюдателя. Какова относительная скорость электронов при их движении в одном направлении? в противоположных направлениях?

**28.34.** Две частицы летят со скоростями  $|v_1| = |v_2| = 0,8c$  навстречу друг другу. Через какое время для неподвижного наблюдателя они сближаются на 1,2 км? Взаимодействие частиц не учитывать.

**28.35.** Самолет движется со скоростью  $v$  навстречу неподвижному источнику света. С какой скоростью  $u$  сближается самолет с фотонами, испускаемыми источником?

**28.36.** С какой скоростью сближаются два фотона, каждый из которых относительно неподвижного наблюдателя движется со скоростью  $c$ ? Какой ответ мы получим по классической формуле сложения скоростей?

**28.37.** Может ли электрон двигаться со скоростью, превышающей скорость света в данной среде?

**28.38.** Будет ли ускорение тела под действием постоянной силы оставаться постоянным при скорости, приближающейся к скорости света?

**28.39.** Учитывая зависимость массы от скорости движения, установить, при каких скоростях массу тела можно считать постоянной. При каких скоростях справедлива механика Ньютона?

**28.40.** Частица движется со скоростью  $(3/4)c$  относительно неподвижного наблюдателя. Во сколько раз масса этой частицы больше ее массы покоя?

**28.41.** Тело с массой покоя 1,0 кг движется со скоростью  $2,0 \times 10^5$  км/с. Определить массу этого тела для неподвижного наблюдателя.

**28.42.** С какой скоростью движется тело, масса которого с точки зрения неподвижного наблюдателя равна 4,0 кг, если масса покоя этого тела 2,4 кг?

**28.43.** Тело движется со скоростью  $v$  относительно неподвижного наблюдателя. Как изменяются для этого наблюдателя: размеры тела вдоль направления движения; его масса; плотность вещества? Изменяются ли эти величины для наблюдателя, движущегося вместе с телом?

**28.44.** Каким импульсом обладает электрон, движущийся со скоростью  $(4/5)c$ ? Масса покоя электрона равна  $9,1 \cdot 10^{-31}$  кг.

**28.45.** Определить импульс протона, масса которого равна массе покоя  $\alpha$ -частицы. Какую ускоряющую разность потенциалов должен пройти протон, чтобы приобрести этот импульс?

**28.46.** Два тела с массой покоя  $m_0$  каждое движутся навстречу друг другу с одинаковыми скоростями  $v$  относительно неподвижного наблюдателя. Определить импульс каждого из тел в системе отсчета, неподвижной относительно одного из них.

**28.47.** Определить энергию покоя электрона и протона. Выразить ее в джоулях и электронвольтах.

**28.48.** Какой кинетической энергией обладает ранее покоившееся тело, если в результате ускорения его масса увеличилась на  $2m_0$ ? Какова полная энергия тела? Его импульс?

**28.49.** При какой скорости кинетическая энергия частицы равна ее энергии покоя?

**28.50.** Кинетическая энергия нестабильной частицы равна 35 МэВ. Во сколько раз увеличится период полураспада частицы, если ее масса покоя равна 0,15 а. е. м. (см. приложение А.1)?

**28.51.** Ускоритель разгоняет протоны до кинетической энергии 70 ГэВ. С какой скоростью движутся протоны? Во сколько раз увеличивается их масса?

**28.52.** Масса движущегося электрона в 11 раз больше его массы покоя. Определить кинетическую энергию электрона и его импульс.

**28.53.** Тело массой  $m_0$  движется так, что его длина вдоль линии движения сокращается на 25 %. Определить полную и кинетическую энергию тела.

**28.54.** Какую ускоряющую электрическую разность потенциалов должен пройти первоначально покоившийся электрон, чтобы кинетическая энергия его стала в 10 раз больше энергии покоя?

**28.55.** Какую электрическую разность потенциалов должен пройти первоначально покоившийся протон, чтобы его полная энергия стала в 11 раз больше энергии покоя? Во сколько раз возрастет при этом его масса?

**28.56.** Протон и  $\alpha$ -частица, двигаясь из состояния покоя, проходят одинаковую ускоряющую электрическую разность потенциалов  $U$ , после чего масса протона составляет треть массы  $\alpha$ -частицы. Найти эту разность потенциалов.

**28.57.** Каким импульсом обладает фотон излучения с частотой  $5,0 \times 10^{14}$  Гц? Какова его масса?

**28.58.** Определить импульс фотона излучения с длиной волны 600 нм. Какова масса этого фотона?

**28.59.** В поле тяготения в вакууме движется фотон. Изменяется ли при этом скорость фотона? его энергия?

**28.60.** Определить длину волны и частоту излучения, фотоны которого обладают импульсом  $1,65 \cdot 10^{-23}$  кг·м/с.

**28.61.** Какая энергия выделилась бы при полном превращении 1,00 г вещества в электромагнитное поле (переход материи из одного вида в другой)?

**28.62.** Какому изменению массы соответствует энергия, вырабатываемая за 1 ч электростанцией мощностью 2,5 ГВт?

**28.63.** На единицу площади верхней граничной поверхности земной атмосферы, расположенной перпендикулярно направлению солнечных лучей, солнечное излучение приносит в единицу времени 1,37 кДж энергии. Определить энергию, излучаемую Солнцем в единицу времени, и массу, теряемую им за то же время. Расстояние от Солнца до Земли принять равным  $1,5 \cdot 10^8$  км.



## Глава V

# ФИЗИКА АТОМА И АТОМНОГО ЯДРА

### § 29. Строение атома

**Пример 96.** По теории Бора электрон в атоме водорода может двигаться по определенным, разрешенным для него орбитам. Определить как функцию от порядкового номера:  $v_k$  — скорость электрона;  $r_k$  — радиус орбиты (размер атома);  $E_{пк}$  — потенциальную энергию взаимодействия электрона с ядром;  $E_{кк}$  — кинетическую энергию электрона на орбите;  $E_{кполн}$  — полную энергию атома.

*Дано:* Из таблиц:  $|e^-| = |e^+| = 1,6 \cdot 10^{-19}$  Кл — заряд электрона и протона,  $m_e = 9,11 \cdot 10^{-31}$  кг — масса электрона,  $\epsilon_0 = 8,85 \times 10^{-12}$  Ф/м — электрическая постоянная,  $h = 6,62 \cdot 10^{-34}$  Дж·с — постоянная Планка.

*Найти:*  $r_k$  — радиус орбиты электрона с порядковым номером  $k$ ;  $v_k$  — скорость электрона на этой орбите;  $E_{пк}$ ,  $E_{кк}$  и  $E_{кполн}$  — потенциальную, кинетическую и полную энергию электрона на этой орбите.

**Решение.** Электрон, вращающийся вокруг ядра атома водорода (протона), взаимодействует с ним с силой  $F$ , определяемой по закону Кулона

$$F = \frac{|e|^2}{4\pi\epsilon_0 r^2}. \quad (1)$$

Эта сила, являющаяся центростремительной, заставляет электрон двигаться по орбите радиусом  $r_k$  со скоростью  $v_k$ :

$$\frac{m_e v_k^2}{r_k} = \frac{|e|^2}{4\pi\epsilon_0 r_k^2}. \quad (2)$$

По постулату Бора:

$$m_e v_k r_k = \frac{kh}{2\pi}. \quad (3)$$

Решая совместно уравнения (2) и (3), находим скорость электрона  $v_k$  и радиус орбиты  $r_k$ :

$$v_k = \frac{|e|^2}{2\epsilon_0 kh} \quad (4)$$

и

$$r_k = \frac{\epsilon_0 k^2 h^2}{\pi e^2 m_e}. \quad (5)$$

Потенциальная энергия, или энергия взаимодействия электрона с ядром,

$$E_{пк} = e^{-} \varphi_k = e^{-} \frac{e^{+}}{4\pi\epsilon_0 r_k} = -\frac{e^2}{4\pi\epsilon_0 r_k}. \quad (6)$$

Подставив вместо  $r_k$  его значение из (5), получаем

$$E_{пк} = -\frac{m_e e^4}{4\epsilon_0^2 k^2 h^2}. \quad (7)$$

Кинетическую энергию электрона найдем из формулы  $E_{кк} = \frac{m_e v_k^2}{2}$ .

После подстановки  $v_k$  из формулы (4) получаем

$$E_{кк} = \frac{m_e e^4}{8\epsilon_0^2 k^2 h^2}. \quad (8)$$

Из формул (7) и (8) следует, что кинетическая энергия электрона в два раза меньше его потенциальной энергии.

Полная энергия атома равна сумме потенциальной и кинетической энергии электрона:

$$E_{кполн} = E_{пк} + E_{кк} = -\frac{m_e e^4}{4\epsilon_0^2 k^2 h^2} + \frac{m_e e^4}{8\epsilon_0^2 k^2 h^2} = -\frac{m_e e^4}{8\epsilon_0^2 k^2 h^2}. \quad (9)$$

$$\text{Ответ: } v_k = \frac{|e|^2}{2\epsilon_0 k h}; \quad r_k = \frac{\epsilon_0 k^2 h^2}{\pi e^2 m_e}; \quad E_{пк} = -\frac{m_e e^2}{4\epsilon_0^2 k^2 h^2}; \quad E_{кк} = \frac{m_e e^4}{8\epsilon_0^2 k^2 h^2};$$

$$E_{кполн} = -\frac{m_e e^4}{8\epsilon_0^2 k^2 h^2}.$$

**Пример 97.** Электрон в атоме водорода движется по ближайшей к ядру орбите. Определить радиус орбиты, соответствующей стабильному состоянию атома; полную энергию атома в этом состоянии. Какую наименьшую энергию необходимо сообщить атому водорода в невозбужденном состоянии для его ионизации?

*Дано:*  $k = 1$  — порядковый номер орбиты в невозбужденном атоме. Из таблиц:  $\epsilon_0 = 8,85 \cdot 10^{-12}$  Ф/м — электрическая постоянная,  $m_e = 9,11 \cdot 10^{-31}$  кг — масса электрона,  $e = 1,6 \cdot 10^{-19}$  Кл,  $h = 6,62 \cdot 10^{-34}$  Дж·с — постоянная Планка.

*Найти:*  $r_1$  — радиус стационарной орбиты;  $E_{1\text{полн}}$  — полную энергию электрона на этой орбите;  $\Delta E_{\text{ион}}$  — наименьшую энергию, необходимую для ионизации атома. Выразить ее в Дж и эВ.

**Решение.** Радиус орбиты и полную энергию электрона найдем по формулам, выведенным в примере 96:

$$r_k = \frac{\epsilon_0 k^2 h^2}{\pi m_e e^2}; \quad E_{кполн} = -\frac{m_e e^4}{8\epsilon_0^2 k^2 h^2}.$$

При  $k = 1$

$$r_1 = \frac{8,85 \cdot 10^{-12} \cdot (6,62 \cdot 10^{-34})^2}{3,14 \cdot 9,11 \cdot 10^{-31} \cdot (1,6 \cdot 10^{-19})^2} \frac{\text{Ф/м} \cdot \text{Дж}^2 \cdot \text{с}^2}{\text{кг} \cdot \text{Кл}^2} = 5,292 \cdot 10^{-11} \text{ м} \approx 5,3 \cdot 10^{-11} \text{ м};$$

$$E_{1 \text{ полн}} = \frac{-9,1 \cdot 10^{-31} \cdot (1,6 \cdot 10^{-19})^4}{8 \cdot (8,85 \cdot 10^{-12} \cdot 6,62 \cdot 10^{-34})^2} \frac{\text{кг} \cdot \text{Кл}^4}{\text{Ф}^2/\text{м}^2 \cdot \text{Дж}^2 \cdot \text{с}^2} =$$

$$= -2,17 \cdot 10^{-18} \text{ Дж} = -13,6 \text{ эВ}.$$

Найдем энергию ионизации, необходимую для удаления электрона в бесконечность:  $k = \infty$ .

$\Delta E_{\text{ион}} = E_{\infty \text{ полн}} - E_{1 \text{ полн}}$ ; так как при  $k = \infty$   $E_{\infty \text{ полн}} = 0$ , то  $\Delta E_{\text{ион}} = -E_{1 \text{ полн}}$ ;  $\Delta E_{\text{ион}} = 0 - (-13,6 \text{ эВ}) = 13,6 \text{ эВ}$ .

Ответ:  $r_1 \approx 5,3 \cdot 10^{-11} \text{ м}$ ;  $\Delta E_{\text{ион}} = 2,17 \cdot 10^{-18} \text{ Дж} = 13,6 \text{ эВ}$ .

**Пример 98.** Пользуясь теорией Бора, рассчитать постоянную Ридберга.

Дано: Из таблиц:  $e = 1,6 \cdot 10^{-19} \text{ Кл}$  — заряд электрона;  $h = 6,62 \times 10^{-34} \text{ Дж} \cdot \text{с}$  — постоянная Планка;  $c = 3 \cdot 10^8 \text{ м/с}$  — скорость света в вакууме;  $\epsilon_0 = 8,85 \cdot 10^{-12} \text{ Ф/м}$  — электрическая постоянная;  $m_e = 9,11 \cdot 10^{-31} \text{ кг}$  — масса электрона.

Найти:  $R$  — постоянную Ридберга.

Решение. Из формулы Планка энергия кванта равна  $\epsilon = h\nu$ . Так как  $\nu = c/\lambda$ , то  $\epsilon = hc/\lambda$ .

В то же время энергия кванта при переходе электрона с  $k$ -го энергетического уровня на  $n$ -й ( $n < k$ ) равна  $\epsilon = E_k \text{ полн} - E_n \text{ полн}$ . Подставив значение полной энергии из примера 96, получаем

$$\frac{hc}{\lambda} = \left[ -\frac{m_e e^4}{8\epsilon_0^2 k^2 h^2} - \left( -\frac{m_e e^4}{8\epsilon_0^2 n^2 h^2} \right) \right] = \frac{m_e e^4}{8\epsilon_0^2 h^2} \left( \frac{1}{n^2} - \frac{1}{k^2} \right).$$

Отсюда:

$$\frac{1}{\lambda} = \frac{m_e e^4}{8\epsilon_0^2 h^3 c} \left( \frac{1}{n^2} - \frac{1}{k^2} \right).$$

Сопоставив с формулой для определения длины волны  $\frac{1}{\lambda} = R \left( \frac{1}{n^2} - \frac{1}{k^2} \right)$ ,

получаем  $R = \frac{m_e e^4}{8\epsilon_0^2 h^3 c}$ . Подставляем числовые значения:

$$R = \frac{(9,1 \cdot 10^{-31}) \cdot (1,6 \cdot 10^{-19})^4}{8 \cdot (8,85 \cdot 10^{-12})^2 \cdot (6,62 \cdot 10^{-34})^3 \cdot 3 \cdot 10^8} \frac{\text{кг} \cdot \text{Кл}^4}{(\text{Ф/м})^2 \cdot (\text{Дж} \cdot \text{с})^3 \cdot \text{м/с}} =$$

$$= 1,097 \cdot 10^7 \text{ м}^{-1}.$$

Ответ:  $R = 1,097 \cdot 10^7 \text{ м}^{-1} \approx 1,1 \cdot 10^7 \text{ м}^{-1}$ .

**29.1.** На основании каких экспериментальных наблюдений Резерфорд пришел к выводу о планетарной модели атома?

**29.2.** В чем заключается противоречие между ядерной моделью атома по Резерфорду и законами классической физики? Выполняются ли законы классической физики при движении электрона в ускорителе? в атоме?

**29.3.** Может ли атом поглощать и излучать энергию, находясь в основном состоянии? в возбужденном?

**29.4.** Зависит ли частота электромагнитного излучения от частоты движения электрона в ускорителе? от частоты обращения электрона вокруг ядра?

**29.5.** Чем определяется частота излучения атома водорода по теории Бора?

**29.6.** Чем отличается основное состояние атома от возбужденного?

**29.7.** Почему атомные спектры поглощения и испускания линейчатые?

**29.8.** Электроны в атомах водорода находятся на третьем энергетическом уровне. Какими переходами электронов могут быть обусловлены кванты излучения? Как они могут различаться?

**29.9.** Каково расположение электронов в атоме натрия? лития?

**29.10.** Какое излучение создают возбужденные атомы при переходе их электронов во внешнем слое? во внутренних слоях?

**29.11.** Могут ли испускать рентгеновское излучение атомы гелия? стронция?

**29.12.** Почему характеристические спектры рентгеновского излучения линейчатые? Как они изменяются при увеличении зарядового числа  $Z$ ?

**29.13.** Определить радиус первой боровской орбиты в атоме водорода, частоту и период обращения на ней.

**29.14.** Как связана длина боровской орбиты с длиной волны де Бройля для электрона на этой орбите?

**29.15.** Определить максимальную и минимальную частоты излучения атома водорода при переходе электрона на первый энергетический уровень.

**29.16.** Определить минимальную и максимальную длины волн при переходе электрона в атоме водорода на второй энергетический уровень.

**29.17.** Определить энергию электрона в атоме водорода на пятом энергетическом уровне.

**29.18.** Определить энергию, необходимую для ионизации невозбужденного атома водорода в джоулях и электронвольтах. Какую скорость получит электрон, находящийся в невозбужденном атоме водорода под действием фотона с энергией  $15,29 \text{ эВ}$ ?

**29.19.** Определить длину волны излучения, возникающего при переходе ионизованного атома водорода в нормальное состояние.

**29.20.** Свет от разрядной трубки с атомарным водородом падает нормально на дифракционную решетку с постоянной  $5,5 \cdot 10^{-3} \text{ мм}$ . Определить номер орбиты, с которой электрон в атоме должен перейти на вторую орбиту, чтобы в спектре пятого порядка была видна спектральная линия под углом  $36^\circ 35'$ .

**29.21.** Чем отличается люминесцентное излучение от теплового?

**29.22.** Какая характеристика люминесцентного излучения позволяет отличить его от всех видов иных излучений?

**29.23.** При поглощении света молекулой энергия поглощенного кванта частично расходуется на изменение конфигурации электронного облака, часть идет на изменение колебаний атомных ядер и энергии вращательного движения молекулы. Какая из этих энергий излучается молекулой и какая переходит во внутреннюю энергию?

**29.24.** Может ли красный свет с длиной волны 770 нм вызвать фотолюминесценцию?

**29.25.** В чем преимущества люминесцентного спектрального анализа?

**29.26.** Чем различаются самопроизвольное и вынужденное излучения возбужденных атомов? Какое из них используется в квантовых генераторах?

**29.27.** Какие свойства характеризуют излучение оптических квантовых генераторов (лазеров)?

## § 30. Ядерная физика

**Пример 99.** Сколько  $\alpha$ - и  $\beta$ -распадов происходит в результате превращения радия-226 в свинец-206?

*Дано:*  ${}_{88}^{226}\text{Ra}$  — начальный продукт распада;  ${}_{82}^{206}\text{Pb}$  — конечный продукт распада. Из табл. Менделеева:  $M_{\text{He}} = 4$ ;  $Z_{\alpha} = 2$ .

*Найти:*  $n_{\alpha}$  — число  $\alpha$ -распадов,  $n_{\beta}$  — число  $\beta$ -распадов.

**Решение.** Известно, что атомы радиоактивных элементов неустойчивы и самопроизвольно распадаются, претерпевая различные превращения. При  $\alpha$ -распаде массовое число начального атома уменьшается на четыре единицы, что позволяет определить  $n_{\alpha}$ :

$$n_{\alpha} = \frac{M_{\text{Ra}} - M_{\text{Pb}}}{M_{\text{He}}} = \frac{226 - 206}{4} = 5,$$

где символами  $M$  обозначены массовые числа начального, конечного продуктов и  $\alpha$ -частицы (ядра атома гелия). Зная  $n_{\alpha}$  и  $Z_{\alpha}$  — зарядовое число  $\alpha$ -частицы, определяем, на сколько уменьшается зарядовое число при  $\alpha$ -распаде

$$\Delta Z_{\alpha} = n_{\alpha} Z_{\alpha} = 5 \cdot 2 = 10.$$

Известно, что при  $\beta$ -распаде меняется лишь зарядовое число, возрастая на единицу. В результате превращения  ${}_{88}^{226}\text{Ra}$  в  ${}_{82}^{206}\text{Pb}$  зарядовое число уменьшается на  $\Delta Z$ :

$$\Delta Z = Z_{\text{Ra}} - Z_{\text{Pb}} = 88 - 82 = 6;$$

следовательно,

$$n_{\beta} = \Delta Z_{\alpha} - \Delta Z = 4.$$

**Ответ:**  $n_{\alpha} = 5$ ;  $n_{\beta} = 4$ .

**Пример 100.** Имеется 2,29 мг изотопа тория-229, период полураспада которого составляет 7000 лет. Со сколькими атомами произойдет радиоактивный распад за 7 суток?

*Дано:*  $m = 2,29 \cdot 10^{-6}$  кг — масса тория;  $T = 7000$  лет — период полураспада;  $t = 7$  сут — время наблюдения распада. Из таблиц:  $M = 229 \cdot 10^{-3}$  кг/моль — молярная масса тория,  $N_A = 6,022 \times 10^{23}$  моль $^{-1}$  — постоянная Авогадро.

*Найти:*  $\Delta N$  — число распавшихся атомов.

*Решение.* Число распавшихся атомов  $\Delta N = N_0 - N$ , где  $N$  — число атомов, оставшихся целыми к моменту времени  $t$ :

$$N = N_0 e^{-0,693t/T};$$

здесь  $N_0$  — начальное число атомов,  $e = 2,71828 \dots$  — основание натурального логарифма.

Если же время очень мало по сравнению с периодом полураспада, то можно воспользоваться приближенной формулой

$$\Delta N = \frac{0,693}{T} N_0 t, \quad N_0 = \frac{m}{M} N_A;$$

отсюда

$$\Delta N = \frac{0,693}{T} \frac{m}{M} N_A t.$$

После подстановки числовых значений получаем

$$\Delta N = \frac{0,693 \cdot 2,29 \cdot 10^{-6} \cdot 6,022 \cdot 10^{23} \cdot 7 \text{ кг} \cdot \text{моль}^{-1} \cdot \text{сут}}{7 \cdot 10^3 \cdot 365 \cdot 229 \cdot 10^{-3} \text{ сут} \cdot \text{кг} \cdot \text{моль}^{-1}} = 1,14 \cdot 10^{13}.$$

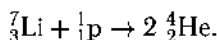
*Ответ:* Число распавшихся атомов тория за 7 сут равно  $1,14 \cdot 10^{13}$ .

**Пример 101.** Ядро атома лития  ${}^7_3\text{Li}$ , захватив протон, кинетической энергией которого можно пренебречь, распалось на два одинаковых осколка. Написать ядерную реакцию; определить дефект массы и энергию, выделившуюся в этом процессе.

*Дано:* Из таблиц:  $M_{\text{Li}} = 7,01601$  а.е.м. — масса атома изотопа лития-7,  $M_{\text{H}} = 1,00794$  а.е.м. — масса атома водорода,  $M_{\text{He}} = 4,00260$  а.е.м. — масса атома гелия-4, 931,5 МэВ — энергетический эквивалент атомной единицы массы (1 а.е.м. =  $1,6605655 \cdot 10^{-27}$  кг).

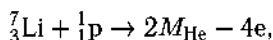
*Найти:* Написать ядерную реакцию;  $\Delta m$  — дефект массы;  $E$  — энергию, выделившуюся в процессе протекания ядерной реакции.

*Решение.* Исходя из законов сохранения массового и зарядового чисел, можно записать ядерную реакцию в виде

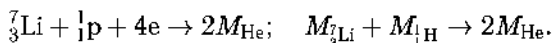


В результате поглощения протона ядром атома лития образовались две  $\alpha$ -частицы (ядра атомов гелия).

В таблицах даются массы не ядер, а нейтральных атомов; поэтому ядерную реакцию следует записать иначе:



где  $M_{\text{He}}$  — масса нейтрального атома гелия, или



Найдем дефект массы

$$\begin{aligned}\Delta m &= M_{\text{Li}} + M_{\text{H}} - 2M_{\text{He}} = \\ &= (7,01601 + 1,00794 - 2 \cdot 4,00260) \text{ а.е.м.} = 0,01871 \text{ а.е.м.}\end{aligned}$$

Используя энергетический эквивалент атомной единицы массы, определим энергию, выделившуюся в процессе протекания реакции:

$$E = \Delta m \cdot 931,5 \text{ МэВ/а.е.м.} = 17,4 \text{ МэВ.}$$

Энергию  $E$  можно найти по формуле  $E = \Delta m \cdot c^2$  ( $c$  — скорость света в вакууме; в этом случае  $\Delta m$  необходимо выразить в килограммах:

$$\begin{aligned}E &= 0,01871 \cdot 1,6605655 \cdot 10^{-27} \cdot (2,99792458 \cdot 10^8)^2 = \\ &= 27,92 \cdot 10^{-13} \frac{\text{кг} \cdot \text{м}^2}{\text{с}^2} = 27,92 \cdot 10^{-13} \text{ Дж.}\end{aligned}$$

*Ответ:* Ядро лития, поглотив протон, распадается на два ядра атома гелия;  $\Delta m = 0,01871$  а.е.м.;  $E = 17,4$  МэВ энергии.

**30.1.** Радиус Солнца равен  $6,95 \cdot 10^5$  км, средняя плотность вещества в нем  $1,41 \cdot 10^3$  кг/м<sup>3</sup>. Каким был бы радиус Солнца, если при той же массе его плотность была бы, как у ядерного вещества,  $2,14 \cdot 10^{11}$  кг/м<sup>3</sup>?

**30.2.** В 1913 г. американские ученые К. Фаянс и Содди независимо сформулировали закон смещения, характеризующий перемещение нуклида (ядра атома) в периодической системе элементов при  $\alpha$ - и  $\beta$ -распадах. Как изменится положение химического элемента в таблице Менделеева после одного  $\alpha$ -распада? одного  $\beta$ -распада?

**30.3.** Откуда берутся электроны при  $\beta$ -распаде, если ядро состоит только из протонов и нейтронов?

**30.4.** Ядро тория  ${}_{90}^{232}\text{Th}$  претерпевает три  $\alpha$ -распада и два  $\beta$ -распада. Определить порядковый номер и массовое число нуклида; назвать его.

**30.5.** Во что превратится ядро изотопа урана  ${}_{92}^{233}\text{U}$  после шести  $\alpha$ - и трех  $\beta$ -распадов?

**30.6.** Определить количество  $\alpha$ - и  $\beta$ -распадов, в результате которых уран-238 превращается в изотоп свинца-206.

**30.7.** Вещество радиоактивного элемента при радиоактивном превращении потеряло пять  $\alpha$ -частиц и четыре  $\beta$ -частицы и превратилось в ядро изотопа свинца  ${}_{82}^{206}\text{Pb}$ . Найти исходный радиоактивный элемент.

**30.8.** Для искусственно созданного радиоактивного изотопа нептуния  ${}_{93}^{237}\text{Np}$  конечным (стабильным) продуктом распада является висмут-209. Определить общее число распадов в результате такого превращения.

**30.9.** Сколько  $\alpha$ - и  $\beta$ -распадов должно произойти, чтобы ядро тория-232 превратилось в ядро изотопа свинца-208?

**30.10.** Последовательность ядерных превращений в задаче 30.9: один  $\alpha$ -распад, два  $\beta$ -распада, пять  $\alpha$ -распадов и два  $\beta$ -распада. Записать все ядерные реакции.

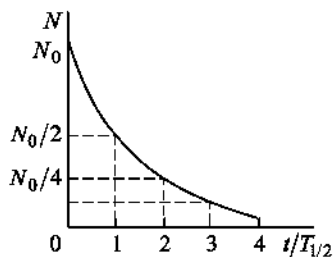
**30.11.** Влияет ли на природу химического элемента испускание ядром атома  $\gamma$ -кванта?

**30.12.** Период полураспада  $T_{1/2}$  и постоянная радиоактивного распада  $\lambda$  связаны соотношением  $T_{1/2} = 0,693/\lambda$ . Определить период полураспада радия-226 ( $^{226}_{88}\text{Ra}$ ), если постоянная распада  $\lambda = 1,3564743 \times 10^{-11}$  Бк (1 Бк = 1 расп./с).

**30.13.** Период полураспада радиоактивного изотопа водорода — трития — равен 12,3 года. Определить постоянную радиоактивного распада и среднюю продолжительность жизни трития  $\tau$ .

**30.14.** Определить, какая доля начального числа атомов радиоактивного элемента распадается за время, равное средней продолжительности жизни этого элемента.

**30.15.** Период полураспада радиоактивного изотопа железа  $^{55}_{26}\text{Fe}$  равен 2,9 года. Используя график, определить, за какое время число нераспавшихся атомов уменьшится в четыре раза.



К задаче 30.15

**30.16.** Найти период полураспада радиоактивного цезия  $^{137}_{55}\text{Cs}$ , если за  $3/4$  года доля распавшихся ядер составила 0,0173.

**30.17.** Какая доля радиоактивного стронция  $^{90}_{38}\text{Sr}$ , период полураспада которого 28 лет, распадается за полгода? Определить постоянную распада для стронция.

**30.18.** Скорость радиоактивного распада, называемая активностью, может быть определена из формулы  $A_0 = (N_0 \ln 2)/T$ . Имеется 1 г радиоактивного изотопа цезия-137, период полураспада которого 30 лет. Определить его начальную активность. Принять  $\ln 2 = 0,69$ .

**30.19.** Сколько распадов ядер за минуту происходит в препарате, активность которого составляет 104 МБк?

**30.20.** За какое время в препарате с постоянной активностью 8,2 МБк распадается  $25 \cdot 10^8$  ядер?

**30.21.** Известно, что активность радиоактивного вещества  $A$  показывает число ядер, распавшихся за 1 с ( $A = \lambda N$ ). Определить возраст деревянных изделий, если активность изотопа углерода  $^{14}_6\text{C}$  в них составила 0,8 активности этого изотопа в свежесрубленном дереве, а период полураспада углерода-14 равен 5568 годам.

**30.22.** Что такое бэр?

**30.23.** Как зависит мощность дозы, создаваемой источником  $\gamma$ -излучения, от расстояния?

**30.24.** Определить скорость движения электронов в воде, вызывающих свечение Вавилова—Черенкова, если угол при вершине светящегося конуса равен  $100^\circ$ .



**30.25.** Электроны движутся в воде со скоростью  $2,72 \cdot 10^8$  м/с, вызывая свечение Вавилова–Черенкова. Определить угол при вершине светящегося конуса в воде.

**30.26.** На чем основано действие счетчика Гейгера?

**30.27.** Для чего предназначается пузырьковая камера, на чем основано ее действие?

**30.28.** В процессе аннигиляции электрона и позитрона возникают гамма-лучи. Определить общую энергию двух  $\gamma$ -квантов, возникающих при этом, частоту излучения и направление их относительного перемещения.

**30.29.** Какой минимальной частотой и энергией должен обладать  $\gamma$ -квант, чтобы при пролете вблизи ядра образовать электрон-позитронную пару?

**30.30.** На чем основано действие масс-спектрографа по разделению изотопов?

**30.31.** Что называется дефектом массы атомного ядра? Чему он равен?

**30.32.** Подсчитать дефект массы в атомных единицах массы и килограммах для лития  ${}^7_3\text{Li}$ .

**30.33.** Определить энергетический эквивалент массе электрона покоя и 1 а.е.м.

**30.34.** Одинаковы ли ядерные силы, действующие между двумя протонами, между двумя нейтронами, между протоном и нейтроном? Что из этого следует?

**30.35.** Что такое энергия связи ядра? Чему она равна?

**30.36.** Определить энергию связи атомных ядер лития  ${}^7_3\text{Li}$ , цинка  ${}^{64}_{30}\text{Zn}$ , урана  ${}^{238}_{92}\text{U}$ .

**30.37.** Для нуклидов из задачи 30.36 определить удельную энергию связи. Как меняется удельная энергия связи в направлении от легких к средним и тяжелым ядрам?

**30.38.** Почему удельная энергия связи  $\mathcal{E}_{\text{св}}/A$  в тяжелых ядрах с увеличением массового числа  $A$  убывает?

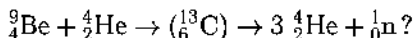
**30.39.** Энергии связи ядер железа-56 и урана-238 соответственно равны 492,2 и 1801,7 МэВ. Какое из них более устойчиво?

**30.40.** В опыте Резерфорда  $\alpha$ -частицы поглощались ядрами атомов азота, в результате чего образовывался изотоп кислорода-17 и свободные протоны. Записать ядерную реакцию и определить с выделением или поглощением энергии она протекала. Чему равна эта энергия?

**30.41.** При образовании ядра атома гелия  ${}^4_2\text{He}$  из двух ядер дейтерия освобождается 23,8 МэВ энергии. На сколько при этом уменьшилась масса возникшего ядра?

**30.42.** Какой минимальной энергией должны обладать  $\gamma$ -кванты, чтобы вызвать реакцию  ${}^{12}_6\text{C} + h\nu \rightarrow 3 {}^4_2\text{He}$ ?

**30.43.** Сколько энергии поглощается при ядерной реакции



**30.44.** Записать полностью ядерную реакцию и определить энергию, выделившуюся в этом процессе  ${}^6_3\text{Li} + ? \rightarrow 2 {}^4_2\text{He}$ .

**30.45.** Какое ядерное топливо существует в природе?

**30.46.** В урановом реакторе изотоп нептуния с массовым числом 239 испускает электроны. Написать уравнение ядерной реакции.

**30.47.** Приведите примеры ядерного топлива, используемого в ядерных реакторах.

**30.48.** Какую роль выполняют графит и вода в ядерных реакторах?

**30.49.** Сколько актов деления ядер урана-235 должно происходить за 1 с, чтобы выделилась мощность 1 МВт?

**30.50.** Каким образом осуществляется регулирование цепного ядерного процесса в атомном реакторе?

**30.51.** Определить суточный расход ядерного горючего урана-235 на первой советской атомной электростанции мощностью 5 МВт, если коэффициент полезного действия станции 20%. Принять энергию, выделяющуюся при делении одного ядра урана, равной 20 МэВ.

**30.52.** Один блок мощностью  $10^3$  МВт на атомной станции работает с коэффициентом полезного действия 31,2%. Сколько урана-235 расходуется за 1 год непрерывной работы, если при делении одного ядра атома урана-235 выделяется приблизительно 200 МэВ энергии?

**30.53.** В чем состоит различие между цепной ядерной и термоядерной реакциями? Где происходит каждая из них?

**30.54.** Почему для термоядерного синтеза используются легкие атомные ядра?

**30.55.** Почему для осуществления термоядерного синтеза необходимо создать высокую температуру?

**30.56.** Примером термоядерной реакции может быть слияние изотопов водорода — дейтерия и трития. Напишите эту реакцию и подсчитайте выделившуюся в ней энергию.

## Глава VI

### НЕКОТОРЫЕ СВЕДЕНИЯ ПО АСТРОНОМИИ

#### § 31. Некоторые сведения по астрономии

**Пример 102.** Определить абсолютные видимые звездные величины Солнца и звезды  $\alpha$  Девы, если расстояние до этой звезды 47,7 пк, а ее видимая звездная величина  $1^m, 21$ . Видимая звездная величина Солнца  $-26^m, 8$ . Во сколько раз светимость звезды больше светимости Солнца?

*Дано:*  $D = 47,7$  пк ( $1 \text{ пк} = 206\,265 \text{ а.е.}$ ) — расстояние до звезды;  $m = 1^m, 21$  — ее видимая звездная величина;  $m_{\odot} = -26^m, 8$  — видимая звездная величина Солнца.

*Найти:*  $M_{\odot}$  — абсолютную звездную величину Солнца;  $M$  — абсолютную звездную величину звезды;  $L$  — светимость звезды по отношению к светимости Солнца.

*Решение.* Зная расстояние до светила  $D$ , его видимую звездную величину  $m$ , определим абсолютную звездную величину по формуле  $M = m + 5 - 5 \lg D$ ; для Солнца

$$M_{\odot} = -26,8 + 5 + 5 \lg 206\,265 = 4^m, 8,$$

для звезды

$$M = 1,21 + 5 - 5 \lg 47,7 = -2^m, 2.$$

Принимая светимость Солнца  $L_{\odot} = 1,0$ , определим светимость звезды  $L$ :

$$\lg L = 0,4(M_{\odot} - M) = 0,4(4,8 + 2,2) = 2,8.$$

По таблице антилогарифмов получим  $L = 630$ .

*Ответ:* Абсолютные звездные величины Солнца и  $\alpha$  Девы равны соответственно  $4^m, 8$  и  $-2^m, 2$ ; светимость  $\alpha$  Девы в 630 раз больше светимости Солнца.

**Пример 103.** На спектрограмме звезды красная линия водорода оказалась смещенной к фиолетовой части спектра на 0,02 мм. Учитывая, что лабораторная (нормальная) длина волны красной линии водорода равна  $6,563 \cdot 10^{-7}$  м, определить, на сколько изменилась длина этой волны, если расстоянию 1 мм на спектрограмме соответствует изменение длины волны на 5,0 нм? В каком направлении по отношению к наблюдателю движется звезда? Какова ее лучевая скорость?

*Дано:*  $\Delta l = 0,02$  мм — расстояние, на которое сместилась наблюдаемая красная линия водорода;  $\Delta \lambda_1 = 5,0 \cdot 10^{-9}$  м/мм — изменение длины волны при смещении на 1 мм;  $\lambda_0 = 6,563 \cdot 10^{-7}$  м — лабораторная длина волны. Из таблиц:  $c = 3 \cdot 10^8$  м/с — скорость света.

*Найти:*  $\Delta \lambda$  — изменение длины волны;  $v$  — скорость относительно движения (лучевую скорость) звезды и ее направление.

**Решение.** На основании принципа Доплера

$$\lambda = \lambda_0(1 + v/c), \quad \text{или} \quad (\lambda - \lambda_0)/\lambda_0 = v/c.$$

Так как смещение линии произошло в сторону более коротких волн  $(\lambda - \lambda_0) < 0$ , уменьшение длины волны дает скорость со знаком минус — источник света и наблюдатель сближаются

$$|\Delta \lambda| = |\lambda - \lambda_0| = \Delta l \Delta \lambda_1;$$

$$|\Delta \lambda| = 0,02 \cdot 5,0 \cdot 10^{-9} \text{ мм} \cdot \text{м/мм} = 1,0 \cdot 10^{-10} \text{ м} = 1 \text{ \AA}.$$

Тогда

$$|\Delta \lambda|/\lambda_0 = v/c;$$

отсюда

$$v = \frac{|\Delta \lambda|c}{\lambda_0} = \frac{1,0 \cdot 10^{-10} \cdot 3 \cdot 10^8 \text{ м} \cdot \text{м/с}}{6,563 \cdot 10^{-7} \text{ м}} = 45,7 \cdot 10^3 \text{ м/с} \approx 46 \text{ км/с}.$$

**Ответ:**  $\Delta \lambda = 1 \text{ \AA}$ ;  $v \approx 46 \text{ км/с}$ .

**Пример 104.** Какую энергию необходимо затратить, чтобы спутник массой 500 кг поднять на высоту 3200 км? Вывести его на круговую орбиту на той же высоте?

*Дано:*  $m = 500$  кг — масса спутника;  $h = 3200$  км =  $3,2 \cdot 10^6$  м — высота, на которую поднимается спутник. Из таблиц:  $g = 10 \text{ м/с}^2$  — ускорение свободного падения;  $R_3 = 6,4 \cdot 10^6$  м — радиус Земли.

*Найти:*  $A_1$  — работу, совершаемую для поднятия спутника на высоту  $h$ ;  $A_2$  — работу для запуска спутника на круговую орбиту на высоте  $h$ .

**Решение.** Если потенциальную энергию спутника массой  $m$  в поле тяжести считать равной нулю, когда он находится на бесконечно большом расстоянии от Земли, то на ее поверхности, т.е. на расстоянии  $R_3$  от центра Земли, она будет равна  $|I_{R_3}| = -G(Mm/R_3)$ , где  $M$  — масса Земли, а  $R_3$  — ее радиус. Следовательно, чтобы поднять спутник на высоту  $h$ , необходимо совершить работу, равную разности потенциальных энергий спутника:

$$A_1 = I_{R_3+h} - I_{R_3} = -\frac{GMm}{R_3+h} - \left(-\frac{GMm}{R_3}\right) = GMm \left(\frac{1}{R_3} - \frac{1}{R_3+h}\right) = GMm \frac{h}{R_3(R_3+h)}.$$

Если учесть, что  $g = GM/R_3^2$  и  $GM = gR_3^2$ , то

$$A_1 = mg \frac{hR_3}{R_3+h} = 500 \cdot 10 \cdot \frac{3,2 \cdot 10^6 \cdot 6,4 \cdot 10^6}{9,6 \cdot 10^6} \frac{\text{кг} \cdot \text{м/с}^2 \cdot \text{м} \cdot \text{м}}{\text{м}} \approx \frac{32 \cdot 10^9}{3} \text{ Дж} \approx 10,7 \text{ ГДж}.$$

Чтобы спутник мог двигаться на высоте  $h$ , необходимо совершить работу  $A_2$ , равную его кинетической энергии

$$A_2 = \frac{mv^2}{2}.$$

Так как по круговой орбите спутник движется с центростремительным ускорением  $v^2/(R_3 + h)$ , которое ему сообщает сила тяготения, согласно второму закону Ньютона, можно записать

$$\frac{mv^2}{R_3 + h} = G \frac{Mm}{(R_3 + h)^2} = \frac{mgR_3^2}{(R_3 + h)^2}.$$

Отсюда  $v^2 = gR_3^2/(R_3 + h)$ . Тогда

$$A_2 = \frac{1}{2} \frac{mgR_3^2}{(R_3 + h)} = \frac{500 \cdot 10 \cdot (6,4 \cdot 10^6)^2}{2 \cdot 9,6 \cdot 10^6} \frac{\text{кг} \cdot \text{м}/\text{с}^2 \cdot \text{м}^2}{\text{м}} \approx 10,7 \text{ ГДж}.$$

Ответ:  $A_1 = A_2 \approx 10,7 \text{ ГДж}$ .

**31.1.** Почему о взаимном расположении звезд на небесной сфере можно судить лишь по угловым измерениям? Ответ пояснить на чертеже.

**31.2.** В чем состоит преимущество астрономических наблюдений, осуществляемых с помощью приборов, установленных на искусственных космических аппаратах, перед наземными телескопическими наблюдениями?

**31.3.** В каком направлении происходит суточное движение звезд, Солнца, Луны и планет для наблюдателя в Северном полушарии, повернувшегося лицом к южной стороне горизонта?

**31.4 \*).** Путем наблюдений составить перечень созвездий, неходящих за горизонт в вашей местности. Проверить правильность с помощью подвижной карты звездного неба.

**31.5.** Как называется самая яркая звезда на небесной сфере и самая яркая в Северном полушарии? Каким созвездиям они принадлежат?

\*) Вид звездного неба (см. передний форзац) относительно горизонта меняется со временем. Причиной тому являются суточное вращение Земли и ее движение вокруг Солнца. С помощью подвижной карты (см. задний форзац) наблюдатель может определить положение созвездий и отдельных звезд по отношению к горизонту и изучить вид звездного неба в любой момент времени и на различных географических широтах. Для работы с картой необходимо отскерить или перевести на кальку накладной круг. Зная географическую широту места наблюдения звездного неба, найти на круге линию с обозначенной широтой и по ней сделать внутренний вырез на накладном круге. При работе с картой на нее помещают накладной круг так, чтобы месяц и число наблюдения на карте совпали с часом наблюдения, показанным на накладном круге. В центре вырезанной части накладного круга будет зенит, а линия выреза покажет горизонт с точками севера, юга, востока и запада. По краям карты указаны прямые восхождения в часах. Круги склонения показаны радиальными линиями. Для отсчета склонений светил через каждые  $30^\circ$  изображены концентрические окружности, одна из которых со склонением  $0^\circ$  есть линия небесного экватора. На пересечении линии экватора с эклиптической обозначены точки весеннего и осеннего равноденствий.

**31.6.** Положение светила на небесной сфере определяется двумя координатами: склонением  $\delta$  — угловым расстоянием светила от экватора (оно аналогично географической широте) — и прямым восхождением  $\alpha$ , измеряемым по экватору от точки весеннего равноденствия до круга склонения светила (прямое восхождение аналогично географической долготе и измеряется в единицах времени). Определить приблизительно по подвижной карте звездного неба склонения и прямые восхождения самых ярких звезд в созвездиях Тельца, Возничего и Лиры. Сравнить полученные результаты с табличными и попытаться найти перечисленные созвездия на небе. Как называются эти звезды?

**31.7.** Найти на подвижной карте звездного неба созвездие, в котором самая яркая звезда имеет координаты  $20^{\text{ч}} 39^{\text{мин}}$  и  $+45^{\circ}$ .

**31.8.** С помощью подвижной карты звездного неба определить приблизительно координаты ближайшей к нам галактики, расположенной в районе созвездия Андромеды и видимой на небе как туманное пятнышко.

**31.9.** Зная географическую широту местности, определить, на каком расстоянии от зенита находится у Вас полюс мира. Каким будет ответ для Москвы, если географическая широта ее  $\varphi = 55^{\circ}45'$ .

**31.10.** Какое созвездие проходит через зенит 15 ноября в 22 ч в пункте вашего наблюдения (для широты Москвы  $\varphi = 55^{\circ}45'$ )?

**31.11.** Что называется эклипстикой? Под каким углом она наклонена к экватору?

**31.12.** Какие созвездия называются зодиакальными? Сколько их и как они называются?

**31.13.** Каковы координаты Солнца в день летнего солнцестояния? зимнего солнцестояния?

**31.14.** В день летнего солнцестояния (22 июня) прямое восхождение и склонение Солнца соответственно равны  $6^{\text{ч}}$  и  $+23^{\circ}27'$ . В каком созвездии находится Солнце в этот день?

**31.15.** В каком созвездии находится Солнце в день зимнего солнцестояния (22 декабря)? Использовать ответ к задаче 31.13.

**31.16.** Что такое кульминация светил? Какая формула связывает высоту светила в верхней кульминации  $h$ , склонение  $\delta$  и географическую широту места наблюдения  $\varphi$ ?

**31.17.** Определить полуденную высоту для центра Солнца в Москве в день летнего солнцестояния; зимнего солнцестояния.

**31.18.** Определить зенитное расстояние и высоту звезды Денеб ( $\delta = +45^{\circ}06'$ ) в верхней кульминации на северном полярном круге ( $\varphi = +66^{\circ}33'$ ).

**31.19.** Определить географическую широту места нахождения корабля, если в полдень высота центра солнечного диска была  $84^{\circ}5'$ , а его склонение  $18^{\circ}39'$ .

**31.20.** Начиная с какой географической широты, в летнее время Солнце будет незаходящим?

**31.21.** Начиная с географической широты  $51^{\circ}15'$ , звезда Вега будет незаходящей. Определить ее склонение.

**31.22.** Где в полдень в дни весеннего и осеннего равноденствий Солнце бывает в зените?

**31.23.** Горизонтальный параллакс Луны  $p = 57'$ . Принимая радиус Земли равным 6370 км, определить расстояние от Земли до Луны.

**31.24.** Определить горизонтальный параллакс Луны для случая, когда она находится в перигее и расстояние от нее до Земли равно  $3,63 \cdot 10^5$  км.

**31.25.** Во сколько раз радиус Солнца больше радиуса Земли, если горизонтальный параллакс Солнца  $8'',794$ , а средний угловой радиус Солнца равен  $16'$ ?

**31.26.** До ближайшей к нам звезды  $\alpha$  Центавра расстояние  $1\frac{1}{3}$  пк. Зная, что  $1 \text{ а.е.} = 1,5 \cdot 10^8 \text{ км} \approx 0,4845 \cdot 10^{-5} \text{ пк}$ , выразить расстояние до звезды в километрах.

**31.27.** Почему с помощью горизонтального параллакса нельзя определить расстояния до звезд?

**31.28.** Что такое годичный параллакс и как с его помощью определяют расстояние  $D$  до звезды?

**31.29.** Используя ответ к задаче 31.26, определить годичный параллакс ближайшей к нам звезды  $\alpha$  Центавра.

**31.30.** Расстояние до звезды Барнарда 1,83 пк. Каков ее годичный параллакс?

**31.31.** Годичный параллакс Сириуса  $0'',375$ . Сколько времени свет от звезды идет до Земли?

**31.32.** Что называется сидерическим месяцем? Какова его продолжительность для Луны?

**31.33.** Что такое синодический месяц? Какова его продолжительность для Луны?

**31.34.** Чем объяснить, что синодический месяц Луны продолжительнее его сидерического месяца примерно на двое суток?

**31.35.** Во время полного лунного затмения Луна остается слабо видимой. Чем это объясняется?

**31.36.** Во время полного лунного затмения Луна приобретает красноватый оттенок. Почему?

**31.37.** Возможен ли на Луне парниковый эффект?

**31.38.** Согласно первому закону Кеплера, орбита любой планеты есть эллипс с Солнцем в одном из его фокусов. Как будет меняться форма орбиты, если скорость небесного тела, перпендикулярная радиусу-вектору, на расстоянии 1 а.е. от Солнца будет возрастать?

**31.39.** Известно, что за равные промежутки времени радиус-вектор планеты описывает равные площади (второй закон Кеплера). В афелии или перигелии скорость Земли, перпендикулярная радиусу-вектору, будет большей?

**31.40.** Сидерический (звездный) период для планеты Плутон равен 248,4 года. Определить среднее расстояние от этой планеты до Солнца.

**31.41.** Третий закон Кеплера устанавливает следующую зависимость между периодами обращения планет вокруг Солнца и средними расстояниями от них до Солнца:  $T_1^2/T_2^2 = a_1^3/a_2^3$ , где  $T_1$  и  $T_2$  — периоды двух любых планет, а  $a_1$  и  $a_2$  — средние расстояния от них до Солнца. Если одной из планет будет Земля, для которой  $T_1 = 1$  год, а  $a_1 = 1$  а.е., то закон Кеплера запишется в виде  $T_2^2 = a_2^3$ . Используя эту зависимость, определить, на каком расстоянии (среднем) от Солнца находятся Венера и Уран, если 1 год на них равен соответственно 0,62 и 84,018 земного года. Расстояния выразить в астрономических единицах и километрах.

**31.42.** Определить продолжительность года на Марсе, зная, что среднее расстояние до Солнца у него в 1,524 раза больше, чем у Земли.

**31.43.** Объем Земли можно оценить, предположив, что она имеет форму шара радиусом 6400 км. Определить среднюю плотность Земли, если ее масса равна  $6,0 \cdot 10^{24}$  кг.

**31.44.** Средняя плотность Земли и Луны соответственно  $5,5 \cdot 10^3$  и  $3,5 \cdot 10^3$  кг/м<sup>3</sup>. Зная, что средняя плотность поверхностного слоя Земли  $3,0 \cdot 10^3$  кг/м<sup>3</sup>, объяснить, в чем состоит различие между внутренним строением Земли и Луны.

**31.45.** Третий закон Кеплера, уточненный на основе закона всемирного тяготения, можно использовать для определения соотношения между массой Солнца и массой какой-либо планеты, имеющей спутник, например, Земли:

$$\frac{T_3^2}{T_{\text{л}}^2} \frac{M_{\text{С}} + m_3}{m_3 + m_{\text{л}}} = \frac{a_3^3}{a_{\text{л}}^3}.$$

Если учесть, что масса Земли мала в сравнении с массой Солнца, а масса Луны — в сравнении с массой Земли, этот закон запишется следующим образом:  $M_{\text{С}}/m_3 = (a_3/a_{\text{л}})^3 / (T_{\text{л}}/T_3)^2$ . Определить массу Солнца по отношению к массе Земли, считая, что среднее расстояние от Земли до Луны 384 000 км =  $2,56 \cdot 10^{-3}$  а.е., а период обращения Луны 27,3 сут =  $7,5 \cdot 10^2$  года.

**31.46.** Масса Солнца в 333000 раз больше массы Земли, а его радиус в 109 раз больше земного. Определить среднюю плотность Солнца.

**31.47.** Известно, что средняя плотность планет-гигантов мала — от 700 до 1300 кг/м<sup>3</sup>. Что можно предположить о химическом составе этих планет?

**31.48.** Применимы ли к веществу Солнца и звезд, подобных ему, законы для идеальных газов, если учесть, что средняя плотность вещества, из которого они состоят, приблизительно  $1,4 \cdot 10^3$  кг/м<sup>3</sup>?

**31.49.** Вещество Солнца и многих звезд в большой степени состоит из полностью ионизованного атомарного водорода. Какой будет его молярная масса?



**31.50.** Оценить внутреннюю энергию Солнца, принимая его массу равной  $2 \cdot 10^{30}$  кг и температуру —  $1,6 \cdot 10^7$  К.

**31.51.** При какой наименьшей температуре водород будет существовать в виде высокотемпературной плазмы?

**31.52.** Принимая плотность и давление в центральных слоях Солнца равными соответственно  $1,5 \cdot 10^5$  кг/м<sup>3</sup> и  $4,0 \cdot 10^{10}$  МПа, оценить температуру в центре Солнца.

**31.53.** Какие из небесных тел подходят к определению точечного источника света? Почему?

**31.54.** Что такое блеск небесного светила?

**31.55.** По сравнению с невооруженным глазом телескопы не дают выгоды в увеличении наблюдаемого объекта. Почему же они применяются для наблюдения звезд?

**31.56.** Слабые звезды, видимые на пределе невооруженным глазом, имеют видимую звездную величину, равную 6. Во сколько раз яркость этих звезд меньше яркости звезд, видимая звездная величина которых равна единице?

**31.57.** Разность видимых звездных величин ближайшей к нам звезды  $\alpha$  Центавра и слабейшей, которую наблюдают с помощью телескопа, составляет 24. Сравнить эти звезды по видимой яркости.

**31.58.** Видимая звездная величина Сириуса ( $\alpha$  Б. Пса) приблизительно  $-1,6$ . Во сколько раз блеск (видимая яркость) звезды, видимая звездная величина которой 3,4, меньше, чем у Сириуса?

**31.59.** Каким соотношением связана абсолютная звездная величина  $M$  с видимой звездной величиной  $m$  и расстоянием до светила в парсеках?

**31.60.** Чем объяснить, что абсолютные звездные величины Солнца и  $\alpha$  Центавра меньше их видимых звездных величин?

**31.61.** Какие звезды называют белыми карликами?

**31.62.** Что можно сказать о плотности белых карликов и ускорении свободного падения на них? Использовать ответ к задаче 31.61.

**31.63.** На что указывает расщепление спектральных линий при излучении белыми карликами?

**31.64.** Что такое нейтронные звезды и как они были обнаружены?

**31.65.** После открытия нейтронных звезд во временной последовательности: радиопульсары, рентгеновские пульсары, барстеры — какой прогноз возможен при дальнейшем изучении нейтронных звезд?

**31.66.** Плотность подавляющей части вещества нейтронных звезд близка к плотности ядерной материи (примерно  $2,8 \cdot 10^{17}$  кг/м<sup>3</sup>), и поэтому в их недрах свойства вещества имеют много общего со свойствами вещества атомных ядер. Почему же нейтронные звезды нельзя рассматривать, как гигантские атомные ядра?

**31.67.** Что входит в понятие «черная дыра»?

**31.68 \*).** Скорость света не зависит от того, в покое или в движении находится источник света или наблюдатель. Однако длины волн, которые принимает наблюдатель в случае покоящегося ( $\lambda_0$ ) или движущегося ( $\lambda$ ) источника, различны, и их разность дает так называемое доплеровское смещение длины волны ( $\Delta\lambda = \lambda - \lambda_0$ ). При скоростях объектов, далеких от скорости света, справедливо выражение  $(\lambda - \lambda_0)/\lambda = z = v/c$ , где  $z$  — относительное смещение спектральной линии, а  $v$  — скорость объекта, излучающего свет. Сдвиг линий в красную область спектра (красное смещение) дает  $z > 0$  и соответствует удалению объекта. Относительное красное смещение для одной из галактик составляет 0,001. Приближается или удаляется галактика по отношению к земному наблюдателю? Определить смещение для голубой линии водорода  $\lambda_0 = 486,1$  нм. Какова скорость движения галактики по лучу зрения в направлении наблюдателя?

**31.69.** Определить линейную скорость вращения точек на солнечном экваторе, если для зеленой линии водорода  $\lambda_0 = 500$  нм доплеровское смещение равно 0,0035 нм.

**31.70.** При годичном движении Земли линии в спектрах звезд, к которым в данный момент направлено движение Земли, смещены в фиолетовую сторону. Определить скорость движения Земли, если для зеленой линии  $\lambda_0 = 500$  нм смещение составляет 0,05 нм.

**31.71.** Определить длину линии в наблюдаемом спектре звезды, если Земля, обращаясь по орбите, движется к звезде. Лабораторная длина волны спектральной линии звезды равна 486,1 нм.

**31.72.** В 1960 г. было определено относительное красное смещение в спектре радиогалактики 3С 295 \*\*), равное 0,46. Примерное расстояние от галактики до нас равно 5 млрд. световых лет. Приближается или удаляется от нас радиогалактика? Какова ее скорость по лучу зрения? На сколько будет сдвинута зеленая линия  $\lambda_0 = 500$  нм?

**31.73.** В 1963 г. при измерении красного смещения в спектре квазара \*\*\*) 3С 273 было установлено, что оно равно 0,16. Определить скорость по лучу зрения, с которой изменяется его расстояние от Земли.

**31.74.** Для квазара 3С 9 параметр красного смещения  $z = \frac{\lambda - \lambda_0}{\lambda_0} = 2$ . Почему в данном случае нельзя применить формулу  $z = v/c$ . Определить значение скорости для данного объекта (см. сноску к задаче 31.68).

\*) При больших скоростях, сравнимых со скоростью света:  $z = \frac{1 + v/c}{\sqrt{1 - v/c}} - 1$ .

\*\*) Объект 3С 295 расшифровывается следующим образом: объект № 295 в третьем Кембриджском радиокаталоге.

\*\*\*) Квазары — мощные внегалактические источники электромагнитного излучения, представляющие собой активные ядра далеких галактик, т.е. компактные массивные сгущения вещества в центральной области многих галактик.

**31.75.** С какой скоростью летит космический корабль, если красный луч лазера, посланный с Земли на корабль, кажется космонавту зеленым? Увеличивается или уменьшается расстояние между Землей и кораблем? Длины волн красного и зеленого света принять равными соответственно 620 и 550 нм.

**31.76.** Первый в мире искусственный спутник Земли, запущенный в Советском Союзе 4 октября 1957 г., двигался по орбите, средняя высота которой над Землей была  $H = 588$  км. Определить кинетическую энергию спутника на орбите. Масса спутника  $m = 83,6$  кг  $\approx 84$  кг,  $R_3 = 6400$  км и  $g_3 = 9,8$  м/с<sup>2</sup>. Орбиту считать круговой.

**31.77.** Первый в мире летчик-космонавт Ю. А. Гагарин на корабле-спутнике «Восток-1» двигался вокруг Земли по орбите, среднее расстояние которой от поверхности Земли равнялось 251 км. Считая орбиту круговой, определить скорость корабля на орбите и период обращения его вокруг Земли.

**31.78.** Какую среднюю линейную скорость будет иметь на круговой орбите корабль-спутник, если период его обращения вокруг Земли равен 88,6 мин? Радиус Земли принять равным  $6,4 \cdot 10^6$  м.

**31.79.** Спутник запущен в плоскости экватора по круговой орбите так, что находится над одной и той же точкой экватора. Определить радиус орбиты, высоту над поверхностью Земли и орбитальную скорость спутника.

**31.80.** Скорость удаления галактик пропорциональна расстоянию между ними ( $v = Hr$ , где  $H$  — постоянная Хаббла). Определить скорость, с которой удаляются друг от друга галактики, разделенные расстоянием 10 Мпк. Считать, что  $H = 75$  км/(с · Мпк).

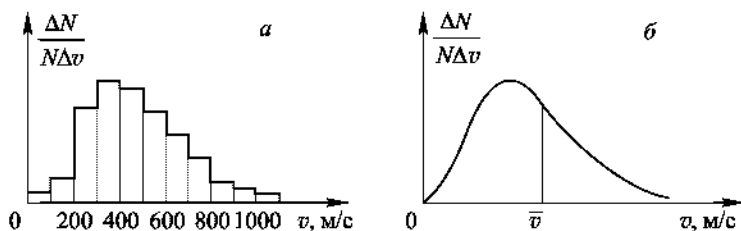
## ОТВЕТЫ \*)

### § 1. Основы молекулярно-кинетической теории

**1.1.** 1500 моль. **1.2.**  $0,92 \text{ м}^2$ ; 13 кг. **1.3.**  $2 \cdot 10^3$  моль. **1.4.**  $2,2 \cdot 10^{-3}$  моль; для всех газов одинаково. **1.5.**  $29 \cdot 10^{-3}$  кг/моль. **1.6.** Нет;  $\nu_1/\nu_2 = M_2/M_1$ . **1.7.**  $5,3 \cdot 10^{-26}$ ;  $7,3 \cdot 10^{-26}$ ;  $3,0 \cdot 10^{-26}$ ;  $2,8 \cdot 10^{-26}$  кг. **1.8.**  $4,6 \cdot 10^{-26}$  кг;  $3,2 \times 10^{25}$  молекул. **1.9.**  $2,2 \cdot 10^{22}$ ;  $1,4 \cdot 10^{22}$ ;  $2,7 \cdot 10^{25}$ . **1.10.**  $1,5 \cdot 10^{23}$ ;  $4,3 \cdot 10^{22}$ ;  $2,7 \cdot 10^{25}$ . **1.11.**  $2,8 \cdot 10^{22}$ . **1.12.**  $3,3 \cdot 10^{22}$ ;  $6,2 \cdot 10^{21}$ ;  $1,1 \cdot 10^{22} \text{ см}^{-3}$ ;  $1,65 \cdot 10^{16}$ . **1.13.** 36 ч 12 мин. **1.14.**  $1,75 \cdot 10^{12} \text{ см}^{-3}$ . **1.15.**  $4 \cdot 10^{-10} \text{ м}$ . **1.16.**  $2,4 \cdot 10^{-9} \text{ м}$ . **1.17.**  $2,2 \cdot 10^{-9} \text{ м}$ ;  $2,4 \cdot 10^{-16} \text{ м}^2$ . **1.18.**  $2,45 \cdot 10^{-29} \text{ м}^3$ ;  $2,9 \cdot 10^{-10} \text{ м}$ . **1.19.**  $3,9 \times 10^4$ . **1.20.**  $1,62 \cdot 10^{24}$ . **1.21.**  $16 \cdot 10^{-3}$  кг/моль; метан. **1.22.** Диффузия и броуновское движение. **1.23.** Агрегатное состояние, температура вещества, внешнее давление. **1.24.** Может, если концентрация и температура не везде одинаковы. **1.25.** Потому что поле тяготения, действуя на молекулы, ускоряет их движение в сторону Земли и замедляет, когда они движутся в обратном направлении. **1.26.** Нет; в холодной части цилиндра концентрация выше. **1.27.** Давление в сосуде А возрастает, так как более легкий газ проходит внутрь быстрее, чем выходит наружу воздух, находящийся в сосуде; ртуть, вытесняемая в правое колено трубки, замыкает цепь звонка. **1.28.** Хаотическое движение молекул сохраняется и в условиях невесомости. **1.29.** Диффузия сахара в воду. **1.30.** При прокаливании стального изделия в смеси из угля и различных солей атомы углерода диффундируют в поверхностный слой металла, повышая прочность изделия. **1.31.** Спай приобретает большую прочность в результате того, что расплавленная медь диффундирует в поверхностный слой спаиваемых деталей тем глубже, чем дольше протекает диффузия. **1.32.** Ударами молота достигается хороший контакт свариваемых кусков металла; при температуре белого каления взаимная диффузия частиц происходит быстрее и на большую глубину. **1.33.** При сильном сдавливании, сопровождающемся размягчением поверхностей соединяемых деталей и увеличением взаимной диффузии частиц, силы сцепления достигают величин, обеспечивающих прочное их соединение. **1.34.** Поднимется, опустится; выступит наружу, втянется. **1.35.** Результирующая действующих на частицу сил непрерывно и беспорядочно изменяется по модулю и направлению: чем крупнее частица, тем большая часть действующих на нее сил взаимно уравновешивается. Нет. **1.36.** Перемещение молекул затрудняется из-за частых столкновений молекул в результате их хаотического движения. **1.37.** Нет: каждый отрезок — длина спрямленного пути частицы за малый промежуток времени:

\*) В ответах, как правило, приводятся приближенные значения.

элементы этого пути можно еще уменьшить, наблюдая за меньший промежуток времени (при большем увеличении, даваемом микроскопом). **1.38.** 530 м/с. **1.39.** 450, 490 и 400 м/с. **1.40.** На 8,6 мм. **1.41.** При неограниченном уменьшении интервалов скоростей ломаная линия, ограничивающая сверху прямоугольники диаграммы (см. рисунок а), превращается в плавную кривую линию



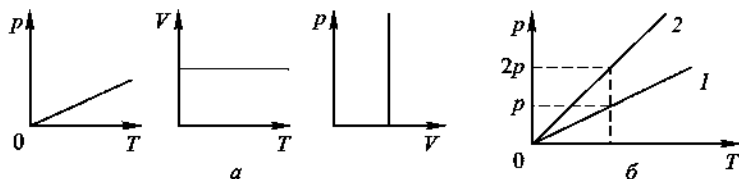
К ответу 1.41

(см. рисунок б). **1.42.** На различие в скоростях молекул. **1.43.** 3340 мин<sup>-1</sup>. **1.44.** До 1515 К. **1.45.** 520 м/с. **1.46.** 1400 м/с. **1.47.** Силы молекулярного сцепления в твердых телах значительны, что и обеспечивает им постоянство объема и формы. **1.48.** Одновременно. **1.49.** В обычных условиях силы молекулярного сцепления между молекулами газа практически отсутствуют. **1.50.** Наличнем сил отталкивания, которые резко возрастают при сближении молекул. **1.51.** Края разбитой чашки, в отличие от плиток, образуют зазор, больший радиуса сферы действия молекул. **1.52.** При условии равновесия сил притяжения и отталкивания. **1.53.** На малом участке графика, изображенном прямой линией, в обе стороны от положения равновесия. **1.54.** В твердом состоянии больше, так как в этом случае молекулы ближе расположены друг к другу. **1.55.** Нет: в явлениях, относящихся к молекулярной физике, сами молекулы не изменяются и поэтому изменение внутренней энергии происходит за счет изменения кинетической и потенциальной их энергии. **1.56.** По мере увеличения температуры уровень повышается; среднее расстояние между молекулами увеличивается. **1.57.** Нет. **1.58.**  $4,00 \cdot 10^{-8}$  м. **1.59.**  $1,3 \cdot 10^{-7}$  м. **1.60.**  $1,5 \cdot 10^{10}$  и  $7,5 \cdot 10^9$  с<sup>-1</sup>;  $2,7 \cdot 10^{-10}$  и  $3,7 \cdot 10^{-10}$  м. **1.61.**  $6,57 \cdot 10^9$  с<sup>-1</sup>. **1.62.**  $2,11 \cdot 10^{-23}$  кг·м/с. **1.63.**  $3,7 \cdot 10^{-10}$  м. **1.64.**  $2,7 \times 10^{-10}$  м. **1.65.**  $d_{эф \text{ CO}_2} / d_{эф \text{ O}_2} = 1,24$ .

## § 2. Законы идеальных газов

**2.1.** При условиях, когда расстояние между молекулами значительно больше эффективного диаметра, что возможно при невысоких давлениях и значительных температурах. **2.2.** Нет, см. ответ 2.1. **2.3.** Водород и гелий. **2.4.** 0,42 кПа. **2.5.** 101,3 кПа. **2.6.** Увеличится до 879 мм. Нет. **2.7.** 250 кПа. **2.8.** На глубине 20,1 м. **2.9.** Общий вес чашки и гири на ней равен сумме весов всей трубки и ртутного столба в ней. Да (например, при увеличении атмосферного давления чашка с гирями поднимется).

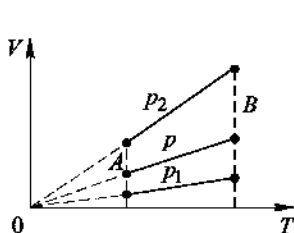
**2.10.** В условиях невесомости сохраняется хаотическое движение молекул газов, составляющих «атмосферу» кабины. **2.11.** В ртутном барометре ртуть заполнит трубку доверху, а anerоид будет действовать нормально. Водомерным стеклом пользоваться нельзя. **2.12.** На 10,5 м; на 1,92 кПа. **2.13.** 88; 77; 25,4 и 4,8 кПа. **2.14.** 770 Н. **2.15.** 581 кПа. **2.16.** 480 Н. **2.17.** 0,96 МПа. **2.18.** 259 кПа. **2.19.**  $5,6 \cdot 10^{-21}$  Дж. **2.20.**  $1,54 \text{ кг/м}^3$ . **2.21.** 500 м/с. **2.22.**  $5,4 \cdot 10^{-21}$  и  $9 \cdot 10^5$  Дж; 1,5 МПа. **2.23.**  $7 \cdot 10^{-21}$  и 300 Дж;  $2 \text{ кг/м}^3$ . **2.24.**  $p_{273} = 109,2 \text{ кПа}$ ,  $p_{373} = 149 \text{ кПа}$ ,  $p_{180} = 72 \text{ кПа}$ ; 200 К. **2.25.** 1,1 МПа. **2.26.** 73 К. Не изменится. **2.27.**  $3,3 \cdot 10^{11} \text{ м}^{-3}$  и  $3,3 \cdot 10^5 \text{ см}^{-3}$ . **2.28.**  $1,24 \cdot 10^{-2}$  и  $4,38 \cdot 10^{-3} \text{ м/с}$ ;  $4,25 \cdot 10^{-8} \text{ м}$ . **2.29.**  $2 \times 10^{-8} \text{ м/с}$ . **Указание.** 1)  $z/t = N_A m_0 / (\rho s t)$ ; 2)  $p = N_A m_0 \Delta v / (s t)$ , где  $\Delta v = v$  (удар неупругий); 3)  $\varepsilon = m_0 v^2 / 2$ . **2.30.** 55 с. **2.31.** 458 м/с; 269 К. **2.32.** Увеличится в 2,25 раза. **2.33.**  $1,9 \cdot 10^{16}$ . **2.34.** 810 кПа. **2.35.** 613 л. **2.36.** 240 К. **2.37.** 576 л. **2.38.** 26 л. **2.39.** 47 кПа; 19,5 г. **2.40.** 223 К; 34,2 г. **2.41.** Увеличится на 8%. **2.42.** 2,7 Н. **2.43.** 294 кПа. **2.44.** 220. **2.45.** На 8,7 м. **2.46.** 0,47 кг/м<sup>3</sup>. **2.47.** 2 и 0,5 кг/м<sup>3</sup>. **2.48.** 3,4 м/с. **2.49.** 1173 К. **2.50.** 3,73 кг. **2.51.** 294 К. **2.52.**  $R = 8,31 \text{ Дж/(моль} \cdot \text{К)}$ . **2.53.** 560 К. **2.54.** 14. **2.55.** 13 МПа. **2.56.** 2,0 кг. **2.57.** Уменьшится на  $4 \cdot 10^{25}$  молекул. **2.58.**  $T_1 = \frac{(p_0 + \rho g h) T}{p_0}$ . **2.59.**  $\Delta h = \frac{h_1 (T_2 - T_1)(p_0 S + m_1 g) - m_2 g T_1}{p_0 S + (m_1 + m_2) g}$ . **Указание.**  $\Delta h = (V_2 - V_1) / S$ . Из уравнения состояния газа находим  $V_2$ :  $V_2 = (p_1 V_1 T_2 / p_2 T_1)$ ; здесь  $V_1 = h_1 S$ ,  $p_1 = p_0 + m_1 g / S$ ,  $p_2 = p_0 + (m_1 + m_2) g / S$ .  $\Delta h = \frac{1}{S} \left( \frac{p_1 V_1 T_2}{p_2 T_1} - V_1 \right) = \frac{V_1}{S} \frac{p_1 T_2 - p_2 T_1}{p_2 T_1}$ . Подставляя в  $\Delta h$  значения  $V_1$ ,  $p_1$  и  $p_2$ , получим окончательный ответ. **2.60.** 2,11 кН. **2.61.** 40 кг; 240 м<sup>3</sup>. **2.62.** 1,2 м<sup>3</sup>. **2.63.** 0,17 м. **2.64.**  $T_{2\text{мин}} = 81 T_1 / 80$ ;  $T_2 = T_1$ . **2.65.** Масса сухого воздуха; больше в 1,23 раза. **2.66.** 0,12 кг. **2.67.**  $\rho_{\text{см}} = \frac{(m_1 + m_2) p M_1 M_2}{(m_1 M_2 + m_2 M_1) R T}$ ;  $M_{\text{см}} = \frac{(m_1 + m_2) M_1 M_2}{m_1 M_2 + m_2 M_1}$ . **2.68.** 8,54 кПа. **2.69.** 4%. **2.70.** 4,99 кПа. **2.71.** При горении лампы давление газа в ее баллоне не должно намного превышать атмосферное давление. **2.72.** Давление воздуха в приложенной к телу охлаждающей медицинской банке становится меньше атмосферного, и она плотно прижимается к телу. **2.73.** 144 кПа. **2.74.** 407 К. **2.75.** 110 кПа. **2.76.** 270 К; 132 кПа. **2.77.** 323 и 238 К. **2.78.** 4,05 МПа. **2.79.**  $1,47 \cdot 10^{-3}$  и  $1,76 \cdot 10^{-3} \text{ Па}$ . **2.80.**  $T = n(k)$ ;  $\gamma = 1/n = 1/T$ . **2.81.** Давление увеличивается от двух до четырех раз в зависимости от степени диссоциации. **2.82.** См. рисунок а; изменится только график  $p$ ,  $T$  (см. рисунок б). **2.83.** См. рисунок;



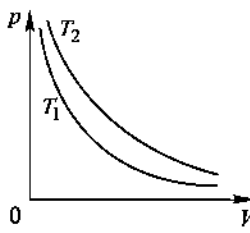
К ответу 2.82



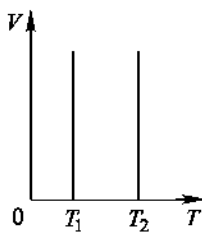
05, 03; отрезок 05. **2.105.** На 290 К. **2.106.** См. рисунок. **2.107.** Процесс можно считать изотермическим, если стенки замкнутого сосуда будут обладать хорошей теплопроводностью, окружающая среда — большой теплоемкостью и изменение объема газа будет протекать достаточно медленно.



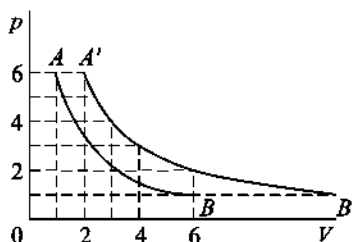
К ответу 2.106



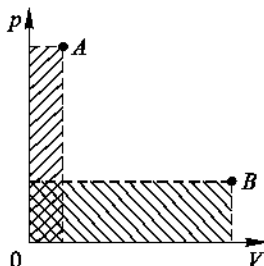
К ответу 2.108



**2.108.** См. рисунок. **2.109.** При различном числе молей. **2.110.** См. рисунок; график  $A'B'$ . **2.111.** Большая энергия соответствует состоянию газа в точке  $B$ ; в два раза (см. рисунок). **2.112.** 78 кПа. **2.113.** 173 кПа.

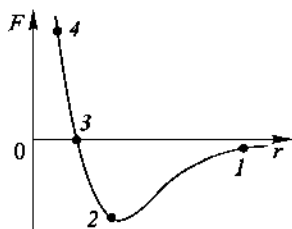


К ответу 2.110



К ответу 2.111

**2.114.** На  $V_1/(n+1)$ . **2.115.** 180 кПа. **2.116.** 198 кПа. **2.117.** На 15 см. **2.118.**  $p = p'_1 = p'_2 = p'_3 = \frac{p_1 V_1 + p_2 V_2 + p_3 V_3}{V_1 + V_2 + V_3}$ ,  $V'_1 = \frac{p_1 V_1 (V_1 + V_2 + V_3)}{p_1 V_1 + p_2 V_2 + p_3 V_3}$ ,  $V'_2 = \frac{p_2 V_2 (V_1 + V_2 + V_3)}{p_1 V_1 + p_2 V_2 + p_3 V_3}$ ,  $V'_3 = \frac{p_3 V_3 (V_1 + V_2 + V_3)}{p_1 V_1 + p_2 V_2 + p_3 V_3}$ . Указание. Воспользоваться законом сохранения энергии и законом



К ответу 2.134

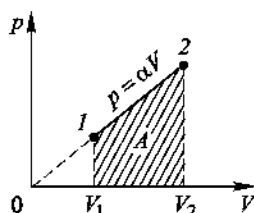
Бойля-Мариотта. **2.119.**  $h = [V_2/(V_1 + V_2)] H$ . Указание. Применить закон Бойля-Мариотта дважды ко всему объему и затем к  $V_2$ . **2.120.**  $1,0 \cdot 10^5$  Па; 147 мм. **2.121.** 126 мм. **2.122.** 101,3 кПа. **2.123.** 10,3 м; 6,4 мм<sup>3</sup>. **2.124.** 20,7 м. **2.125.** 304 кПа. **2.126.** 1,5 мин. **2.127.** 84; 72; 60. **2.128.** 610 кПа. **2.129.** 120. **2.130.** 43,2 кПа; 32,4 кПа. **2.131.** 100 кПа. **2.132.** 13,6 кг. **2.133.** 0,8 дм<sup>3</sup>. **2.134.** См. рису-



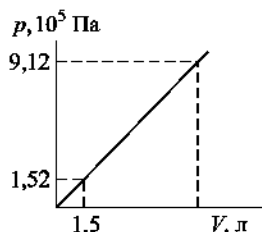
нок. Для участка графика от 1 до 3 объем, найденный экспериментально, меньше расчетного по закону Бойля–Марнотта. В точке 3 эти объемы равны. На участке 3–4 экспериментальный объем больше расчетного.

### § 3. Основы термодинамики

- 3.1.** 160 л. **3.2.** 8 °С. **3.3.** 225 и 75 л. **3.4.** 34 °С. **3.5.** 30 °С. **3.6.** 40 °С. **3.7.** 1,3 кг. **3.8.** 300 г. **3.9.** 460 Дж/(кг·К). **3.10.** 98 °С. **3.11.** 380 Дж/(кг·К). **3.12.** 168 г. **3.13.** 700 °С. **3.14.** 27 °С. **3.15.** На 2 °С. **3.16.** 0,43 кг. **3.17.** До 908 °С. **3.18.** 181 Дж/К. **3.19.** 119 МДж. **3.20.** До 26 °С. **3.21.** 0,078 м<sup>3</sup>. **3.22.** 270 г. **3.23.** 310 кг. **3.24.** 41 %. **3.25.** 24 %. **3.26.** 1,67 т. **3.27.** 0,52 т. **3.28.** 72 МДж. **3.29.** 56 кг. **3.30.** При соприкосновении с быстро вращающимся диском металл разогревается до температуры плавления. **3.31.** На 0,04 К. **3.32.** На 6 К. **3.33.** На 1,7 К. **3.34.** 6,38 км; 14,8 км. **3.35.** Медный; на 15 К. **3.36.** 0,63 кВт; на 20 К. **3.37.** На 8,5 К. **3.38.** На 38 К. **3.39.** 3,3 м/с. **3.40.** 60 Вт. **3.41.** На 35 К. **3.42.** На 17,6 К. **3.43.** 6,7 Н·м. **3.44.**  $Q = \frac{u_1^2 m_1}{2} \frac{m_2}{m_1 + m_2}$ ; на  $\Delta T = \frac{m_2}{c(m_1 + m_2)^2} \frac{m_1 u_1^2}{2}$ . **3.45.**  $Q = \frac{m_1 m_2 (u_1 + u_2)^2}{2(m_1 + m_2)}$ . **3.46.** На 0,006 К. **3.47.** Средняя кинетическая энергия поступательного движения молекул газа при одной и той же температуре одинакова и равна  $\bar{E}_{\text{пост}} = \frac{3}{2} kT$ . Полная кинетическая энергия молекул зависит от числа атомов в молекуле и находится из формулы  $\bar{E} = \frac{i}{2} kT$ , где  $i$  — число степеней свободы;  $E_{\text{He}} = \frac{3}{2} kT$ ;  $E_{\text{H}_2} = \frac{5}{2} kT$ ;  $E_{\text{CO}_2} = 3kT$ . **3.48.**  $1,66 \times 10^{-20}$  Дж; 400 К. **3.49.**  $5,6 \cdot 10^{-21}$  и  $8,7 \cdot 10^{-21}$  Дж; 1840 и 2300 м/с. **3.50.** 8,3 кДж. **3.51.** 416 кДж. **3.52.** На 50 Дж и 3,3 кДж; на  $3,3 \cdot 10^{-21}$  и  $5,5 \cdot 10^{-21}$  Дж. **3.53.** 608 кДж. **3.54.** 6,0 кДж. **3.55.** 14 кДж. **3.56.** 0,34 кДж. **3.57.** 24,6 кДж. **3.58.** 289 К. **3.59.** а) 4 МДж; б)  $(p_1 + p_2)(V_2 - V_1)/2$ . **3.60** \*).  $A = [2p_1 - (V_2 - V_1) \operatorname{tg} \alpha](V_2 - V_1)/2$ . **3.61.** См. рисунок;  $A = \alpha(V_2^2 - V_1^2)/2$ ; поглощается. **3.62.** См. рисунок; 4 кДж;  $\alpha = 6 \cdot 10^6$  К/м<sup>6</sup>.



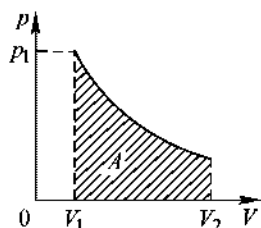
К ответу 3.61



К ответу 3.62

\*) Задача может быть решена без  $p_1$ ; в этом случае ответ будет  $A = (V_2 - V_1)^2 \operatorname{tg} \alpha / 2$ .

**3.63.**  $A = (p_2 - p_1)(V_2 - V_1)$ . **3.64.**  $A = (p_2 - p_1)(V_3 - V_1)/2$  для обоих случаев. **3.65.** 4,3 г; увеличилась на 1,15 кДж. **3.66.** На 71 К. **3.67.** 25 кДж; не



К ответу 3.69

зависит. **3.68.** 13,2 кДж. *Указание.*  $A = \int_{V_1}^{V_2} p dV$ ;

$p = (m/M) (RT/V)$ . **3.69.** 580 Дж. *Указание.*

$A = p_1 V_1 \ln(V_2/V_1)$ ; см. рисунок. **3.70.** На

совершение газом работы. **3.71.**  $\Delta U = 0$  и 250 Дж.

**3.72.** В обоих случаях совершена одинаковая

работа  $A_1 = A_2 = Q$ . **3.73.**  $A = p_2 V_2 \ln(V_2/V_1)$ .

*Указание.* См. ответ к задаче 3.68, где

$(m/M) RT = p_1 V_1 = p_2 V_2$ . **3.74.** На изменение

внутренней энергии газа, т.е. на его нагрева-

ние. **3.75.**  $Q_1 = \frac{3}{2} R$ ,  $Q_2 = \frac{5}{2} R$ ,  $Q_3 = 3R$ , где  $R = 8,31$  Дж/(моль · К).

**3.76.** 8,3 кДж, 20,8 кДж. **3.77.**  $M = 29 \cdot 10^{-3}$  кг/моль — воздух. **3.78.** 363 К,

726 кПа. **3.79.**  $Q = \Delta U = 45$  кДж. **3.80.** При изобарном нагревании

теплота идет на увеличение внутренней энергии газа и соверше-

ние им работы. **3.81.** На  $R = 8,31$  Дж/(моль · К). **3.82.**  $M = 28 \times$

$\times 10^{-3}$  кг/моль — азот. **3.83.** 20 л. **3.84.** 2,52 МДж, на 6,3 и 8,82 МДж.

**3.85.** 425, 120 и 545 кДж. **3.86.** 15 и 45 кДж, 375 К. **3.87.**  $Q_{\text{пол}} =$

$= (i/2)(p_2 V_2 - p_1 V_1) + p_2 (V_2 - V_1)$ ,  $Q_{\text{отд}} = (i/2)(p_2 V_2 - p_1 V_1) + p_1 (V_2 - V_1)$ ;

$\eta = \frac{Q_{\text{пол}} - Q_{\text{отд}}}{Q_{\text{пол}}} = \frac{(p_2 - p_1)(V_2 - V_1)}{(i/2)(p_2 V_2 - p_1 V_1) + p_2 (V_2 - V_1)}$ . **3.88.**  $A = R(\sqrt{T_3} - \sqrt{T_1})^2$ ;

$Q_{\text{пол}} = R\left(\frac{5}{2} T_3 - \frac{3}{2} T_1 - \sqrt{T_1 T_3}\right)$ , на участках 1-2-3 газ получает теплоту,

а на участках 3-4-1 отдает,  $\eta = 2(\sqrt{T_3} - \sqrt{T_1})^2 / (5T_3 - 3T_1 - 2\sqrt{T_1 T_3})$ .

**3.89.** В двух последних примерах. **3.90.** В адиабатном, так как в этом

процессе одновременно изменяются и концентрация, и температура, в изотер-

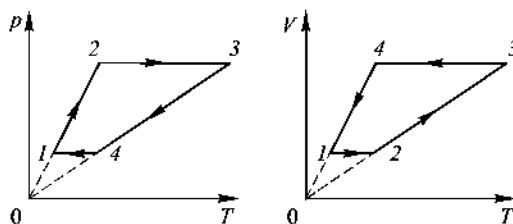
мическом же процессе температура остается неизменной, это легко объяснить

из формулы  $p = nkT$ . Внутренняя энергия газа уменьшается при адиабатном

расширении и не изменяется при изотермическом процессе. **3.91.** 120 Дж.

**3.92.** 8,31 кДж, 400 К. **3.93.** Уменьшается,  $\Delta U = 3(p_1 V_1 - p_2 V_2)$ .

**3.94.** 4,92 МПа, 702 К, 316 кДж. **3.95.** См. рисунок, участки 1-2 и 2-3,

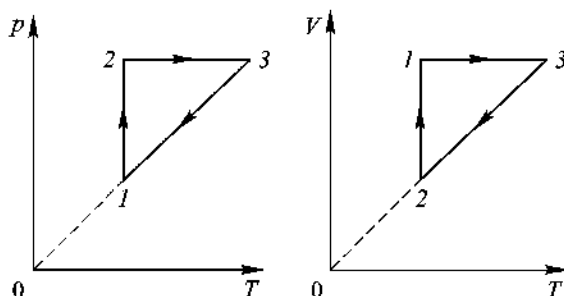


К ответу 3.95

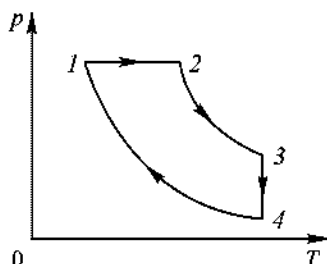
точка 3. **3.96.** См. рисунок; точкам 1 и 2. **3.97.** См. рисунок, на участках 1-2

и 4-1. **3.98.** В случае утечки газа. *Указание.* При повышении температуры и

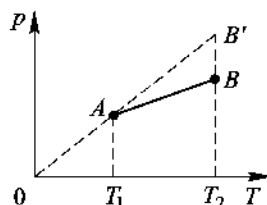
неизменной массе состояние газа соответствовало бы т.  $B'$  (см. рисунок). Из уравнения  $pV = \frac{m}{M}RT$  следует, что при постоянном объеме и температуре  $T_2$  давлению в т.  $B$  соответствует меньшая масса. **3.99.**  $\Delta U = \frac{5}{2}(p_2V_2 - p_1V_1)$ ;



К ответу 3.96



К задаче 3.97



К ответу 3.98

$A = p_2(V_2 - V_1)$ ;  $\eta = 2p_2(V_2 - V_1)/[5(p_2V_2 - p_1V_1) + 2p_2(V_2 - V_1)]$ . **3.100.**  $\eta = 2(p_2 - p_1)(V_2 - V_1)/[3(p_2V_2 - p_1V_1) + 2p_2(V_2 - V_1)]$ . *Указание.*  $\eta = A/Q$ , где  $A = (p_2 - p_1)(V_2 - V_1)$ , а  $Q = \Delta U_{3,1} + A_{2,3}$ . **3.101.** 39%. **3.102.** 105 кВт. **3.103.** 8,8 МДж. **3.104.** 11 кг. **3.105.** На 61 км. **3.106.** 35%, 66 т. **3.107.** Каменный уголь марки А-1;  $2,06 \cdot 10^7$  Дж/кг. **3.108.** 18,4 т; 44 МВт.

## § 4. Свойства паров. Кипение. Водяной пар в атмосфере

**4.1.** При безветрии плотность водяного пара над поверхностью ткани или травы больше, чем при ветре, испарение происходит медленнее. **4.2.** Нет, происходит и конденсация, но испарение преобладает над конденсацией. **4.3.** В газонаполненных лампах распыление нити при той же температуре происходит медленнее, чем в вакуумных. **4.4.** В пористом сосуде энергия затрачивается не только на испарение воды с поверхности, но и на испарение через поры. **4.5.** При дожде площадь испаряющей поверхности массы распыленной дождевой воды очень велика, а энергия же, идущая на испарение воды, заимствуется

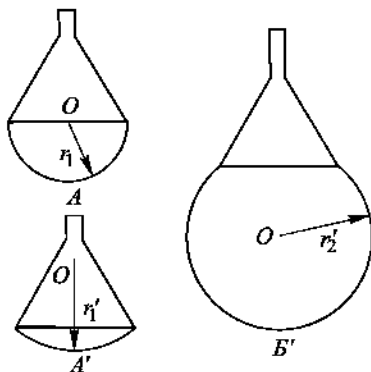
из окружающего воздуха. **4.6.** Испарение происходит за счет уменьшения внутренней энергии воды. **4.7.** Температура жидкости понижается, так как за пределы жидкости выходят молекулы с большей энергией, средняя кинетическая энергия молекул жидкости уменьшается. **4.8.** Да. **4.9.** С повышением температуры уменьшается. **4.10.** Да, если конденсацию производить при более низких температурах, чем испарение. **4.11.** Нет, скорость испарения возрастает больше по двум причинам: увеличивается средняя кинетическая энергия молекул и уменьшается работа выхода. **4.12.** До наступления динамического равновесия между испарением и конденсацией. Пар становится насыщающим, когда его плотность и давление максимальны при данной температуре. **4.13.** Да; при охлаждении насыщающего пара и отсутствии центров конденсации. Такой пар называют пересыщенным. **4.14.** Одновременно с возрастанием средней кинетической энергии молекул растут их концентрация и плотность пара. **4.15.** Наклонить трубку, удерживая ее в вертикальной плоскости; при отсутствии воздуха, жидкость будет стоять в обоих коленях на одном уровне. **4.16.** 7,37 кПа. Уменьшится на 0,7 мг. **4.17.** 1,6 кПа. Ненасыщенный. **4.18.** 1 кПа. Насыщенный. Из единицы объема воздуха выделится 2,2 г воды. **4.19.** Испарение молекул воды в вакуум при сушке фруктов происходит интенсивнее, чем в пространство, заполненное газом; 33 г. **4.20.**  $4,86 \times 10^{-3}$ ,  $17,2 \cdot 10^{-3}$  и  $0,588 \text{ кг/м}^3$ . **4.21.** 2,1, 3,6 и 12 кПа. **4.22.** На  $0,191 \text{ м}^3$ . **4.23.**  $H = \left( \frac{\rho RT}{pM} - 1 \right) h$ . **4.24.** При 298 К. **4.25.** 8 л; 0,5 г. **4.26.** Пар, вода; вода, пар; пар, пар. **4.27.** 7,6 %. **4.28.**  $Q = \frac{rMA}{RT}$ . **4.29.** Температура кипения с возрастанием давления увеличивается. В шахте она выше. **4.30.** Когда давление насыщенных паров равно внешнему давлению на свободную поверхность жидкости; нет. **4.31.** 2,33 кПа. 47,3 кПа. **4.32.** Нет. **4.33.** Нет. **4.34.** 200 и 80 кДж. **4.35.** 1,19 МДж. **4.36.** 54,2 °С. **4.37.** 13 °С. **4.38.**  $r = 2c(t_2 - t_1)t_2/t_1$ . **4.39.**  $2,26 \cdot 10^6 \text{ Дж/кг}$ . **4.40.** 39 г. **4.41.** Отрезок  $BC$  изображает процесс конденсации пара, отрезки  $AB$ ,  $CM$ ,  $KL$  и  $KN$  — изменения температуры пара, конденсата, калориметра и находившейся в нем первоначально воды. Отрезки  $Ob$ ,  $cm$ ,  $Ol$ ,  $On$  на оси  $OQ$  — количество теплоты, полученной или отданной при этих процессах. **4.42.** 66 °С. **4.43.** 39 кг. **4.44.** До 360 К. **4.45.** 16,3 г. **4.46.** 10 л. **4.47.** 40 %. **4.48.** 4,8 м/с. **4.49.** 50,6 мин. **4.50.** 70 г. **4.51.** 65 %. **4.52.** Критическое давление, температура и удельный объем. **4.53.** Нулю. **4.54.** Нет. **4.55.** Кислород. **4.56.** Плотность водяного пара в салоне из-за присутствия людей увеличивается. При соприкосновении с холодными стеклами пары становятся насыщенными, и в результате конденсации влага оседает на стеклах, образуя иней. **4.57.** При понижении температуры начинается конденсация пара. **4.58.** Охлаждением воздуха (обычно к утру) до температуры, при которой относительная влажность увеличивается до 100 %. **4.59.** В жаркий день испаряется больше воды. **4.60.** Слой облаков препятствует охлаждению поверхности Земли. **4.61.**  $17,3 \cdot 10^{-3} \text{ кг/м}^3$ , 75 %. **4.62.**  $9,4 \cdot 10^{-3} \text{ кг/м}^3$ ; 51 %. **4.63.** При понижении температуры. **4.64.**  $10,6 \cdot 10^{-3} \text{ кг/м}^3$ , при температуре ниже 12 °С.

**4.65.** Во 2-м случае. **4.66.**  $22 \text{ г/м}^3$ . **4.67.**  $22^\circ \text{C}$ , 79%. **4.68.**  $12,8 \cdot 10^{-3} \text{ кг/м}^3$ , 70%. **4.69.** 0,245 кг. **4.70.** На 0,266 кг. **4.71.** 54, 44, 70 и 83 %, результаты одинаковы. **4.72.**  $14^\circ \text{C}$ . **4.73.** 279 и 277 К; 30 и  $26^\circ \text{C}$ . **4.74.** 46%,  $21^\circ \text{C}$ . **4.75.** 2,7 г. **4.76.** При  $13^\circ \text{C}$ . **4.77.** Нет, да, 1,64 г. **4.78.** Нет, да, 0,2 г. **4.79.** 67%. **4.80.** 864 г. **4.81.** Повысится,  $23^\circ \text{C}$ . **4.82.** Приблизительно 2,5 г. **4.83.** 75%. **4.84.** Дополнительно ввести и испарить 5,4 кг воды. **4.85.** На 568 Па, на 320 Па. **4.86.**  $1,12 \text{ кг/м}^3$ . *Указание.*  $\rho_v = \rho_{св} + \rho_n$ ;  $p_0 = p_{св} + p_n$ . Здесь  $\rho_{св}$  и  $p_{св}$  — плотность и давление сухого воздуха, взаимосвязь между которыми определяется уравнением Клапейрона–Менделеева. **4.87.** 2,88 кПа;  $40^\circ \text{C}$ ; 39%. **4.88.** 0,31 г; 22 кПа. *Указание.* Применить закон Бойля–Мариотта. **4.89.** 61%.

## § 5. Свойства жидкостей

**5.1.** 1. Да, если время действия силы на тело мало. **5.2.** Нет. При отсутствии внешних воздействий жидкость принимает форму, при которой ее поверхностная энергия минимальна. **5.3.** На молекулы поверхностного слоя действуют молекулы слоев, расположенных ниже; появляются силы, действующие внутрь жидкости. **5.4.** Приблизительно на глубине 110 км. **5.5.** Молекулярное давление направлено внутрь жидкости. **5.6.** Уменьшаются и при критической температуре становятся равными нулю. **5.7.** Понизится; увеличение энергии поверхностного слоя происходит за счет убыли молекулярно-кинетической энергии жидкости. **5.8.** 4,22 мкДж, 4,22 мкДж. **5.9.**  $1,45 \times 10^{-4} \text{ Дж}$ . **5.10.** Уменьшится на 96 мкДж. **5.11.** 0,63 мкДж. **5.12.** На 0,6 мК. **5.13.** 0,04 Н/м. **5.14.** 0,072 Н/м. **5.15.** 40,3 мин. **5.16.** 388. **5.17.** 82 мН. **5.18.** 0,072 Н/м. **5.19.** 0,13 Н. **5.20.**  $1,0 \text{ м/с}^2$ , в сторону воды. **5.21.** Нет. **5.22.** Смачивание. **5.23.** Олово не смачивает пленку окисла алюминия, покрывающую ее поверхность. **5.24.** Смачивающая жидкость растечется по всей внутренней поверхности сосуда, в центре которого будет воздушная сфера; несмачивающая жидкость сосредоточится в виде шара в центре сосуда. **5.25.** 0,62 см. *Указание.* Составить уравнение равновесия трех сил: силы тяжести, силы противодействия результирующей сил поверхностного натяжения (действуют вниз) и архимедовой силы. **5.26.** 3,3 см. *Указание.* На стержень действуют: сила тяжести  $mg = \frac{\pi d^2}{4} l \rho_{ст} g$ , сила Архимеда  $F_A = \frac{\pi d^2}{8} l \rho_{ж} g$  и сила реакции поверхностного слоя жидкости  $|F_p| = F_p = \sigma \cdot 2(d + l)$ . Уравнение сил по второму закону Ньютона имеет вид:  $F_p + mg + F_A = 0$  или в проекции на вертикальную ось:  $F_p - mg + F_A = 0$ . **5.27.** У смачивающей возрастает, стремясь к  $90^\circ$ ; у несмачивающей уменьшается, стремясь к  $90^\circ$ . **5.28.** Объем большего пузыря будет увеличиваться, меньшего — уменьшаться; равновесие наступит, когда поверхности обеих пленок (шара и шарового сегмента) будут иметь одинаковую кривизну:  $r'_2 = r_2$  (см. рисунок). **5.29.** 16 Па в обоих случаях. **5.30.**  $p_n = \Pi / (2\pi r^3)$ . *Указание.*  $p_n = 2\sigma / r$ ,  $\Pi = \sigma \cdot 4\pi r^2$ ,  $p_n / \Pi = 2\sigma / \sigma \cdot 4\pi r^3$ . **5.31.**  $1,18 \text{ кг/м}^3$ . **5.32.** 0,78 мм. **5.33.** 4,8 Па; 6 см,  $120^\circ$ .

**5.34.** 2,32 кН. **5.35.** Смачивающая жидкость (например, вода, керосин) втягивается в капилляры — поры ткани, бумаги и т. п. **5.36.** Нет, почву следует



К ответу 5.28

рыхлить, чтобы предотвратить подъем почвенной воды по капиллярам, образовавшимся в верхнем затвердевшем слое почвы. **5.37.** Необходимо прикатать почву. **5.38.** 0,022 Н/м.

**5.39.** 1,96 и 0,73 мм. **5.40.** Будет изменяться краевой угол, поверхность мениска будет приближаться к плоской.

**5.41.** 15; 6,3 и 7 см;  $9,2 \cdot 10^{-7}$  и  $4,6 \cdot 10^{-7}$  Дж. **5.42.** На 1,4 см; на 1,9 см.

**5.43.**  $p_e = p_0 - \rho g H$ . **5.44.** 14,7 см; 6 см. **5.45.** 1,5 кг. **5.46.** 12; 4,9 и 5,6 см,

0,074 Н/м. **5.47.**  $H = 2\sigma \frac{R_1 + R_2}{R_1 R_2 \rho g} + h$ .

**5.48.** Будет уменьшаться. **5.49.** 5 см.

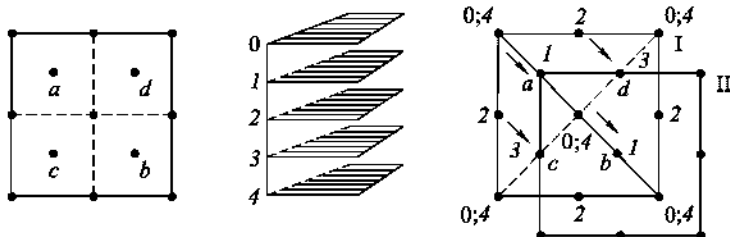
Указание. Столб воды в трубке будет

удерживаться двумя менисками — верхним и нижним:  $\rho \pi r^2 h g = 2F = 4\pi r \sigma$ .

**5.50.** 5,9 см, 0,846 Н. Указание. Подъем воды происходит до тех пор, пока лапласовское давление  $p_{\text{л}} = p_{\text{гидрост}}$ ;  $2\sigma/d = \rho g h$ ;  $F = p_{\text{ср}} S$ , где  $p_{\text{ср}} = p_{\text{л}}/2$  и  $S = hb$ . **5.51.** 150 кПа. **5.52.** 15 г. **5.53.** 255 мм. **5.54.** 147 и 800 МПа·с. Указание. Сила сопротивления движению шарика в жидкости  $F = mg - F_A = (4/3)\pi r^3(\rho - \rho_{\text{ж}})$ , где  $\rho_{\text{ж}}$  — плотность жидкости. **5.55.**  $6,3 \times 10^{-4}$ , 1,19 и 2,0 МПа·с; 20 с. **5.56.** 4,4, 12 и 52 МПа·с; 52,5 с.

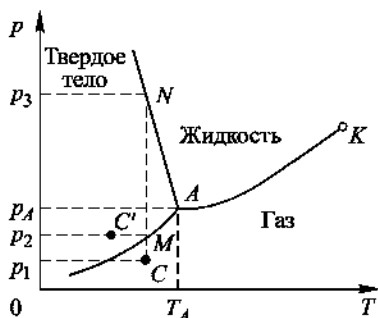
## § 6. Свойства твердых тел. Плавление и кристаллизация. Деформации

**6.1.** а) 6 и 1;  $a = d = 3,35 \cdot 10^{-10}$  м; б) 8 и 2;  $2,88 \cdot 10^{-10}$  м;  $2,45 \cdot 10^{-10}$  м; в) 12 и 4;  $4,94 \cdot 10^{-10}$  м;  $3,46 \cdot 10^{-10}$  м. **6.2.** См. рисунок. Атомы углерода располагаются в пяти горизонтальных плоскостях 0, ..., 4. При сдвиге решетки II четыре принадлежащих ей атома (a, b, c, d) останутся в пределах неподвижной решетки I, переходя из плоскости 0 на плоскость 1 (a и b), а из плоскости 2 на плоскость 3 (c и d); 4 и 8. **6.3.**  $3,56 \cdot 10^{-10}$  и  $1,54 \cdot 10^{-10}$  м;  $1,18 \cdot 10^{24}$ .



К ответу 6.2

**6.4.** В аморфных веществах вследствие хаотичности расположения частиц средние расстояния между частицами по любым направлениям одинаковы. **6.5.** Кристаллизация начинается вокруг множества центров кристаллизации. **6.6.** При мелких зернах. **6.7.** Да, если скорость охлаждения настолько велика, что частицы не успевают расположиться упорядоченнее. **6.8.** Из-за дефекта кристаллической решетки: поверхностные микротрещины, дислокации, вакансии значительно уменьшают прочность. **6.9.** Распределение температур в водоемах с непроточной водой при замерзании последней таково:  $+4^\circ\text{C}$  у дна;  $0^\circ\text{C}$  на поверхности. Плотность воды при замерзании уменьшается, лед остается на поверхности. **6.10.** Теплота, необходимая для таяния льда при ледоходе, заимствуется из окружающего воздуха, а при снегообразовании (кристаллизации) теплота выделяется в окружающую среду. **6.11.** По сравнению со свинцом вольфрам имеет весьма высокую температуру плавления. **6.12.** Лед, так как его плотность больше, чем у рыхлого снега. **6.13.** Замерзая, вода расширяется и может разорвать трубы радиаторов и отопительных систем. **6.14.** Нет. **6.15.** Внутренняя энергия у воды больше. **6.16.** Таяние снега и льда, а затем испарение образовавшейся воды происходят медленно, почва успевает пропитаться влагой. **6.17.** 67,0 и 71,2 кДж. **6.18.** 24 и 46 кДж. **6.19.** 7,96 МДж. **6.20.** 18,3 МДж. **6.21.**  $3,35 \cdot 10^5$  Дж/кг. **6.22.** За 80 мин. **6.23.** 1 ч 20 мин. **6.24.** До 400 К. **6.25.** 125 г. **6.26.** 2,5 г. **6.27.** 112 МПа. **6.28.** 508 г. **6.29.** 60 г. **6.30.**  $5,3^\circ\text{C}$ . **6.31.**  $3,3 \cdot 10^5$  Дж/кг. **6.32.** 0,22 кг. **6.33.** Весь лед растает и установится температура  $2,83^\circ\text{C}$ ;  $0^\circ\text{C}$ ; массы воды и льда не изменятся. **6.34.** 71 г. **6.35.** 0,51 кг. **6.36.** 13 кг. **6.37.** 1,6 г. **6.38.** Примерно 24 км. **6.39.** 354 м/с. **6.40.** 2,4 км/с. **6.41.** 2,54 км/с. **6.42.** 90,5 и 54 кг. **6.43.** 14,0 т. **6.44.** 420 кг. **6.45.** 71%. **6.46.** 0,85 кг. **6.47.** 70%; 916 кДж. **6.48.** 78 К. **Указание.** Количества теплоты, поглощаемые при кипении жидкого азота и при таянии льда, пропорциональны разностям температур снаружи и внутри сосудов  $Q = k\Delta T$ ; множитель  $k$  в обоих случаях одинаков. **6.49.** Точка А. Тройная точка. Для воды  $T_A = 273,16$  К (точно) и  $p_A = 609$  Па. **6.50.** Да, гелий. **6.51.** При абсолютном нуле температуры вещество при любом давлении будет оставаться в твердом состоянии; исключение представляет гелий. **6.52.** С увеличением внешнего давления у перечисленных веществ плавление происходит при более низких температурах. Объем этих веществ при плавлении уменьшается. **6.53.** Нет; это утверждение справедливо лишь в применении к твердому кристаллическому состоянию (например, твердое и жидкое стекло не являются различными фазами). **6.54.** См. рисунок. Процесс изображен штриховой линией  $CN$ ; в точке  $M$  происходит кристаллизация, в точке  $N$  кристаллы плавятся.



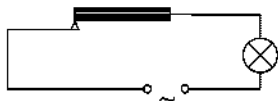
**6.55.** В случае, когда  $p_2 < p_A$  (см. рисунок к ответу 6.54), кристалл, минув жидкую фазу, будет переходить в газообразное состояние — произойдет сублимация. Примеры — нафталин, йод, лед, сера. **6.56.** См. ответ к задаче 6.55. **6.57.** Необходимо, чтобы давление при изобарическом процессе было выше давления в тройной точке для данного вещества. **6.58.**  $0^\circ\text{C}$ ; растает 13 г льда. **6.59.**  $15^\circ\text{C}$ . **6.60.** На диаграмме состояния кривая равновесия жидкость–газ оканчивается точкой  $K$ , которой соответствуют определенные критические давление и температура для конкретных веществ. При температурах выше критической жидкость существовать не может. **6.61.** Для определенной массы теплота сублимации больше теплоты парообразования на теплоту плавления. **6.62.** 77 г. **6.63.**  $\Theta = 0^\circ\text{C}$ . **6.64.** Потому что процесс испарения воды с поверхности в этом случае протекает медленнее, на что требуется и меньшая энергия. **6.65.** Для предотвращения конденсации пара и повышения КПД. **6.66.** Сублимация. **6.67.** Более низкая температура плавления в основании лавин. **6.68.** Продольное сжатие; продольное растяжение; изгиб; кручение; сдвиг. **6.69.** Увеличится; уменьшится. **6.70.** Кручение. **6.71.** Сжатию; сжатию. **6.72.** Хорошо сопротивляется сжатию и растяжению. **6.73.** 1,9 кН. **6.74.**  $2,3 \cdot 10^{-2}$  м. **6.75.**  $\sigma = m(a + g)/2S$ . **6.76.** 2,45. **6.77.** 1,6 и 1,5 т. **6.78.**  $1,03\text{ см}^3$ . **6.79.** 430; 9,1. **6.80.**  $\sigma = \rho g l$ . Не зависит. **6.81.** 7,85 и 9,04 км. **6.82.** 353 кПа. В основании стены кирпичная кладка должна быть более прочной. **6.83.** 425 м. **6.84.** Одинаково; ко второму стержню. **6.85.** У первой проволоки относительное удлинение в 4 раза, а абсолютное в 2 раза меньше, чем у второй. **6.86.** 30 МПа. **6.87.** При  $F \geq 220$  Н;  $\Delta l \geq 4,0 \cdot 10^{-3}$  м. **6.88.** 220 МПа. **6.89.** При напряжении  $\sigma \leq 31$  МПа алюминий упруг, при  $\sigma > 31$  МПа пластичен. Можно. **6.90.** Нет; нет. **6.91.** 40 МПа; 200 ГПа; 50 мДж. **6.92.**  $0,2\text{ см}^3$ ; да. **6.93.**  $6,25 \cdot 10^{-4}$  м. Проволока выдержит такой груз, так как механическое напряжение (510 МПа) меньше предела прочности. **6.94.**  $2,83 \cdot 10^{-4}$  м. **6.95.**  $1,0 \cdot 10^{-3}$ . **6.96.** 0,4 Дж. **6.97.** 5,0 Дж. **6.98.** 4,8 мДж. **6.99.** 40 Н; 0,8 Дж. **6.100.**  $P_{\text{макс}} = 2(mg)^2/k$ . **6.101.**  $4,8 \times 10^{-2}$ ,  $9,6 \cdot 10^{-2}$  и  $2,4 \cdot 10^{-2}$  Дж. **6.102.** Потенциальная энергия медной пружины больше, так как ее удлинение больше. **6.103.**  $\Delta l_B = l_1 = \frac{l_1 E_2 \Delta l}{l_1 E_2 + l_2 E_1}$ ;  $A = \frac{E_1 E_2 S \Delta l}{2(l_1 E_2 + l_2 E_1)}$ . Указание.  $\Delta l = \Delta l_1 + \Delta l_2$ ;  $F_1 = F_2 = F$ .

## § 7. Тепловое расширение тел

**7.1.** Различная зависимость сил притяжения и сил отталкивания между молекулами от расстояния между ними определяет несимметричную форму кривой зависимости потенциальной энергии взаимодействия двух молекул от расстояния (см. рисунок к задаче 1.56), при нагревании возрастает среднее расстояние между положениями равновесия молекул — происходит тепловое расширение. **7.2.** При сезонных изменениях температур меняется длина рельсов, наличие промежутков в стыках и продолговатых отверстий для болтов в накладках предотвращают деформацию. **7.3.** Равновесие нарушится. **7.4.** При повышении температуры центр масс стержня будет опускаться, а центр масс



ртутных столбиков — подниматься; можно так рассчитать все части системы, что центр масс ее будет сохранять свое положение при любой температуре и ход часов не нарушится. **7.5.** Наличие компенсаторов исключает возможные деформации труб при изменении температуры. **7.6.** 4,2 см. **7.7.** Инвар. Температурный коэффициент линейного расширения у него наименьший. **7.8.**  $1,84 \times 10^{-5} \text{ К}^{-1}$ ; 3,2%. **7.9.** Температурные коэффициенты линейного расширения у них почти одинаковы. **7.10.** Он должен иметь такой же температурный коэффициент линейного расширения, как и стекло. Платинит. **7.11.** 18 см. **7.12.** 34 и 46 см. **7.13.** 67,5 мм. **7.14.** 12,006 и 12,011 м. **7.15.** Да, зазор между ободом и колесом составит 0,46 мм. **7.16.** 0,027 мм. **7.17.** До 803 К. **7.18.** 400,8 мм. **7.19.** 15,16 м. **7.20.** См. рисунок. Чтобы произошло размыкание цепи, нижняя часть пластинки должна быть медной. **7.21.** 0,12 м. **7.22.** 290 Н. **7.23.** 17 кг. **7.24.** На 53 К. **7.25.** При 483 К. **7.26.** 80 МПа. **7.27.** На 35 К. **7.28.** Увеличится. **7.29.** На  $20 \text{ см}^2$ . **7.30.**  $123 \text{ см}^2$ . **7.31.** На 17 К. **7.32.**  $58,9 \text{ см}^3$ . **7.33.** Из латуни. **7.34.** На 3,8 и  $3495 \text{ см}^3$ . **7.35.** 20 см. **7.36.** 5,0 кг. **7.37.** 31 кДж. **7.38.** На  $1,8 \text{ см}^3$ . **7.39.**  $7,899 \cdot 10^3$  и  $7,901 \cdot 10^3 \text{ кг/м}^3$ . **7.40.** На  $16,2 \text{ см}^3$ . До  $150^\circ \text{C}$ . **7.41.** 13 240 и  $13680 \text{ кг/м}^3$ . **7.42.** 19,5 л. **7.43.** 19,54 л. **7.44.**  $10^{-3} \text{ К}^{-1}$ . **7.45.** 6,18 м; 303 К. **7.46.** 309 К. **7.47.** На  $54 \text{ м}^3$ . **7.48.**  $3 \cdot 10^{-5} \text{ К}^{-1}$ . **7.49.**  $1,8 \cdot 10^{-4} \text{ К}^{-1}$ . **7.50.**  $1,8 \cdot 10^{-4}$  и  $1 \cdot 10^{-3} \text{ К}^{-1}$ . **7.51.** 182 кДж. **7.52.** 0,77 и 0,74 Н. **7.53.** На 50 К; 0,4 кг. **7.54.** На 6,2 мН.



К ответу 7.20

## § 8. Взаимодействие электрических зарядов.

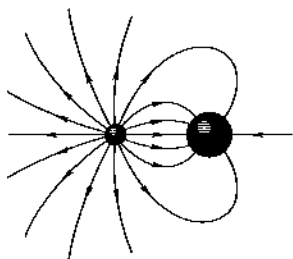
### Закон сохранения заряда. Закон Кулона

**8.1.** Надо коснуться шарика электроскопа заряженным проводником. Трением стеклянной палочки о шелк зарядить ее. Если после прикосновения палочки к шарiku электроскопа, его листочки разойдутся на больший угол, заряд на проводнике положительный. **8.2.** Нет. **8.3.** Да. **8.4.** Порвну:  $8,0 \cdot 10^{-9} \text{ Кл}$ . **8.5.** 9,6 Кл. **8.6.** 40 кКл. **8.7.** При образовании статического заряда может возникнуть искра, а канифоль способствует накоплению заряда; чтобы отвести статический заряд в землю. **8.8.** Для отведения в землю накапливающегося статического заряда. **8.9.** Для предохранения от взрыва при электризации трением. **8.10.** Можно, поместив заряженный проводник внутри полого изолированного проводника и приведя их в соприкосновение. **8.11.**  $0,5 \text{ мкКл/м}^2$ . **8.12.** 20 мкКл. **8.13.** Увеличилась. **8.14.** 9 ГН; 0,1 ГН. **8.15.** 74 мН; 0,3 м. **8.16.** 10 и 30 мкКл; 0,02 м. **8.17.** 3,2. **8.18.** 23 нН; в  $2,3 \cdot 10^{39}$  раз. **8.19.** 0,6 и 0,2 нКл;  $3,75 \cdot 10^9$  и  $1,25 \cdot 10^9$ . **8.20.** 0,8 и 0,9 мкН. **8.21.** Указание. Неравенство  $(Q_1 - Q_2)^2 > 0$  преобразуется в  $(Q_1 + Q_2)^2/4 > Q_1 Q_2$ , что позволяет судить о соотношении сил. **8.22.**  $4 \cdot 10^{-7}$  и  $-1 \cdot 10^{-7} \text{ Кл}$ . **8.23.** 1,76 мкКл; того же знака. **8.24.**  $1,06 \cdot 10^{-8} \text{ Кл}$ . **8.25.** На расстоянии 0,27 м от меньшего заряда. Не нарушится. **8.26.** На расстоянии 0,80 м от меньшего заряда. Да.

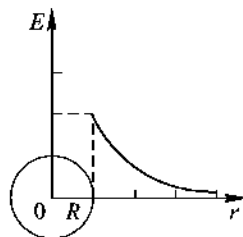
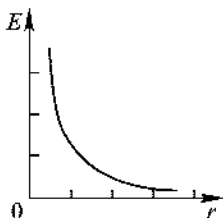
**8.27.** 2 нН. **8.28.**  $0,05 \text{ м/с}^2$ . **8.29.** 2,0 г. Шарикн расположатся в горизонтальной плоскости на расстоянии 40 см один от другого (в условиях невесомости действуют силы электрического отталкивания). **8.30.**  $9,8 \cdot 10^{-18} \text{ Кл}$ . **8.31.**  $2,7 \cdot 10^{-6} \text{ Кл/кг}$ . **8.32.**  $F = QQ'h/[4\pi\epsilon_0(h^2 + r^2)^{3/2}]$ . *Указание.* Результирующая сила, с которой заряд кольца будет действовать на точечный заряд  $Q'$ , может быть определена как геометрическая сумма сил, действующих со стороны отдельных элементов заряженного кольца. При суммировании векторов сил учитываются составляющие, направленные вдоль оси кольца; составляющие, направленные перпендикулярно оси, вследствие симметрии при сложении дают нуль. **8.33.** 28 нКл; 8,12 мН.

## § 9. Электрическое поле

**9.1.** Если в эту точку внесен отрицательный заряд. **9.2.** Между проволокой и трубой создается электрическое поле, под действием которого ионизованные частицы дыма оседают на трубе. **9.3.** Если детали соединить с другим полюсом источника высокого напряжения (см. ответ 9.2). **9.4.** См. рисунок. **9.5.**  $E_1/E_2 = \sigma_1/\sigma_2$ . **9.6.** Напряженность электрического поля у острого конца проводника больше, чем у тупого; под действием сильного электрического поля в окружающей среде от молекул газа отрываются электроны, а образующиеся при этом ионы движутся от проводника с одноименным зарядом и увлекают за собой нейтральные молекулы газа, создавая «электрический ветер». **9.7.** Электрическое поле будет как внутри, так и вне сферы. Отрицательный заряд возникнет на внутренней поверхности сферы, а положительный — на внешней. При перемещении шарика с зарядом поле изменится внутри сферы, а с приближением к сфере заряженного тела изменится электрическое поле вне сферы. **9.8.** Отсутствие поля внутри проводника. С целью экранирования от воздействия внешних электрических полей. **9.9.**  $75 \text{ кН/Кл}$ ;  $3,0 \text{ мкКл}$ . **9.10.**  $6,0 \cdot 10^5 \text{ Н/Кл}$ ;  $0,12 \text{ м}$ .



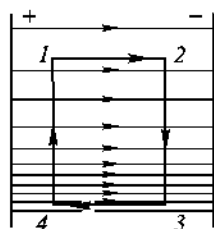
К ответу 9.4



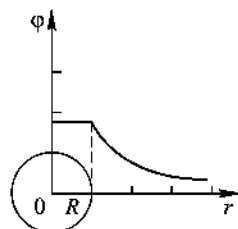
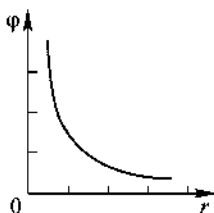
К ответу 9.17

**9.11.**  $3,45 \cdot 10^5 \text{ Н/Кл}$ . Сферическую, в центре которой находится электрический заряд, образующий поле. **9.12.** 12 см; 27 мкН. **9.13.** 81; вода. **9.14.** 39; 3,6 нКл. **9.15.** 0, 0 и  $9,75 \text{ кН/Кл}$ . **9.16.**  $2,5 \cdot 10^{-8} \text{ Кл/м}^2$ . **9.17.** См. рисунок. **9.18.**  $5,1 \cdot 10^{11} \text{ Н/Кл}$ ;  $2,2 \cdot 10^6 \text{ м/с}$ . **9.19.** С помощью явления элек-

тростатической индукции. **9.20.** Нет. **9.21.** 0;  $3Q/(2\pi\epsilon_0\epsilon a^2)$ . **9.22.** 0; на  $2Q/(\pi\epsilon_0\epsilon l^2)$ . **9.23.** 42 кВ/м. Вектор напряженности по модулю не изменится, но повернется на  $90^\circ$  в сторону отрицательного заряда. **9.24.** 40 нКл; 1,8 кВ/м. **9.25.**  $27^\circ$ . **9.26.** 4,86 нКл. **9.27.** 245 В/м; направлена вертикально вниз. **9.28.** 0,37 нКл. **9.29.**  $0,02 \text{ м/с}^2$ . **9.30.** На  $8,0 \cdot 10^{-4} \text{ м/с}^2$ . **9.31.**  $1,8 \times 10^5 \text{ м/с}^2$ . **9.32.**  $5,3 \cdot 10^8 \text{ м/с}^2$ ; 20 км/с; 4 мкс. **9.33.** 0,1 мкс. **9.34.** 11 В/м; 2,5 мкс. **9.35.**  $5 \cdot 10^{-14} \text{ м}$ . **9.36.**  $1,7 \cdot 10^{-4} \text{ Н}$ . **9.37.**  $1,1 \cdot 10^5 \text{ В/м}$ ; 2 мкКл/м<sup>2</sup>. **9.38.**  $E = \sigma/(\epsilon_0\epsilon)$ . **9.39.**  $E_{\text{внут}} = 2,8 \text{ кВ/м}$ ;  $E_{\text{вне}} = 1,7 \text{ кВ/м}$ . **9.40.** -0,22 Н (знак минус указывает на то, что плоскости притягиваются). **9.41.** Поле, в котором работа не зависит от формы пути; поле тяготения, электростатическое поле. **9.42.** Нет; см. рисунок — работа по замкнутому контуру в таком поле не может быть равной нулю, что противоречит определению потенциального поля (см. задачу 9.41). **9.43.** 78 и -78 мкДж, -78 и 78 мкДж. **9.44.** 5 В.

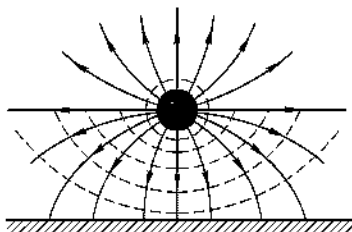


К ответу 9.42

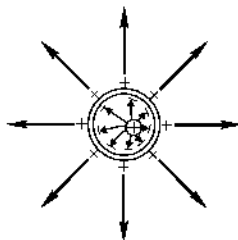


К ответу 9.47

**9.45.** 6 кВ. **9.46.**  $3 \cdot 10^{11}$ . **9.47.** См. рисунок; нет. **9.48.** 5,4; 5,4 и 2,7 кВ. **9.49.** 1,6 нКл, 6,0 нДж. **9.50.** 0,4 мкДж. **9.51.** 220 В; 2,4 нКл. **9.52.** Для экранирования от внешних полей; корпус заземляют для того, чтобы измерить потенциал относительно Земли. Да. Одинаковый потенциал во всех точках. **9.53.** См. рисунок. **9.54.** 0,15 м. **9.55.**  $2,55 \cdot 10^{-10} \text{ Кл}$ . **9.56.** 0,1 м; 20 нКл; 1,8 кВ. **9.57.** 52 В; 0,26 мкДж. **9.58.** 0,27 Дж. **9.59.**  $E_B = E_C = 1,36 \text{ кВ/м}$ ; 340 В; 204 и 204 мкДж. **9.60.** См. рисунок. На внутренней стороне сферы плотность заряда будет большей в части, ближней к заряду на шарике; на внешней поверхности одинакова. Линии напряженности к поверхности сферы перпендикулярны. **9.61.**  $1,1 \cdot 10^7 \text{ м/с}$ ; 260 В. **9.62.** 4,2 МВ. **9.63.** 0,44 м/с.



К ответу 9.53



К ответу 9.60

**9.64.** 5 мм; вверх:  $0,12 \text{ м/с}^2$ . **9.65.** 250. **9.66.** 0, 4,5 кВ/м; 350 В/м; -750 В; -450 В; -125 В. **9.67.**  $\frac{|Q_1| + |Q_2|}{4\pi\epsilon_0} \left( \frac{1}{r} - \frac{1}{\sqrt{r^2 + d^2}} \right)$ . **9.68.**  $v = \sqrt{\frac{Q^2}{2\pi\epsilon_0 R m}}$ .

*Указание.* Потенциал бесконечно удаленной точки равен нулю, а внутри кольца  $\varphi_0 = Q/(4\pi\epsilon_0 R)$ . С учетом закона сохранения энергии можно записать  $mv^2/2 = Q^2/(4\pi\epsilon_0 R)$ . **9.69.**  $3,5 \cdot 10^{-11}$ . **9.70.** 34 кВ; 1,0 мДж. **9.71.** 170 кВ/м; 170 кВ; 508 кВ/м; 508 кВ. **9.72.** 35 кВ/м; 280 В. **9.73.**  $2,4 \times 10^{-15}$  Дж. **9.74.** 176 ГКл/кг. **9.75.**  $A = \frac{Qd}{4\pi\epsilon_0} \left[ \frac{Q_1}{(a+l-d)(a+l)} + \frac{Q_2}{(l-d)l} \right]$ . **9.76.** 65 В. **9.77.** Вода — к полярным диэлектрикам, водород — к неполярным. **9.78.** Дипольным моментом;  $p_l = Ql$ , где  $Q$  — положительный или равный ему по модулю отрицательный заряд молекулы (атома),  $l$  — расстояние между центрами масс зарядов разного знака. **9.79.** В результате поляризации на поверхности диэлектрика появляются связанные поляризационные заряды, которые в отличие от проводника нельзя разделить воздействием внешнего поля, не разрушая при этом диэлектрика.

## § 10. Электрическая емкость проводника.

### Конденсаторы. Энергия электрического поля конденсатора

**10.1.** Нет; только для уединенных проводников. **10.2.**  $7,1 \cdot 10^{-4}$  Ф;  $9 \cdot 10^6$  км. **10.3.** Из-за уменьшения емкости. **10.4.** 5 пФ;  $4,5 \cdot 10^{-2}$  м. **10.5.** 40 кВ; 4,5 мм. **10.6.** Заряды будут перемещаться от шарика с большим потенциалом к шарiku с меньшим потенциалом, 300 и 900 В; 780 и 780 В; 1,3 и 5,2 нКл. **10.7.** Потенциалы шариков до соединения  $Q_1/(4\pi\epsilon_0\epsilon R_1)$  и  $Q_2/(4\pi\epsilon_0\epsilon R_2)$ ; после соединения заряды на шариках стали  $Q'_1$  и  $Q'_2 = Q_1 + Q_2 - Q'_1$ , а общий потенциал  $Q'_1/(4\pi\epsilon_0\epsilon R_1) = (Q_1 + Q_2 - Q'_1)/(4\pi\epsilon_0\epsilon R_2)$ ;  $Q'_1 = R_1(Q_1 + Q_2)/(R_1 + R_2)$ ,  $\varphi = (Q_1 + Q_2)/[4\pi\epsilon_0\epsilon(R_1 + R_2)]$ . **10.8.** 8,4 нКл; 560 В. **10.9.**  $7 \cdot 10^{-8}$  и  $2,1 \cdot 10^{-7}$  Кл; 3; 13 мН. **10.10.** 160 пФ, 48 нКл и 7,2 мкДж. **10.11.** 100 пФ. **10.12.** 3,2 мкКл; 320 В; в обоих случаях  $2,56 \cdot 10^{-4}$  и  $5,12 \cdot 10^{-4}$  Дж. **10.13.** При прикосновении к такой цепи в ней возникает разрядный ток. После размыкания цепи с конденсаторами их следует разрядить проводящим стержнем на изолирующей ручке. **10.14.** 4,5 мДж. **10.15.** 2,3 мДж. **10.16.** 15 кВ. **10.17.** Оксидная пленка, служащая в конденсаторе диэлектриком, имеет весьма малую толщину. Полярность. **10.18.** 1,5 кВ;  $4 \cdot 10^{-4}$  Дж. **10.19.** 14,4 мкДж. **10.20.** Увеличилась на 1,3 кВ. **10.21.** Уменьшится в  $\epsilon$  раз. **10.22.** Уменьшилась на 0,14 мкДж. Нет; часть энергии расходуется на поляризацию диэлектрика. **10.23.** 1,0 мкФ;  $1,2 \cdot 10^{-4}$  Кл; 80 и 40 В. **10.24.**  $1,8 \cdot 10^{-8}$  Ф. *Указание.* Конденсатор, имеющий два различных диэлектрика, можно рассматривать как батарею двух конденсаторов, соединенных последовательно. **10.25.** 0,8 мкФ; 44 и 176 В. **10.26.** Да. В первом случае соединить конденсаторы последовательно, во

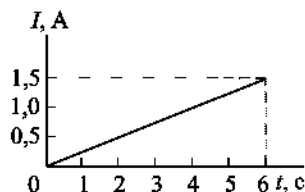
втором — параллельно. **10.27.** 1 мкФ; 240 В; 0,03 Дж. **10.28.** 150 и 150 В. В первом конденсаторе  $9 \cdot 10^{-4}$  Кл, во втором 1,5 мКл. **10.29.** 0,80 мкФ; 1,6 мКл. **10.30.** 1,6 С. **10.31.** Нет, в первом случае совершается меньшая работа. **10.32.**  $1,2 \cdot 10^{-4}$  Кл; 0,24 Дж. **10.33.** 4,16 нФ. **10.34.**  $1,2 \cdot 10^{-8}$  Ф. **10.35.** 0,32 мкФ; 64 мКл; 6,4 мДж. **10.36.** Конденсаторы соединены по два последовательно в две параллельные группы; увеличилась в 4 раза. **10.37.** 5 мкФ; 1,1 мКл. **10.38.** 0,75 мкФ; 90, 30 и 60 мКл; 90, 30 и 30 В. **10.39.** 1,2 мКл. **10.40.**  $\sqrt{2eE\varepsilon_0 S/(m_e C)}$ . **10.41.** 150 В. **10.42.** 40 кВ/м; 84 В; 21 мДж. **10.43.**  $2,2 \cdot 10^2$  Дж/м<sup>3</sup>. **10.44.**  $C = \frac{2\pi\varepsilon_0^2\varphi}{\sigma} \left(1 + \sqrt{1 + \frac{4\sigma l}{\varepsilon_0\varphi}}\right)$ . **10.45.** На первом конденсаторе в  $\frac{C_1 + C_2}{\varepsilon C_1 + C_2}$  раз, на втором конденсаторе в  $\frac{\varepsilon(C_1 + C_2)}{\varepsilon C_1 + C_2}$  раз. При  $C_1 = C_2$  на первом конденсаторе в  $\frac{2}{\varepsilon + 1}$  раз, на втором в  $\frac{2\varepsilon}{\varepsilon + 1}$ . **10.46.** 6,5 В. **10.47.**  $Q_1 = 52$  мКл,  $Q_2 = Q_3 = 12$  мКл,  $Q_4 = 40$  мКл,  $U_2 = 12$  В. **10.48.** Увеличится в 1,5 раза. Указание.  $C_6 = \frac{2}{3} C$ ;  $C'_6 = C$ , так как разности потенциалов на средних конденсаторах будут равны нулю.

## § 11. Постоянный электрический ток.

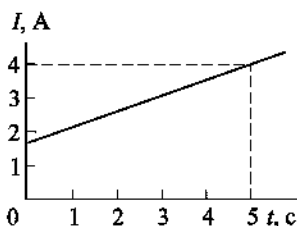
### Электрический ток в металлах.

#### Законы постоянного электрического тока

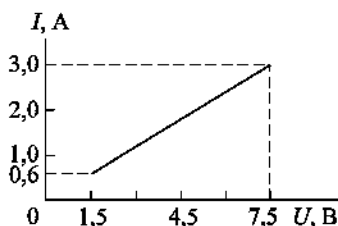
**11.1.** 30 мА;  $6,2 \cdot 10^{15}$ . **11.2.** 5 кКл; 1,4 А. **11.3.** 576 кДж; 4,4 А; 27 Ом. **11.4.** 1,35 кКл; 297 кДж. **11.5.** 0,02 мкФ. **11.6.** 4,5 Кл; см. рисунок. **11.7.**  $8,6 \cdot 10^{19}$ ; см. рисунок. **11.8.** 200 А/м<sup>2</sup>. **11.9.**  $2 \cdot 10^4$  А/м<sup>2</sup>. **11.10.** 0,25 мм/с. **11.11.** 2,0 А. **11.12.** 1,05 мА. **11.13.**  $5,9 \cdot 10^{24}$ . **11.14.** 30 мВ/м. **11.15.** См. рисунок. **11.16.** Для обеспечения лучшего электрического контакта между рельсами. **11.17.** 20 Ом. **11.18.** 3,4 м. **11.19.** 0,5 Ом; 13 мм<sup>2</sup>. **11.20.** 28,6. **11.21.** 16;  $D_0\rho_n/(D_m\rho_a)$  ( $D$  — плотность,  $\rho$  — удельное сопротивление). **11.22.** 43. **11.23.** 33 м; 0,15 Ом.



К ответу 11.6



К ответу 11.7



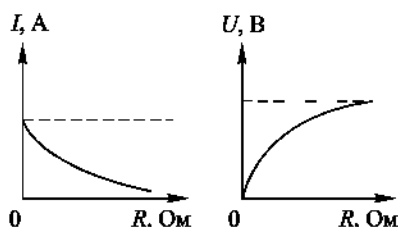
К ответу 11.15

**11.24.** 2,3 Н. **11.25.** 312 кг. **11.26.** 29 В. **11.27.** 6,0 Ом; 7,2 м. **11.28.** 4,7 В. **11.29.** 6,9 мм. **11.30.**  $1,1 \cdot 10^{-6}$  Ом·м; 33 м. **11.31.** 52 м. **11.32.**  $5,2 \times 10^{-8}$  Ом·м. **11.33.** 1,9 А; 6,3 Ом. **11.34.** Поверхность охлаждения у таких шин больше, чем у круглого провода. **11.35.** Потому что сопротивление нити накала в холодном состоянии меньше и, следовательно, пусковой ток в лампе больше рабочего. **11.36.** По сравнению с другими материалами их температурный коэффициент сопротивления очень мал. **11.37.** Для них температурный коэффициент сопротивления примерно одинаков и равен  $3,7 \cdot 10^{-3} \text{ K}^{-1}$ . **11.38.** 480 Ом. **11.39.** При 118,4 °С. **11.40.** На 0,48 Ом. **11.41.** 2000 °С. **11.42.**  $5 \cdot 10^{-3} \text{ K}^{-1}$ . **11.43.**  $-2 \cdot 10^{-4} \text{ K}^{-1}$ . Отрицательный коэффициент сопротивления показывает, что с повышением температуры сопротивление проводника уменьшается. **11.44.** 1,0 А/мм<sup>2</sup>. **11.45.** 470 Ом. **11.46.**  $5 \times 10^{-3} \text{ K}^{-1}$ . **11.47.** 350 В/м. **11.48.** 30 Ом; 4,0 А. **11.49.** Из 40. **11.50.** 75 и 5,0 Ом. **11.51.** 4,8 Ом; 91 м. **11.52.** 2,8 и 8,0 Ом; 12 В. **11.53.** 30 Ом; 20, 28 и 72 В. **11.54.** 13 кОм. **11.55.** 5,4 кН; 260 В. Нет. **11.56.** 60, 40 и 20 В. **11.57.** В 5 раз. **11.58.** 3,8 кОм. **11.59.** 3 В; 0,6. **11.60.** 0,36 А. **11.61.** 52 В. **11.62.** 120 В; 90 и 150 Ом. **11.63.** 30 Ом; параллельно. **11.64.** 24 Ом. **11.65.** Решение.  $\frac{1}{R} = \frac{1}{R_1} + \frac{1}{R_2} + \dots + \frac{1}{R_n}$ , где  $R_1 < R_2 < \dots < R_n$ . Так как сумма положительных членов всегда больше любого из всех слагаемых, то  $\frac{1}{R} > \frac{1}{R_1}$ ; отсюда  $R < R_1$ . **11.66.** Уменьшится в  $n^2$  раз. **11.67.** 1; 1,5; 2; 3; 4,5; 6; 9 Ом. **11.68.** 6 Ом; 2 А. **11.69.**  $R_1 = R_2 = 10$  Ом. **11.70.** 6,0 и 9,0 Ом. **11.71.** 4/3 Ом; 3 А. **11.72.** 0,8 Ом; 0,5 А; 2 А; 1,2 В. **11.73.** 6 В; 2, 3 и 6 Ом;  $R_3 = R_6 = 6$  Ом. **11.74.** 10 Ом; 20 В; 7,5 Ом; 15 В. **11.75.** 10 В; 5 Ом. **11.76.** 3,5 Ом. **11.77.** 6 Ом;  $I_1 = 2$  А;  $I_2 = I_4 = 1$  А,  $I_3 = I_5 = I_6 = 0,5$  А. **11.78.** 6 Ом. **11.79.** 4 Ом; 5 А. **11.80.** 3 А. **11.81.** 4,6 В. *Указание.* Обозначим сопротивления резисторов и вольтметров соответственно через  $R$  и  $r$ ; тогда

$$I_2 = \frac{U_2}{r}, \quad U_1 = I_2 R + U_2 = U_2 \left( \frac{R}{r} + 1 \right),$$

$$U_{AB} = U_1 + \left( \frac{U_1}{r} + \frac{U_2}{r} \right) R = U_1 + (U_1 + U_2) \frac{R}{r};$$

исключая из двух уравнений  $R/r$ , определяем  $U_1$ . **11.82.** 32 А; 6,4 В. **11.83.** 10 Ом; 22 А. **11.84.** 56; 125 В. **11.85.** 20 А. **11.86.** 29 Ом. **11.87.** 0,28 м.



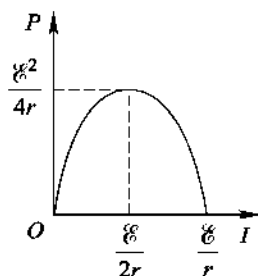
К ответу 11.96

**11.88.** 3,3 Ом; 6,6 Ом. **11.89.** 0,5 А; 0,75 В. **11.90.** 2,0 Ом; 114 В. **11.91.** 4,8 Ом; 1,9 В. **11.92.** 2 В; 0,4 Ом. **11.93.** 1,5 В; 0,5 Ом. **11.94.**  $V$  уменьшится,  $V_1$  увеличится,  $V_2$  уменьшится,  $A_1$  увеличится,  $A_2$  уменьшится. **11.95.** При равенстве внешнего и внутреннего сопротивлений. **11.96.** См. рисунок. **11.97.** 3,0 А. **11.98.** 1,9 Ом. **11.99.** 0,05 Ом; 1,9 В и

38 А. **11.100.** 0,50 Ом; 10,5 В и 1,0 Ом. **11.101.** 0,50 А; 5,5 В. **11.102.** 0,52 мм. **11.103.** 4,8 Ом; 1,5 кВ/м. **11.104.**  $6,4 \cdot 10^{-7}$  Кл. **11.105.** 60%. **11.106.** 83%. **11.107.** 4 Ом. **11.108.** Увеличится:  $\Delta\eta = rR(n-1)[(nR+r)(R+r)]$ . **11.109.** 4,0; 4,4 и 0,6 Ом. **11.110.** 8,0 Ом;  $I_1 = 0,70$  А и  $V_1 = 1,4$  В,  $V = 5,6$  В. **11.111.** 33 А; увеличится в 1,8 раза. **11.112.** 116 В. **11.113.**  $I_1 = 0,50$  А,  $I_2 = I_3 = 0,25$  А,  $V = 5,4$  В и  $Ir = 0,60$  В. **11.114.** 5,0 А; 0 А и 0 В; 0 А, 0 А и 6,0 В; 1,4 А, 0,9 А и 4,2 В. **11.115.** 12 мкФ. **11.116.** 0,90 Ом. **11.117.** 4 мкА. **11.118.** 4 В. **11.119.** 0,37 А, 4,3 В. **11.120.** 2,6 Ом; 2,4 м. **11.121.** 0,50 и 0,25 А; 1,3 В. **11.122.** 0,41 А; 0,082 В. **11.123.** Если сопротивление внешней части цепи по сравнению с сопротивлением источника тока велико, то выгодно последовательное соединение; если мало, то — параллельное. **11.124.** В два раза, если элементы соединить по три последовательно в две параллельные группы; в три раза, если их соединить по два последовательно в три параллельные группы; в шесть раз, если все элементы соединены параллельно. **11.125.** При последовательном. **11.126.** При условии, когда сопротивление внешней части цепи равно сопротивлению одного элемента. **11.127.** 1,1 А; 0,60 А; 3,4 В. **11.128.** 45 мкКл. **11.129.** 2 нА. **11.130.** 2,0 Ом; 0,225 В. **11.131.** 3,0 А. **11.132.** 12,4 В. **11.133.** 2,0 В; 0,040 Ом. **11.134.** 198 и 1200 кКл. **11.135.**  $\mathcal{E}_2 = \mathcal{E}_1(R_1 + R_2)/R_2$ . **11.136.** У первого элемента внутреннее сопротивление больше в три раза. **11.137.** 3,0 Ом; 1,38 В; 2 Ом; 92%. **11.138.** По пять последовательно в две параллельные группы. **11.139.** 2,7 А. **11.140.** 1,0 и 0,50 А. **11.141.** 3,15 А. **11.142.** 15 В. **11.143.** 0; 0. **11.144.** 0,40 Ом; 1,5, 2,0 и 3,5 А.

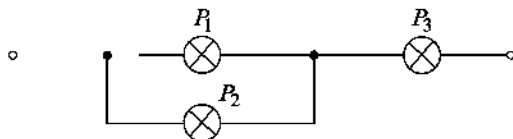
## § 12. Работа, мощность, тепловое действие электрического тока

**12.1.** 2,4 МДж. **12.2.**  $9 \cdot 10^{19}$ ; 3,2 кДж. **12.3.** 180 ГДж. **12.4.** 360 А. **12.5.** 484 Ом; 0,46 А; 15 кВт·ч. **12.6.** 3,6 А; 60 Ом; 1,2 кВт·ч. **12.7.** 144 Дж; 4,8 Вт; 7,5 Ом. **12.8.** 6,6 МВт. **12.9.** 22 кВт·ч. **12.10.** См. рисунок. **12.11.** При  $I = \mathcal{E}/(2r)$ , при  $I = 0$ ,  $I = \mathcal{E}/r$  (коротком замыкании); см. график к ответу 12.10. **12.12.** 50 А; 0,020 Ом; 50 Вт. *Указание.* Исходя из условия симметрии (см. график к ответу 12.10), максимальному значению мощности соответствует сила тока  $I = I_{кз}/2 = \mathcal{E}/(2r)$ . Используя закон Ома для полной цепи, получаем  $R = r$ . Мощность находим по формуле  $P = I^2 R$  с учетом полученных значений силы тока и сопротивления. **12.13.** 1,6 или 0,40 А. **12.14.** 24 Ом; 3,74 Ом. **12.15.** 200 Ом; 38 м. **12.16.** 1540 кВт·ч. **12.17.** 540 Вт; 37,5%. **12.18.** 4,0, 1,0 и 4,5 Вт. **12.19.** 48 Ом. **12.20.** 6 Ом. **12.21.** 6,0 А. **12.22.** Лампочка мощностью в 40 Вт; в 2,5 раза. **12.23.** См. рисунок;  $I_1 = I_2 = 0,36$  А и  $I_3 = 0,73$  А. **12.24.** 5,0 В, 0,13 Ом. **12.25.** 150,



К ответу 12.10

7,2 кВт; 87%. **12.26.** 10; 9,7 и 0,30 кВт·ч. **12.27.** 79 мм<sup>2</sup>. **12.28.** 10,8 мм<sup>2</sup>; 4,7 · 10<sup>6</sup> А/м<sup>2</sup>. **12.29.** 6,0 Вт. *Указание.* Механическая мощность, или



К ответу 12.23

мощность на валу моторчика,  $P_{\text{мех}} = P - I_2^2 R$ , где  $P = I_2 U$ . Сопротивление  $R$  находится с использованием закона Ома для участка цепи, когда якорь заторможен — в этом случае противо-ЭДС не возникает. **12.30.** 18 А, 1,80 м. **12.31.** 0,90 и 0,8 кВт; 89%. **12.32.** 8,8 кг. **12.33.** 380 А. **12.34.** 34 А; 226 В; 0,20 кВт. **12.35.** 12 м/с. **12.36.** 37 А; 14 кВт. **12.37.** 11 Ом. **12.38.** 9,5 кВт; 3,7 кВт; 61%. **12.39.** 219 кН. **12.40.** 5,2 кН. **12.41.** 9,1 кВт; 0,15 кВт·ч; 24 А. **12.42.** 280 кН. **12.43.** 17 кВт; 281 В; 170 кВт·ч. **12.44.** 1000 т. **12.45.** Для предохранения электрических цепей от последствий короткого замыкания; цепь. **12.46.** Увеличится в два раза. **12.47.** Включение прибора большой мощности уменьшает общее сопротивление, следовательно, сила тока возрастает и увеличивается падение напряжения в подводящих проводах. **12.48.** Лампа, потребляющая меньшую мощность, обладает большим сопротивлением и гореть будет ярче. **12.49.** Потому что при повышении температуры увеличивается излучение энергии. **12.50.** Да, накал спирали увеличится. **12.51.** 7,2 кДж. **12.52.** 6 мин. **12.53.** 3,3 кг; 600 Вт. **12.54.** 84%; 19 Ом. **12.55.** На 4 К. **12.56.** Параллельно. **12.57.** 14 мин; 7 мин; 28 мин. **12.58.** 540 Вт. **12.59.** 50 Ом; 0,80 кВт·ч. **12.60.** 15 Ом. **12.61.** Через 36 мин; через 8 мин. **12.62.** 192 кДж; 73%; 5,7 м. **12.63.** 0,89 кг. **12.64.** 52 °С. **12.65.** 1,3 м. **12.66.** 2,4 мин. **12.67.** На 4,3 К. **12.68.**  $2,4 \cdot 10^3$  Дж/(кг·К). **12.69.** 153. **12.70.** 0,0062 К<sup>-1</sup>. **12.71.** 1,5 А; 4,5 А; 6,8 А; 12,8 А; 2,83 кВт. **12.72.** 6,0 Ом; 1,0 А; 24 В; 49,6 и 48 Вт. **12.73.** 1,2 Ом. **12.74.** 1) 0,50 А; 2,4 Ом; 2) 0,27 Ом; 1,5 А. **12.75.** 3 В; 2 Ом. **12.76.** На 0,006 К. **12.77.** На 1,9 К. **12.78.** ЭДС  $\mathcal{E}$ , возникающая в электрической цепи, состоящей из нескольких разнородных проводников (полупроводников), контакты между которыми имеют различную температуру, зависит от температуры горячего  $T_1$  и холодного  $T_2$  контактов и от материала проводников. Немецкому физiku Зеебеку (явление, открытое им в 1821 г., получило название эффекта Зеебека). **12.79.** Коэффициент термо-ЭДС показывает, какая термо-ЭДС возникает у двух различных металлов при разности температур на спаях 1 К. **12.80.** Знак «+» указывает на то, что направление тока от свинца к данному металлу проходит через более нагретый спай; знак «-» — через холодный спай. **12.81.** 35,8 мкВ/К. **12.82.** 43 мкВ/К. **12.83.** 72 К. **12.84.** Выделение или поглощение теплоты при прохождении электрического тока через контакт двух различных проводников (полупроводников); в холодильных установках, кондиционерах и т.д.



## § 13. Электрический ток в электролитах.

### Гальванические элементы и аккумуляторы

**13.1.** Распад молекул растворенных веществ на ионы в результате взаимодействия с растворителем. Способность данного вещества к диссоциации зависит от свойств (природы) как данного вещества, так и растворителя, концентрации раствора и температуры. **13.2.** Число, показывающее, какую часть всех молекул растворенного вещества составляют молекулы, распавшиеся на ионы. С повышением температуры возрастает. **13.3.** В процессе диссоциации образуется равное число ионов противоположного знака. **13.4.** Нет. **13.5.** Участвует во вторичных реакциях. **13.6.** Положительным ионом может быть атом металла или атом водорода. **13.7.** Когда руки влажные. Влага на руках содержит соли, которые при диссоциации образуют ионы, вследствие чего раствор приобретает хорошую проводимость. **13.8.** 0,40 А. **13.9.** Массы веществ, выделенных на электродах в разных ваннах, будут одинаковыми. **13.10.** Будет уменьшаться; останется неизменной до тех пор, пока не растворится весь анод. **13.11.** 300 мг. **13.12.** 407 мг. **13.13.** Двухвалентный никель. **13.14.**  $3,33 \times 10^{-7}$  кг/Кл; 1 %. **13.15.** 0,1 А. **13.16.** У выступов на поверхности металла напряженность электрического поля больше, чем около гладкой поверхности, и поэтому, когда с изменением направления тока металл оказывается анодом, выступы и неровности растворяются быстрее и поверхность металла выравнивается. **13.17.** Нет. **13.18.** 2,1 г. **13.19.** 7,4 Вт. **13.20.** За 25 ч. **13.21.** Для более равномерного покрытия изделий. **13.22.** 235 мг. **13.23.** 33 мг. **13.24.**  $4,5 \times 10^{20}$ ; 47,4 мг. **13.25.** 0,56 г. **13.26.** Эти металлы в малой степени подвержены коррозии. **13.27.** 44 мкм. **13.28.** 0,43 ч. **13.29.** 0,5 А; 88%; 40 мкм. **13.30.** 56 А/м<sup>2</sup>. **13.31.**  $5,6 \cdot 10^{17}$ . **13.32.** 67 мин. **13.33.** 6,1 ч; 5,3 Вт·ч. **13.34.** 0,054 кг. **13.35.** 16,3 МДж (4,5 кВт·ч). **13.36.** 5 А; 6 В; 60 Вт·ч. **13.37.** Нет; напряжение на зажимах ванны должно быть больше ЭДС поляризации. **13.38.**  $\mathcal{E}_{\text{ист}} > 1,5$  В. *Указание.* Возникающая при электролизе ЭДС поляризации  $\mathcal{E}_{\text{пол}}$  должна быть меньше ЭДС источника  $\mathcal{E}_{\text{ист}}$ , иначе электролиз протекать не будет. Разложение воды с образованием гремучего газа происходит за счет работы, которую источник тока совершает против  $\mathcal{E}_{\text{пол}}$ ;  $A = \mathcal{E}_{\text{пол}} Q$ . По условию задачи выделение 1 г водорода связано с прохождением  $9,65 \cdot 10^4$  Кл электричества. Следовательно,  $\mathcal{E}_{\text{пол}} = \frac{A}{Q} = \frac{1,44 \cdot 10^3 \text{ Дж}}{9,65 \cdot 10^4 \text{ Кл}} \approx 1,5$  В. **13.39.** 4,6 В. **13.40.** 0,60 В. **13.41.** 12,7 мин. **13.42.**  $0,093 \cdot 10^{-6}$  кг/Кл; 24 г. **13.43.**  $0,24 \cdot 10^{-6}$ ,  $0,367 \cdot 10^{-6}$  и  $0,093 \cdot 10^{-6}$  кг/Кл. **13.44.**  $0,083 \cdot 10^{-6}$  кг/Кл; 0,46 мг. **13.45.**  $2,34 \cdot 10^{21}$ . **13.46.**  $7 \cdot 10^{18}$ . **13.47.**  $1,67 \cdot 10^{-27}$  кг. **13.48.** Около 60 с; 0,1 и 0,8 г. **13.49.** Электролиз и флотация. При прохождении постоянного тока через сточную воду образующиеся пузырьки газов обволакиваются частицами твердых примесей и поднимаются на поверхность. **13.50.** 1,7 А/дм<sup>2</sup>. **13.51.** 35 Вт. **13.52.** 158 Кл. **13.53.**  $2,09 \cdot 10^{-4}$  и  $1,04 \cdot 10^{-4}$  м<sup>3</sup>; 20 и 160 мг. **13.54.** 1,3 Ом. **13.55.** 297 К. **13.56.** 245 кДж. **13.57.** 428 кПа. **13.58.**  $4 \times 10^9$  Кл. **13.59.** В любом химическом источнике тока энергия протекаю-

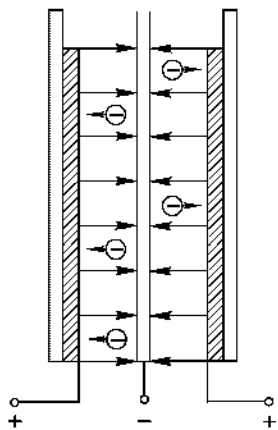
щих в них химических реакций выделяется в виде электрической энергии. Гальванические элементы и аккумуляторы. **13.60.** Гальванический элемент состоит из двух разнородных электродов, погруженных в электролит; в результате различной степени растворения электродов между каждым из них и раствором возникает определенная разность потенциалов — электродный потенциал; разностью электродных потенциалов определяется ЭДС источника тока. **13.61.** Из-за поляризации. **13.62.** 0,30 г. **13.63.** Ионы водорода, образующиеся в растворе серной кислоты, попадают в раствор сульфата меди и вступают в реакцию с ионами  $\text{SO}_4$ , тем самым электроды в меньшей степени покрываются пузырьками газов — уменьшается поляризация. **13.64.** Емкость аккумулятора показывает количество электричества, которое он может отдать при разрядке; в данном случае заряд  $55 \text{ А} \cdot \text{ч} = 198 \text{ кКл}$ . В настоящее время по ГОСТ вместо «Емкость» следует использовать термин «Количество электричества». **13.65.** Поляризация при зарядке аккумулятора и разрядке имеет противоположные знаки. **13.66.** Потому что при наличии примесей ускоряется процесс саморазрядки аккумулятора. **13.67.** 60%. **13.68.** Цинк обладает большей упругостью растворения, чем железо, и поэтому в образующемся гальваническом элементе (цинк, железо, морская вода) он становится отрицательным электродом и растворяется, а на корпусе выделяется водород, в результате чего коррозия замедляется. **13.69.** Попадая через трещины во внутрь железобетонных конструкций соль способствует образованию своего рода местных гальванических элементов, токи от которых вызывают электролитическое разрушение металла — коррозию; подавая на железные конструкции отрицательный потенциал, можно препятствовать электролитическому разрушению. **13.70.** 194,4 кКл; 389 кКл. **13.71.** 144 кКл; 4,0 А; 10 ч. **13.72.** 162, 81 и 243 Вт. **13.73.** При последовательном соединении  $\eta = \frac{\eta_1 \eta_2}{\eta_1 + \eta_2 - \eta_1 \eta_2}$ . Указание. Обозначив неизвестное внешнее сопротивление через  $R$ , запишем выражения для  $\eta_1$ ,  $\eta_2$  и  $\eta$ :  $\eta_1 = R/(R + r_1)$ ,  $\eta_2 = R/(R + r_2)$ ,  $\eta = R/(R + r_1 + r_2)$ . Из первых двух выражений КПД определим  $r_1$  и  $r_2$ , а затем их значения подставим в третье, чтобы исключить неизвестное  $R$ .

## § 14. Электрический ток в газах и вакууме

**14.1.** При ионизации жидких растворов свободные электроны не образуются, а при ионизации газов, кроме ионов, образуются и свободные электроны. **14.2.** Электрическое поле действует по-разному на имеющиеся в пламени положительные и отрицательные ионы и электроны. **14.3.** Под влиянием космических и радиоактивных излучений воздух всегда находится в ионизованном состоянии. **14.4.**  $\varphi \leq 150 \text{ кВ}$ ;  $Q \leq 8,3 \cdot 10^{-7} \text{ Кл}$ . **14.5.**  $2,17 \times 10^{-18} \text{ Дж}$ . **14.6.** 24,58 В. **14.7.** Нет; энергия ионизации такого атома  $2,08 \times 10^{-18} \text{ Дж}$ . **14.8.** 0,65 мкм. **14.9.**  $2,35 \cdot 10^6 \text{ м/с}$ . **14.10.** Нет; кинетическая энергия иона будет равна  $E_k = A_n = e\varphi_n$ , а для ударной ионизации необходима кинетическая энергия  $E_k = \frac{mv^2}{2} \geq A_n \left(1 + \frac{m}{M}\right)$ , где  $A_n$  — работа

ионизации,  $m$  — масса ударяющей частицы,  $M$  — масса атома. **14.11.** Ионам, так как  $m/M \gg m_e/M$  (см. ответ 14.10). **14.12.**  $1,66 \cdot 10^5$  К;  $3,32 \cdot 10^5$  К. **14.13.** Нет. **14.14.** Да. **14.15.** Атомы аргона будут ионизоваться, а атомы гелия — нет. **14.16.** Потому что наряду с ионизацией в газе происходит обратный процесс — рекомбинация ионов. **14.17.** 75,6 В. **14.18.**  $1,6 \cdot 10^2$  см<sup>-3</sup> · с<sup>-1</sup>. **14.19.** Нет. **14.20.** Участок  $OD$ , участок  $DE$ ; ток насыщения; нет, увеличивается; участок  $OA$ . **14.21.** При напряжении зажигания (напряжении пробоя)  $U_z$ , при котором в среднем каждый электрон вызовет ионизацию хотя бы одной молекулы (появление хотя бы одного нового электрона). **14.22.** Подогрев электродов до температуры, необходимой для интенсивной термоэлектронной эмиссии; напряжение, достаточное для ударной ионизации молекул в межэлектродном пространстве (порядка нескольких десятков вольт). **14.23.** Уменьшается. **14.24.** Уменьшить сопротивление реостата, введенного в цепь последовательно с дугой. **14.25.** Дуга гаснет; дуга горит. **14.26.** Нет; при постоянном токе анод сгорает быстрее, так как его температура выше; при переменном токе — одинаково. **14.27.** Для того чтобы сгорание электродов было одинаковым (см. ответ 14.26). **14.28.** Когда электроды из угля, так как температура возгонки угля выше температуры плавления металла. **14.29.** Повысится. **14.30.** Электроны и ионы отклоняются магнитным полем в противоположные стороны в направлении, определяемом правилом левой руки. **14.31.** Изменяя силу тока, можно точно поддерживать заданную температуру. **14.32.** Да; дуга горит в облаке пара. **14.33.** Да; в лампах дневного света происходит дуговой разряд в разреженных парах ртути. **14.34.** Искровой разряд возникает при напряжении пробоя, достаточном для ионизации сильным электрическим полем. **14.35.** Искровой канал создается фотонами ультрафиолетового излучения, образующимися при рекомбинации ионизованных атомов; по этому каналу перемещаются лавины электронов и ионов. **14.36.** 50 Кл; 50 ГДж. **14.37.** Для защиты высоковольтных линий электропередачи от грозových разрядов. **14.38.** Так как разряд происходит за очень малое время, то мгновенная мощность значительно превышает среднюю, развиваемую источником. **14.39.** Потому что энергия выделяется за малое время и теплообмен с окружающей средой не успевает произойти; в месте разряда температура резко возрастает и происходит испарение металла. К положительному полюсу. **14.40.** Электроды и обрабатываемую деталь помещают в непроводящую жидкость; при сближении электродов возникающий искровой разряд возбуждает ударную волну, которая вдавливает металлический лист в матрицу. Для увеличения выделяемой энергии и тем самым для повышения давления ударной волны. **14.41.** Параллельно искровому промежутку к контактам надо присоединить конденсатор. **14.42.** Обрабатываемую деталь следует присоединить к отрицательному полюсу источника тока, а испаряемый электрод — к положительному. **14.43.** Вблизи поверхности большой кривизны (провода, острие) в сильно неоднородном электрическом поле при нормальном и больших давлениях. **14.44.** В отличие от дугового и искрового разрядов при коронном разряде ионизация и возбуждение атомов и молекул

ограничены областью непосредственно вблизи от электрода большой кривизны. **14.45.** С увеличением напряжения потери энергии возрастают; в сырую погоду потери больше. **14.46.** Да; увеличение диаметра проводов приводит к уменьшению напряженности электрического поля, уменьшению ионизации и потерь. **14.47.** Такое соединение равноценно увеличению диаметра провода и уменьшению напряженности электрического поля (см. ответ 14.46).



К ответу 14.48

**14.48.** Фильтры коронного разряда в дымовых трубах промышленных предприятий очищают газы от вредных твердых и жидких частиц; схематически устройство фильтра показано на рисунке. **14.49.** Плазма. **14.50.** Разрежение газа ведет к увеличению длины свободного пробега электронов и ионов под действием поля, т.е. к увеличению их кинетической энергии; поэтому при увеличении разрежения газа ионизация его молекул наступает при более низком напряжении. Дальнейшее разрежение вызывает увеличение сопротивления ввиду уменьшения концентрации частиц. **14.51.** Сообщив атомам газа дополнительную энергию, приобретаемую при их соударении с ионами и электронами. **14.52.** При переходе электрона с одного энергетического уровня на другой, более низкий, разность энергий для которых соответствует видимому излучению. **14.53.** Цвет свечения определяется изменением энергии атомов при переходе из одного состояния в другое, а эти состояния для атомов различных элементов неодинаковы. **14.54.** В эти периоды от Солнца к Земле летит значительно больше заряженных частиц, чем обычно. Магнитное поле Земли отклоняет их к полюсам Земли. **14.55.** Большое число летящих заряженных частиц создает свое непрерывно изменяющееся магнитное поле у поверхности Земли. **14.56.** Тлеющим разрядом называют самостоятельный разряд в газе, при котором электроны выбиваются из катода положительными ионами и фотонами; разряд происходит при низком давлении газа — от  $10^{-2}$  до  $10^5$  Па; сила тока может достигать нескольких десятых долей ампера. **14.57.** I — катодное темное пространство; электроны разгоняются до энергий, достаточных для ударной ионизации молекул газа; ионы разгоняются сильным электрическим полем и выбивают электроны из катода. II — область отрицательного или тлеющего свечения; электроны ионизируют молекулы газа; свечение в основном вызывается рекомбинацией электронов и ионов; возникающее при этом излучение вызывает световое ощущение. III — фарадеево темное пространство — в нем электроны разгоняются электрическим полем. IV — положительный столб; большая концентрация ионов и электронов обусловлена ударной ионизацией электронами; свечение положительного столба вызвано излучением возбужденных атомов и молекул. **14.58.** В лампах тлеющего разряда (используется область катод-

ных соответствующих видимому излучению. **14.53.** Цвет свечения определяется изменением энергии атомов при переходе из одного состояния в другое, а эти состояния для атомов различных элементов неодинаковы. **14.54.** В эти периоды от Солнца к Земле летит значительно больше заряженных частиц, чем обычно. Магнитное поле Земли отклоняет их к полюсам Земли. **14.55.** Большое число летящих заряженных частиц создает свое непрерывно изменяющееся магнитное поле у поверхности Земли. **14.56.** Тлеющим разрядом называют самостоятельный разряд в газе, при котором электроны выбиваются из катода положительными ионами и фотонами; разряд происходит при низком давлении газа — от  $10^{-2}$  до  $10^5$  Па; сила тока может достигать нескольких десятых долей ампера. **14.57.** I — катодное темное пространство; электроны разгоняются до энергий, достаточных для ударной ионизации молекул газа; ионы разгоняются сильным электрическим полем и выбивают электроны из катода. II — область отрицательного или тлеющего свечения; электроны ионизируют молекулы газа; свечение в основном вызывается рекомбинацией электронов и ионов; возникающее при этом излучение вызывает световое ощущение. III — фарадеево темное пространство — в нем электроны разгоняются электрическим полем. IV — положительный столб; большая концентрация ионов и электронов обусловлена ударной ионизацией электронами; свечение положительного столба вызвано излучением возбужденных атомов и молекул. **14.58.** В лампах тлеющего разряда (используется область катод-

ного свечения); в сигнальных и контрольных лампах на шитах управления; в газосветных трубках для рекламы; в лампах дневного света и в газовых лазерах; для получения тонких пленок, зеркальных поверхностей методом катодного напыления: частицы материала катода, выбитые ионами, летят во все стороны и покрывают тонким слоем поверхность тел, помещенных в трубку.

**14.59.** Положительно заряженные ионы газа, образующиеся при столкновении частиц в трубке, ударяются о катод и выбивают из него электроны.

Да, при наличии термо- и фотоэлектронной эмиссий. **14.60.** От читателя.

**14.61.** В электронных лампах, электронно-лучевых и рентгеновских трубках, электронных микроскопах, электронных печах для получения сверхчистых материалов. **14.62.** 2,49 В;  $3,98 \cdot 10^{-19}$  Дж. **14.63.**  $3,51 \cdot 10^4$  К. **14.64.** Нет;

см. ответ 14.63; испарение же электронов происходит; электронный газ в металле не подчиняется законам идеального газа и средняя кинетическая энергия электронов значительно больше  $\frac{3}{2}kT$  (объяснение дается в квантовой механике).

**14.65.**  $1,26 \cdot 10^6$ ,  $9,35 \cdot 10^5$  и  $1,09 \cdot 10^6$  м/с. **14.66.**  $v_0 = 1,08 \cdot 10^6$  м/с,  $v_1 = 0,54 \cdot 10^6$  м/с. **14.67.** От материала катода, размеров его поверхности, температуры.

**14.68.** Покрывая катод металлами с меньшей работой выхода — барием, торием, цезием. **14.69.** 8 мА. **14.70.**  $7,5 \cdot 10^{16}$ . **14.71.** Ударами частиц, воздействием излучения, воздействием сильного электрического поля.

Вторичная эмиссия, фотоэмиссия, автоэмиссия. **14.72.** Можно, изменяя температуру накала катода, но в небольших пределах. **14.73.** Потому что в лампе наряду с испарением электронов происходит оседание электронов пространственного заряда на катоде.

**14.74.** 3 Дж; 50 В. **14.75.** 900 Ом; 1,0 Вт. **14.76.** 6,03 В. **14.77.** График 2. **14.78.** График 1 — для  $U_c > 0$ , 2 — для  $U_c = 0$ , 3 — для  $U_c < 0$ .

**14.79.** График 2, так как ему соответствует более низкий потенциал запирания лампы. **14.80.** Потому что в них число свободных зарядов значительно больше, чем в вакуумных лампах. **14.81.** Для устранения рассеяния электронов и получения электронного луча.

**14.82.** Чтобы управлять движением электронного луча в двух взаимно перпендикулярных направлениях. Двумя катушками с током, создающими магнитные поля во взаимно перпендикулярных направлениях. **14.83.** 1 — катод; 2 — управляющий электрод; 3 и 4 — фокусирующий и ускоряющий аноды; 5 — вертикально отклоняющие пластины; 6 — горизонтально отклоняющие пластины; 7 — аквадаг (графитовый слой для удаления электронов с экрана); 8 — люминесцентный экран; потенциометр  $R_1$  — для регулировки яркости,  $R_3$  — для фокусировки электронного луча, резисторы  $R_2$  и  $R_4$  исключают возможность короткого замыкания между полюсами источника тока и обеспечивают минимальную разность потенциалов на электродах. **14.84.** 300 В.

## § 15. Электрический ток в полупроводниках

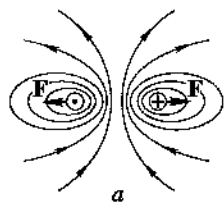
**15.1.** У проводников  $\rho = 10^{-8} - 10^{-5}$  Ом·м, у полупроводников  $10^{-5} - 10^7$  Ом·м, у диэлектриков  $10^7 - 10^{16}$  Ом·м. **15.2.** Одинакова; нулю. **15.3.** При нагревании и облучении. **15.4.** Образуется нейтральный атом и выделяется

энергия. **15.5.** Одновременно с образованием пар электрон–дырка происходит рекомбинация ранее образовавшихся пар электрон–дырок. **15.6.** Уменьшается, так как увеличивается генерация электронов и дырок, т.е. увеличивается их концентрация. **15.7.** Отрицательный; в 10–20 раз больше, чем у проводников. **15.8.** Концентрация носителей электричества электронов и дырок растет значительно быстрее уменьшения длины свободного пробега. **15.9.** В термисторах; сопротивление уменьшается в 10–1000 раз в зависимости от изменения температуры. **15.10.** Уменьшится; увеличится. **15.11.** Удельное сопротивление чистого германия при комнатной температуре в  $10^9$ – $10^{10}$  раз больше, чем у металлов. **15.12.** Уменьшается. **15.13.** Электроны и дырки могут образовываться под воздействием теплового движения молекул. **15.14.** Да. При неизменной освещенности график 2. **15.15.** Введением в полупроводник примеси из элементов V группы таблицы Менделеева; путем введения примеси из элементов III группы. **15.16.** При добавлении P, As, Sb — элементов V группы — преимущественно электронную проводимость; при добавлении Ga, B, In — элементов III группы — преимущественно дырочную проводимость. **15.17.** При невысоких температурах их сопротивление при нагревании возрастает, при высоких температурах уменьшается. **15.18.** Да. **15.19.** В результате рекомбинации электронов и дырок она значительно меньше, чем в *p*- и *n*-областях полупроводника; оно значительно больше сопротивления *p*- и *n*-областей. **15.20.** Потому что на них действует сила со стороны электрического поля *p*-*n*-перехода. **15.21.** I — в прямом направлении; II — в обратном направлении. Из-за большого различия силы тока прямого и обратного. **15.22.** Потому что прямой ток создается основными носителями зарядов, а обратный — неосновными, число которых значительно меньше основных. **15.23.** Без нагрузки прямое напряжение на вентиле превысит контактную разность потенциалов в *p*-*n*-переходе и вентиль сгорит. **15.24.** 115 В. **15.25.** При значительном нагревании полупроводников резко возрастает образование пар электрон–дырка; до 70 °C; до 120–150 °C. **15.26.** Для выпрямителя на рисунке а к задаче 15.26 — график г, для выпрямителей б, в — график д. **15.27.** Необходимо, чтобы неосновные для базы носители зарядов, проходя через нее, не успевали рекомбинировать. **15.28.** Потому что главную часть тока через эмиттерный переход должны составлять основные носители зарядов эмиттера, переходящие в базу и достигающие коллекторного перехода. Другая часть тока через эмиттерный переход, состоящая из основных носителей зарядов базы, не связана с коллекторным переходом и является для него бесполезной. **15.29.**  $I_s = I_b + I_k$ . **15.30.** Нет. В первом случае больше. **15.31.** На рисунке а — транзистор *p*-*n*-*p*, на рисунке б — транзистор *n*-*p*-*n*. **15.32.** Схема с общей базой. Увеличивается.

## § 16. Электромагнетизм

**16.1.** Нет; нет; да. **16.2.** В системе  $K'$  поле заряженного тела имеет магнитную составляющую. **16.3.** Ток идет слева направо. Стрелка отклонится в обратную сторону. **16.4.** См. рисунок. **16.5.** В противоположные стороны.

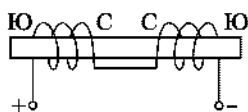
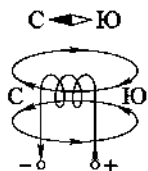
Проводник растягивается. **16.6.** Спираль сожмется. **16.7.** См. рисунок. **16.8.** Да; см. рисунок. **16.9.** Да. Да; нет. **16.10.** Нет, только на магнитном



а



б

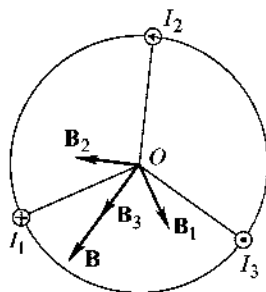


К ответу 16.4

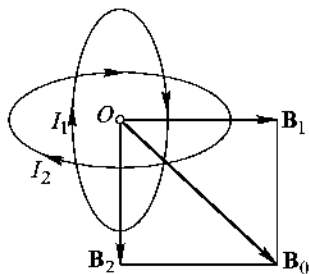
К ответу 16.7

К ответу 16.8

экваторе. Да, на магнитных полюсах. **16.11.** Нет; только при магнитном наклонении, равно нулю. **16.12.** 12,6 А; направление тока в проводниках одинаково. **16.13.** 58 А. **16.14.** 1,9 м. **16.15.** Вертикально вниз и перпендикулярно плоскости рисунка «от читателя». **16.16.** 19 Н. **16.17.** 20 А. **16.18.** 30°. **16.19.** 10 А; 0,25 Н. **16.20.** 0,733 В; влево. **16.21.** 625 мТл. **16.22.**  $F = k(mg \pm BIl)$ ; 0,148 Н или 0,048 Н в зависимости от направления  $I$  и  $B$ . **16.23.**  $1,59 \cdot 10^6$  А/м. **16.24.**  $0,88 \geq F \geq 0,62$  Н. **16.25.** 23 А/м;  $2,9 \cdot 10^{-5}$  Тл. **16.26.**  $2,2 \cdot 10^2$  А/м; 63 А. **16.27.** 0,40 м. **16.28.** а) 3,98 А/м;  $5 \cdot 10^{-6}$  Тл; б) 45 А/м;  $5,66 \cdot 10^{-5}$  Тл; в) 13,8 А/м;  $1,73 \cdot 10^{-5}$  Тл. **16.29.** 20 А/м;  $2,51 \cdot 10^{-5}$  Тл; 50,3 А. **16.30.** а) 0; 0; б)  $I/(4\pi R)$  и  $\mu_0 I/(4\pi R)$ . **16.31.** а) 0; б) 796 А/м; в)  $1,59 \cdot 10^3$  А/м; г)  $8,0 \cdot 10^2$  А/м. **16.32.** Прямая, параллельная проводникам и лежащая в одной с ними плоскости за проводником с силой тока 16 А на 0,40 м от него; прямая между проводниками с силой тока 16 А. **16.33.** 37 и 21 А/м. **16.34.** 44 А/м;  $5,5 \cdot 10^{-5}$  Тл (см. рисунок). **16.35.**  $7,0 \cdot 10^{-3}$  и  $3,8 \cdot 10^{-3}$  Н.



К ответу 16.34



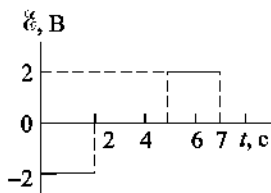
К ответу 16.41

Да; нет. **16.36.**  $6,5 \cdot 10^{-3}$  и  $3,3 \cdot 10^{-3}$  Н. **16.37.** 100 А/м; 126 мкТл. По часовой стрелке. **16.38.** 100 А/м; 12 А. **16.39.** 0,63 А/м; 0,8 мкТл. **16.40.** 35 и 5,0 А/м. **16.41.** 0,12 мТл; 6,0 А; см. рисунок. **16.42.** 12,3 А; 0,13 мТл. **16.43.** 14 А. **16.44.**  $4,9 \cdot 10^3$  А/м; 6,2 мТл. **16.45.** 0,74 А. **16.46.** 15,2 витка на 1 см. **16.47.**  $5,2 \cdot 10^3$  А/м. **16.48.** 47,6 мТл. **16.49.**  $1,4 \text{ А} \cdot \text{м}^2$ . **16.50.** 3,5 А.

**16.51.** 5,5 см. **16.52.** 19,2 А·м<sup>2</sup>; 0,346 и 0,173 Н·м. **16.53.** 5,6 Н·м.  
**16.54.**  $\mu_0 Q \sqrt{gl \cos \alpha} / [2\pi l^2 \sin(2\alpha)]$ ;  $Ql \sqrt{gl \cos \alpha} (\sin \alpha \cdot \operatorname{tg} \alpha) / 2$ . **16.55.** 11 Тл  
и  $8,5 \cdot 10^{-24}$  А·м<sup>2</sup>. **16.56.** 0,39 Тл и  $1,85 \cdot 10^{-23}$  А·м<sup>2</sup>. **16.57.** 8,8 мкВб.  
**16.58.** 18 мВб. **16.59.** На 4,0 мВб. **16.60.**  $\Phi = BS \cos \alpha$ ; 5,2 и 3,0 мВб.  
**16.61.** 14 мГн. **16.62.** 20. **16.63.** И то и другое увеличится в четыре раза.  
**16.64.** 50 мкВб; 70 мВб; 11 мГн. **16.65.** 11,4 В. **16.66.**  $\mu_0 \pi U^2 I / (64 N \rho^2 H^3)$ ;  
 $\mu_0 \pi U^2 I^2 / (64 N \rho^2 H^3)^{-1}$ . **16.67.** 2,5 Дж. **16.68.** 5 Дж. **16.69.** 2,42 Дж.  
**16.70.** 14 Дж. **16.71.** 0,024; 0,6048 и 0 Дж. **16.72.** Напряженность не  
изменится, а магнитная индукция немного увеличится; однако практически  
можно считать магнитную индукцию неизменной. **16.73.** 0,43 мВб; в 1,08  
раза; в 1,18 раза. **16.74.** 0,19 А; увеличится в 1,16 раза. **16.75.**  $6,3 \cdot 10^{-13}$  Н;  
3,1 мм. **16.76.**  $3,5 \cdot 10^6$  м/с. **16.77.**  $\omega = l^2 B^2 R^2 / (2m)$ . **16.78.** Окружность  
радиусом 13 см; 0,5 мс. **16.79.** 1,8 мм. **16.80.**  $8,0 \cdot 10^3$  А/м. **16.81.** 18,2 кВ,  
60 мТл. **16.82.**  $5,0 \cdot 10^5$  м/с,  $5,0 \cdot 10^5$ . Указание.  $v = E/B$ . **16.83.** 7,6 см;  
2,5 м. **16.84.** 6,0 км/с; 0,6 мкТл, 0,18 м. **16.85.** 1,6 см. **16.86.**  $3,94 \cdot 10^{-16}$  Дж.  
**16.87.** 39 и 41.

## § 17. Электромагнитная индукция

**17.1.** Вправо, не отклонится,  $l = 0$ ; вправо. **17.2.** Влево, влево.  
**17.3.** Вправо, нет. **17.4.** В первом случае работа больше. **17.5.** Второй;  
первый тормозится магнитным полем индукционного тока. **17.6.** Нет, нет.  
**17.7.** Нет; да. **17.8.** Да, нет, только в замкнутом проводнике. **17.9.** Нет,  
если при изменении площади контура магнитный поток не изменяется,  
ЭДС индукции не возникает. **17.10.** -9 мВ. **17.11.** -9 В. **17.12.** 40 мс.  
**17.13.** В контуре ток направлен против часовой стрелки; 12 В и 32 Вт.  
**17.14.** 72 витка. **17.15.** 12,5 мДж. **17.16.**  $Q = 2B^2 v l^3 (\sin^2 \alpha) / R = 1,3$  мДж.  
**17.17.** 0,300 м; по часовой стрелке (см. рисунок к задаче), если смотреть  
навстречу **B**; против часовой стрелки. **17.18.**  $\mathcal{E}_{\text{ср}} = \frac{3}{32} \frac{B \pi d^2}{\Delta t} = 59$  мВ,  
 $Q = \frac{3}{32} \frac{B \pi d^2}{R} = 25,9$  мКл. **17.19.**  $A_1 = Q(d^2/4)(\Delta B/\Delta t) = 24$  мДж,  $A_2 =$



К ответу 17.20

$= Q(\pi - 1)(d^2/4)(\Delta B/\Delta t) = 51$  мДж. **17.20.** См.  
рисунок. **17.21.**  $\mathcal{E} = 5 \cdot 10^{-2}$  В — от времени  
не зависит, 0,80 Кл; 40 мДж. **17.22.**  $\Psi =$   
 $= (3 + 2e^2) \cdot 2 \cdot 10^{-2}$ ;  $e_{\text{инд}} = d\Psi/dt = -8t \cdot 10^{-2}$ ;  
 $\psi = 4,1$  Вб;  $|e_{\text{инд}}| = 0,8$  В. **17.23.**  $\Phi = 2,0 \times$   
 $\times 10^{-4} \cos(4\pi t + \pi/6)$ ;  $e_{\text{инд}} = -d\Phi/dt = 8,0 \times$   
 $\times 10^{-4} \sin(4\pi t + \pi/6)$ ;  $e_{\text{инд}} = 4,0\pi \cdot 10^{-4}$  В =  
 $= 1,26$  мВ. **17.24.** 2,0 мКл и  $2,0 \cdot 10^{-11}$  Дж;  
нижняя. **17.25.** 0,402 В. **17.26.** 0,90 В.  
**17.27.** 9,62 м/с. **17.28.**  $23^\circ 30'$ . **17.29.** 20 мВ.  
**17.30.**  $\Delta\varphi_{AC} = \mathcal{E} = Bv(l_1 \sin \beta + l_2 \sin \gamma)$ ; от А к С по правилу  
правой руки. **17.31.**  $\mathcal{E} = Bvl \sin \alpha \cdot \sin \beta = 0,43$  В. **17.32.** Нет; да.  
**17.33.**  $I_2 = \mu_0 v l b I_1 / [2\pi R(x_0 + vt)(x_0 + I_0 + vt)]$ ; по часовой стрелке.



**17.34.** См. рисунок. **17.35.** 25 мВТ, 100 с<sup>-1</sup>. **17.36.** 0; 5,4 и 2,7 В.

**17.37.**  $I = \frac{Bvl}{r+R} = 0,10 \text{ А}$ ,  $F = \frac{B^2vl^2}{r+R} = 20 \text{ мН}$ ;  $P = \frac{B^2l^2v^2}{r+R} = 20 \text{ мВт}$ .

**17.38.**  $P = \left[ kmg + \frac{B^2l^2v^2}{r+R} \right] v = 0,12 \text{ Вт}$ .

**17.39.** 0,40 м/с;  $4,0 \cdot 10^{-7}$  Кл. **17.40.** 0,20,

0,13 и 0,07 А; 0,12 Вт. **17.41.**  $Q/t = P =$

$= (mg/Bl)^2/R = 1,9 \text{ Вт}$ ;  $v = mgR/(B^2l^2) =$

$= 20 \text{ м/с}$ . **17.42.**  $I = mg \sin \alpha / (Bl \cos \alpha) =$

$= 0,57 \text{ А}$ ;  $v = mgR \sin \alpha / (Bl \cos \alpha)^2 =$

$= 0,65 \text{ м/с}$ . **17.43.** 8,0 м/с. На 0,40 А увели-

чится. *Указание.*  $v = \left[ \mathcal{E}R - \frac{U(R+r)}{BlR} \right]$ ;

$\Delta I = \frac{Bvl}{R+r}$ . **17.44.** Вправо (по правилу

левой руки),  $P_{\text{макс}} = \mathcal{E}^2/(4R)$ ,  $I = \mathcal{E}/(2R)$

и  $v = \frac{\mathcal{E}}{2Bl}$ . **17.45.**  $v = \frac{\sqrt{2W/C} (r+R) - \mathcal{E}R}{Blr}$ ;

$P_{\text{тепл}} = \left( \mathcal{E} - \sqrt{\frac{2W}{C}} \right)^2 \frac{r+R}{r^2}$ ;  $P_{\text{мех}} = \left( 1 - \sqrt{\frac{2W}{C}} \right) \frac{\sqrt{2W/C} (r+R) - \mathcal{E}R}{r^2}$ .

**17.46.**  $\Delta W = mg \frac{\mathcal{E} \Delta t}{Bl}$ , не зависит. **17.47.**  $v = \frac{\mathcal{E}Bl}{B^2l^2} - \frac{mg(r+R)}{B^2l^2}$ ;

$P_{\text{мех}} = \frac{mg[\mathcal{E}Bl - vrg(r+R)]}{B^2l^2}$ ;  $P_{\text{тепл}} = \left( \frac{mg}{Bl} \right)^2 (r+R)$ . **17.48.** При изменении

магнитного поля; нет. **17.49.** Да; когда это поле создано переменным

электрическим полем, например в конденсаторе, включенном в цепь

переменного тока. **17.50.** При равномерном изменении магнитного поля, при

неравномерном  $B' \neq \text{const}$ . **17.51.** Притянется к катушке  $L_2$ . **17.52.** При

переменном токе в бруске возникают вихревые токи, а при постоянном —

нет. **17.53.** Кубик 1; в нем сила вихревых токов меньше. **17.54.** Так как

при повороте кубика 2 (см. рисунок к задаче 17.53) площадь, через которую

проходят линии магнитной индукции, возрастает, и магнитный поток увеличи-

чивается, то индукционный ток своим магнитным полем противодействует

увеличению магнитного потока. **17.55.** В диске возникают вихревые токи

в направлении вращения магнита; нет. **17.56.** Пластика оттолкнется от

электромагнита; притянется. **17.57.** Да, при быстром изменении силы тока в

электромагните; взаимодействием с возникающими в проводнике вихревыми

токами. **17.58.** При размыкании, так как время спада силы тока до нуля

меньше, чем время его возрастания. **17.59.** При равенстве ЭДС источника и

ЭДС самоиндукции сила тока стала бы равна нулю, не возникало бы явления

самоиндукции. **17.60.** -1,25 В; знак «-» показывает, что возникающая ЭДС

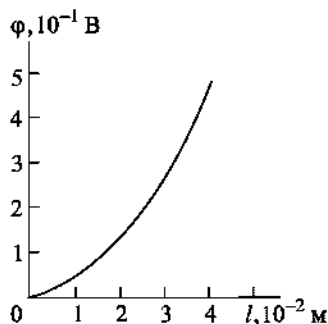
самоиндукции препятствует нарастанию силы тока. **17.61.** 22 В; знак «+»

показывает, что возникающая ЭДС самоиндукции препятствует убыванию

силы тока. **17.62.** 0,31 Гн. **17.63.** За 91 мс. **17.64.** -10,2 и -10,2 мВ. Нет,

только при линейной зависимости силы тока от времени. **17.65.**  $2 \cdot 10^{-2}$  Гн.

*Указание.* См. ответ 17.64. **17.66.** 63 мДж; уменьшится в четыре раза.



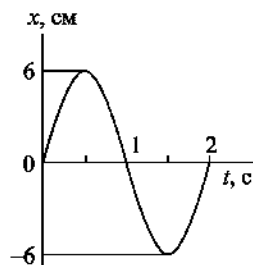
К ответу 17.34

**17.67.** 1,26 Дж. **17.68.** 2,0 А. **17.69.** 0,56 Дж; 14 В. **17.70.** Энергия источника питания превращается во внутреннюю энергию и энергию магнитного поля. **17.71.**  $W = \mu_0 N^2 \pi r^2 I^2 / (2l) = 1,3 \text{ мДж}$ ;  $\epsilon_{\text{янд}} = -Li' = 1,26 \times 10^{-4} \text{ В}$ . **17.72.**  $W = \mu_0 N^2 \pi d^2 U^2 / (8lR^2)$ ,  $\mathcal{E}_{\text{ср}} = \mu_0 N^2 d^2 U / (4lR\Delta t)$ . **17.73.**  $\mathcal{E}_{\text{ср}} = -2\Delta W / (I_{\text{ср}} \Delta t)$ . **17.74.**  $Q = 2(n-1)W / (nIR)$ ; уменьшится на  $\Delta W = (n^2 - 1)W / n^2$ . **17.75.**  $W = L(BUl)^2 / (2R^2)$ ;  $P_{\text{тепл}} = P_{\text{мех}} = (BUl)^2 / R$ . **17.76.**  $v_{\text{макс}} = g\sqrt{mL} / (Bl)$ ;  $h = mgL(B^2 l^2)$ ;  $W_{\text{м}} = Lm^2 g^2 / (2B^2 l^2)$ . *Указание.* Воспользоваться законом сохранения и превращения энергии:  $mgh = mv_{\text{макс}}^2 / 2 + LI^2 / 2$  и  $mg = BI$ ;  $\Delta\Phi = Blh = LI$ , так как  $I_0 = 0$ .

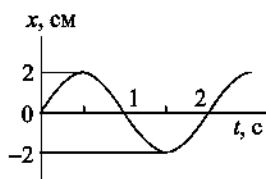
## § 18. Механические колебания и волны. Звук

**18.1.** 1,25 с; 0,8 Гц. **18.2.** 100 мкс;  $6,0 \cdot 10^5 \text{ мин}^{-1}$ . **18.3.** В первом случае в любой момент времени скорости маятников направлены одинаково — колебания происходят синфазно; во втором случае направления скоростей противоположны — маятники колеблются противофазно. **18.4.**  $\pi$  рад. Маятники на рисунке а имеют разные периоды, для них разность фаз не сохранится; в случае, изображенном на рисунке б, разность фаз сохранится, колебания будут когерентными. **18.5.**  $x_1 = 1,0 \cdot 10^{-1} \sin(2\pi t + \pi/4)$ ,  $x_2 = 5,0 \cdot 10^{-2} \sin(\pi t + \pi/2)$ ,  $x_3 = 4,0 \cdot 10^{-2} \sin(4\pi t + \pi)$ . **18.6.**  $x = 5,0 \cdot 10^{-2} \sin(200\pi t)$ ,  $\nu = 100 \text{ Гц}$ ;  $\omega = 200\pi \text{ с}^{-1}$ ;  $v_{\text{макс}} = 10\pi \text{ м/с}$ ,  $a_{\text{макс}} = -2,0 \cdot 10^3 \pi^2 \text{ м/с}^2$ ,  $W = 5\pi^2 \text{ Дж} = 49 \text{ Дж}$ . **18.7.**  $2,0 \cdot 10^{-2} \text{ м}$ ;  $\pi/2$ ; 8,0 с. **18.8.**  $x_1 = A/2$ ;  $x_2 = A$ ;  $x_3 = 0$ ;  $x_4 = -A/2$ . **18.9.**  $x_1 = 0$ ;  $x_2 = 0$ . **18.10.** 0,10 с,  $x = 2 \cdot 10^{-2} \sin(10\pi t/3)$ . **18.11.**  $2T/3$ . **18.12.**  $x = 4 \cdot 10^{-2} \sin[\pi(5t + 1/2)]$ , 0,63 м/с. **18.13.**  $v = 0,2\pi \cos(5\pi t + \pi/2)$ ;  $a = -\pi^2 \sin(5\pi t + \pi/2)$ ; 0,444 м/с;  $-6,98 \text{ м/с}^2$ . **18.14.** 2,0 см;  $\pi/2$ , 10 Гц,  $-39,4 \text{ Н}$  (знак минус указывает на то, что возвращающая сила направлена в сторону, противоположную смещению); 3,95 мДж. **18.15.** 10 см;  $-394 \text{ м/с}^2$ ;  $x = 1,0 \cdot 10^{-1} \sin(62,8t)$ . **18.16.**  $x = -6,0 \cdot 10^{-4} \cos(100t)$ ;  $6,0 \cdot 10^{-2} \text{ м/с}$ ;  $-6,0 \text{ м/с}^2$ ;  $3,6 \cdot 10^{-4} \text{ Дж}$ . **18.17.**  $-4\pi^2 \cdot 10^{-1} \text{ м/с}^2$ ;  $5,0 \cdot 10^{-2} \text{ м}$ ;  $\pi^2 \cdot 10^{-3} \text{ Дж}$ ; 0,15 м. **18.18.**  $-20 \text{ см}$ ; 39,4 мДж; 0; 0,39 Н; 60 см. **18.19.**  $a_{\text{макс}} = g$ ,  $A = 6,2 \text{ см}$ . *Указание.*  $a_{\text{макс}} = 4\pi^2 A / T^2$ . **18.20.** При  $A \geq kgT^2 / (4\pi^2) \approx 0,2 \text{ м}$ . **18.21.**  $T = 2\pi\sqrt{m/(\rho g S)}$ . **18.22.**  $T = 2\pi\sqrt{\rho H/(\rho_{\text{ж}} g)}$ . **18.23.**  $T = 2\pi\sqrt{m/(2\rho g S)}$ . **18.24.**  $T = 2\pi\sqrt{m/[\rho g(S_1 + S_2)]}$ . **18.25.** 3,94 Н/м. **18.26.**  $T = 2\pi\sqrt{\Delta l/g}$ , не зависит. **18.27.**  $x = 6,0 \cdot 10^{-2} \sin(20t)$ ; 18 мДж. **18.28.** 4,24 см, 39,3 мс;  $T/8$ . **18.29.**  $x = (mg/k) \sin(\sqrt{k/m} t)$ ,  $E = (mg)^2 / (2k)$ . Не изменится; не изменится. **18.30.**  $T = 2\pi\sqrt{m/(k_1 + k_2)}$ . Нет. **18.31.**  $T_1 = T/\sqrt{2} \approx 0,707T$ . **18.32.**  $T_{\text{полн}} = 2\pi\sqrt{m(k_1 + k_2)/(k_1 k_2)}$ ,  $T_{\text{пар}} = 2\pi\sqrt{m(k_1 + k_2)/(4k_1 k_2)}$ . **18.33.**  $T_1 = \sqrt{m/k} [\pi + 2\arcsin(A/l)]$ . **18.34.** 2,00 с, увеличится в четыре раза. **18.35.**  $9,81 \text{ м/с}^2$ . **18.36.** 0,994 м; на 0,745 м. **18.37.** Как 4 : 1. **18.38.** 0,27 и 0,75 м. **18.39.** Через 2,0 с; фазы одинаковы через каждые два колебания второго маятника или одно колебание первого маятника. **18.40.**  $t_1 \approx 0,9t_2$ ; положения равновесия раньше достигнет шарик, свободно падающий от точки подвеса. **18.41.**  $t_2 = (1/4)\pi\sqrt{2} t_1$ . **18.42.**  $T = \pi\sqrt{l/g} (1 + \sqrt{0,5})$ ;

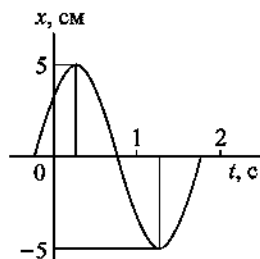
- не изменятся. **18.43.**  $T_1 = [\pi + 2 \arcsin(\beta/\alpha)]\sqrt{l/g}$ ;  $T_2 = (5\pi/3)\sqrt{l/g}$ . **18.44.** Период пружинного маятника сохранится; для нитяного  $T_{\text{н}} = \sqrt{6} T_3$ . **18.45.**  $T_{\text{н}} = 2T_3$ . **18.46.** На 3 мин 40 с. **Указание.**  $\Delta t = t_0(1 - \sqrt{g_{\text{эвк}}/g_0})$ ,  $t_0 = 8,4 \cdot 10^4$  с. **18.47.** На 54 с. **18.48.**  $\Delta t = [1 - \sqrt{1/(1 + \alpha \Delta t)}]t_0 \approx 17,3$  с. **18.49.**  $T = 2\pi\sqrt{l/\sqrt{g^2 + a^2} - 2ag \cos \alpha}$ . **18.50.**  $T_1 = 2\pi\sqrt{l/(g+a)}$ ;  $T_2 = 2\pi\sqrt{l/(g-a)}$ . **18.51.**  $a = 3g$ . **18.52.** В момент выключения двигателей наступает невесомость, возвращающая сила становится равной нулю — колебаний не будет; маятник останется в крайнем положении; если позволяют условия точки закрепления подвеса маятника, он будет совершать движение по окружности. **18.53.** В обоих случаях  $T'/T = \sqrt{g/\sqrt{g^2 + a^2}}$ . **18.54.**  $v = \sqrt[4]{(n^4 - 1)g^2 R^2}$ . **18.55.**  $a = 4\pi^2 l/T^2$ . **18.56.** Силы натяжения нити и возвращающая возрастут; период колебаний уменьшится. **18.57.**  $T = 2\pi\sqrt{l/(g \pm QU/md)}$  (знак плюс, если нижняя пластина заряжена отрицательно);  $T = 2\pi\sqrt{l/\sqrt{g^2 + (QU/md)^2}}$ . **18.58.**  $\frac{\alpha g}{4\pi^2 \nu^2}$ ,  $\frac{\alpha g}{2\pi \nu}$ . **18.59.**  $l = 2h/\alpha^2$ ;  $T = (2\pi/\alpha)\sqrt{2h/g}$ ;  $x = (2h/\alpha)\sin(\sqrt{g/2h} \alpha t)$ . **18.60.**  $\nu = (1/\pi A)\sqrt{E/2m}$ ;  $l = mgA^2/(2E)$ ,  $E = 2\pi^2 \nu^2 A^2 m$ ; нет. **18.61.** 2,2 с. **18.62.** 0,57 м. **18.63.**  $T = 2\pi\sqrt{(m_1 l_1^2 + m_2 l_2^2)/[g(m_1 l_1 + m_2 l_2)]}$ ;  $T = 2\pi\sqrt{(m_1 l_1^2 + m_2 l_2^2)/[g(m_1 l_1 - m_2 l_2)]}$ . **18.64.** По правилу векторного сложения. **18.65.**  $x_1 = 2\sin(\pi t)$ ;  $x_{\text{II}} = 4\sin(\pi t)$ , где  $x$  выражено в сантиметрах;  $x_{\text{рез}} = (A_1 + A_2)\sin(2\pi t/T) = 6\sin(\pi t)$  (см. рисунок). **18.66.**  $x_1 = 2\sin(\pi t - \pi)$ ;  $x_{\text{II}} = 4\sin(\pi t)$ ;  $x_{\text{рез}} = 2\sin(\pi t)$  (см. рисунок);  $\pi$ .



К ответу 18.65



К ответу 18.66



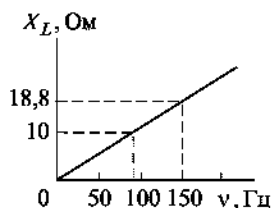
К ответу 18.67

- 18.67.**  $x_1 = 3\sin(\pi t - \pi/2)$ ;  $x_{\text{II}} = 4\sin(\pi t)$ ;  $x_{\text{рез}} = 5\sin(\pi t + 0,64)$  (см рисунок);  $\pi/2$ . **18.68.**  $x_1 = 0,20\sin(400\pi t)$ ;  $x_2 = 0,10\sin(200\pi t)$ . **18.69.** Гармонические колебания с тем же периодом;  $x_1 = (A_1 + A_2)\sin(\varphi_0 + \frac{2\pi}{T}t)$ ;  $x_2 = (A_1 - A_2)\sin(\varphi_0 + \frac{2\pi}{T}t)$ ;  $x_3 = \sqrt{A_1^2 + A_2^2} \sin(\arctg \frac{A_2}{A_1} + \frac{2\pi}{T}t)$ . **18.70.** При автоколебаниях частота и амплитуда колебаний определяются конструкцией колебательной системы; источник энергии входит в автоколебательную систему. При вынужденных колебаниях частота колебаний определяется

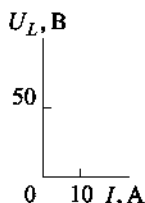
внешним воздействием. **18.71.** Для маятников 1 и 3 (см. рисунок к задаче 18.71), при сильном затухании. **18.72.** При резонансе направление вынуждающей силы совпадает с направлением перемещения, работа вынуждающей силы положительна, что вызывает возрастание энергии колебательной системы. **18.73.** Устранить совпадение частоты изменения вынуждающей силы с собственной частотой колебаний, увеличивая или уменьшая частоту колебаний вибратора. **18.74.**  $v = l/T_0$ . **18.75.**  $v = \frac{l}{2\pi} \sqrt{\frac{k}{m}}$ . **18.76.** 2,9 м. **18.77.** 3,4 м. **18.78.**  $1,5\pi$ ; 2,0 м. **18.79.** 0,01 с. **18.80.** 2,0 с; 3,0 м/с; 6,0 м. **18.81.** 10 м/с. *Указание.*  $v = \lambda v_0(v_1 + v_2)/(v_2 - v_1)$ . **18.82.**  $x = 0,10 \sin\left(0,5\pi t - \frac{0,5\pi l}{200}\right)$  для любых  $l$ ;  $x = 0,10 \sin(0,5\pi t - \pi)$ . **18.83.**  $x = A \sin\left[\frac{2\pi u}{\lambda} \left(t - \frac{l}{u}\right)\right]$ ;  $v = x' = \frac{2\pi u A}{\lambda} \cos\left[\frac{2\pi u}{\lambda} \left(t - \frac{l}{u}\right)\right]$ ; 0. **18.84.**  $A = \frac{v_{\max}}{2\pi\nu}$ ;  $\lambda = u/\nu$ ;  $x = \frac{v_{\max}}{2\pi\nu} \sin\left[2\pi\nu \left(t - \frac{l}{u}\right)\right]$ , где  $l$  — расстояние от вибратора. **18.85.**  $x = A \sin\left[\frac{v_{\max}}{A} \left(t - \frac{l}{u}\right)\right]$ ;  $v = v_{\max} \cos\left[\frac{v_{\max}}{A} \left(t - \frac{l}{u}\right)\right]$ ; 0;  $-v_{\max}$ . **18.86.** При  $\Delta t = t_2 - t_1 = \frac{2n}{2\nu} = \frac{2n}{200}$ , при  $\Delta t = (2n+1)\frac{1}{2\nu} = (2n+1) \times \frac{1}{200}$ , где  $n = 0, 1, 2, 3, \dots$ . **18.87.**  $\Delta l = 2n \cdot \frac{1}{2}$ ,  $\Delta l = (2n+1) \cdot \frac{1}{2}$ , где  $n = 0, 1, 2, 3, \dots$ . **18.88.** Нет, энергия перераспределяется из минимумов в максимумы колебаний. **18.89.** 0,778 м; 440 Гц. **18.90.** 0; в противоположных фазах; нет. **18.91.** 0,40 м (см. рисунок). **18.92.**  $\lambda_{\text{ст}} = 2\pi u/\omega_{\text{ст}}$  ( $\omega_{\text{ст}} = \omega$ );  $\nu_{\text{ст}} = \nu$ ;  $x = 2A \cos \frac{\omega y}{u} \sin(\omega t) = 2A \cos \frac{2\pi y}{\lambda} \sin(\omega t)$ ;  $A_{\text{ст}} = 2A \cos \frac{2\pi y}{\lambda}$ ;  $y_{\text{ст}} = \pm(2n+1)\frac{\lambda}{4}$ ;  $y_{\text{пуч}} = \pm \frac{u}{\omega} \cdot 2n\frac{\pi}{2} = \pm \frac{n\lambda}{2}$ . **18.93.** 21,3–0,017 м. **18.94.** Интенсивность звука обратно пропорциональна квадрату расстояния и прямо пропорциональна квадрату амплитуды; с увеличением амплитуды колебаний громкость возрастает. **18.95.** Нет; ухо человека наиболее чувствительно к звукам в интервале частот 1–3 кГц. **18.96.** Нет, только если интенсивность звука выше звукового порога. **18.97.** Тембр, по обертонам, входящим в состав звуковых колебаний, создаваемых данным источником звука. **18.98.** Возвращающиеся с взятком пчелы тяжелее и поэтому чаще машут крыльями, при этом высота тона звука возрастает. **18.99.** 333 м/с. **18.100.** 3,32; 3,41 и 3,44 м. **18.101.** 3,44 м. Не изменится. **18.102.** 883 м. **18.103.**  $H = (1/2)u\sqrt{t_2^2 - t_1^2}$ . **18.104.**  $u$ ;  $u' = u - v$  — при распространении звука против ветра;  $u' = u + v$  — по ветру. **18.105.** 17 м; 17,3 м. **18.106.**  $l = 0,1(u^2 - v^2)/(2u)$ . **18.107.**  $l = n\lambda/4$ , где  $n$  — нечетное число; при этом на выходе будет пучность смещения. **18.108.** 0,195 м. **18.109.** 3,06 см, 10,2 см, 0,51 мм. **18.110.** Волны с частотой менее 17 Гц; 6 Гц — приблизительно такую собственную частоту колебаний имеют позвоночник человека, его сердце, почки, а также ветер, штормы, землетрясения. **18.111.** Не зависит. **18.112.** 1,9, 2,1 и 2 с. **18.113.** На 142 Гц. **18.114.** 666 и 542 Гц. *Указание.*  $\nu = [(c \pm v)/(c \mp u)] \nu_0$ .

## § 19. Переменный электрический ток

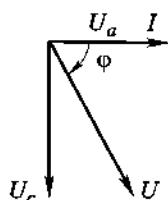
**19.1.** Ток, изменяющийся по модулю и направлению. **19.2.** Нет, только в однородном магнитном поле; нет, только при равномерном вращательном движении. **19.3.** Вынужденные гармонические колебания заряженных частиц под действием периодически изменяющейся силы Лоренца. **19.4.** 156 В;  $e = \sin \varphi$ ; 127 В. **19.5.**  $e = 2\pi \sin(4\pi t)$  и  $2\pi$  В;  $\pi\sqrt{2}$ . **19.6.** 311; 0 и -220 В. **19.7.**  $e = \mathcal{E}\sqrt{2} \sin[(\mathcal{E}\sqrt{2}/NBS)t]$ ; 0. **19.8.**  $m = UT\rho d^2\sqrt{2}/(2BI)$ . **19.9.**  $e = 6,28 \sin(314t)$ ; 6,28 и 4,44 В; 3,14 В. **19.10.** 100;  $e = 25,12 \sin(628t)$ . **19.11.** 6,9 и 3,1 мс. **19.12.** Упрощается устройство, увеличивается надежность генератора из-за отсутствия скользящих контактов для отвода вырабатываемой электроэнергии. **19.13.** 707 кВ. **19.14.** Нет, так как максимальное напряжение в цепи приблизительно 311 В. **19.15.** 8,5 А; 0,651 рад и 50 Гц; 5,1 и 8,1 А; 6,0 А. **19.16.** Нет, только при одной паре магнитных полюсов. **19.17.** 24. **19.18.**  $e = 311 \sin(314t)$ . **19.19.**  $e = 4\pi \sin(8\pi t)$ ;  $\mathcal{E} = 2\pi\sqrt{2}$  В. **19.20.** На активном сопротивлении энергия электрического тока необратимо преобразуется во внутреннюю, на индуктивном — энергия электрического тока при возрастании силы тока превращается в энергию магнитного поля, а при уменьшении возвращается в цепь генератора; на емкостном — при нарастании напряжения энергия электрического тока переходит в энергию электрического поля, а при убывании возвращается в цепь генератора. Индуктивное и емкостное сопротивления называются реактивными потому, что энергия электрического тока, полученная ими, возвращается в цепь и потребителем не используется. **19.21.** 1,6 кДж; 160 Вт. **19.22.** 28,3 В;  $u = 40 \sin(314t)$ ; 0. **19.23.** 12 Дж. **19.24.** Нет, при постоянном токе больше. При постоянном токе нет, при переменном увеличится. **19.25.** 6,28 Ом; см. рисунок. **19.26.**  $i = 22,5 \sin(314t)$ ;  $u = 141,4 \sin(314t + \pi/2)$ ;  $\varphi = \pi/2$ , см. рисунок. **19.27.**  $u = 4,0 \cdot 10^{-3} \sin(628t + \pi/2)$ . **19.28.** 943 Гц. **19.29.**  $U_{\max} = (4\pi\nu W_{\max}/I_{\max})$ ;  $\varphi_0 = \pi/2$ ,  $u = (4\pi\nu W_{\max}/I_{\max}) \sin(2\pi\nu t + \pi/2)$ . **19.30.** 21 Ом; уменьшится в четыре раза. **19.31.** Уменьшится на 23,9 Ом. **19.32.** 32 вар; 1,57. **19.33.** Напряжение отстает от тока по фазе на  $\pi/2$ ;  $i = 19,5 \cdot 10^{-6} \sin(314t)$ ,  $q = 6,2 \cdot 10^{-8} \sin(314t - \pi/2) = 6,2 \cdot 10^{-8} \cos(314t)$ . **19.34.**  $u = 200 \sin(100t - \pi/2) = -200 \cos(100t)$ ; -10 вар. **19.35.** 0,25 рад; 4,0 Ом; 0,97; 3,9 Ом; 0,99 Ом; 450 В·А и 436 Вт. **19.36.** 80 Ом, 0,605; -53° (знак «-» потому, что напряжение отстает по фазе от тока); 2,8 А;



К ответу 19.25

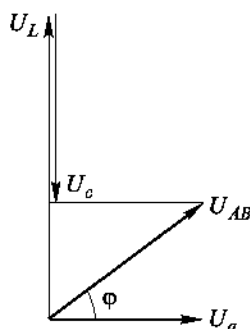


К ответу 19.26

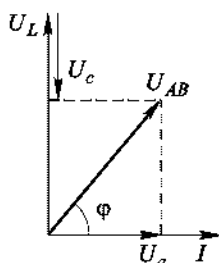


К ответу 19.36

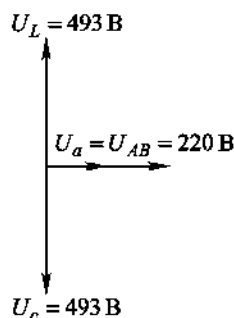
133 и 175 В; 605 В·А; 366 Вт; -482 вар. См. рисунок. **19.37.** Увеличится на 41 В. **19.38.** 50 м; 0,8; 37°; 10 А; 50 В; 0,50 кВ·А; 0,40 кВт; 0,30 квар. См. рисунок. **19.39.** 50 В; 2,5 А; 0,60; 53°; 20 Ом; 125 В·А; 75 Вт. См. рисунок. **19.40.** Да, приближая разность  $X_L - X_C$  к нулю. **19.41.** Да; нет.



К ответу 19.38

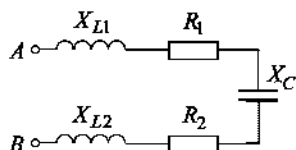


К ответу 19.39

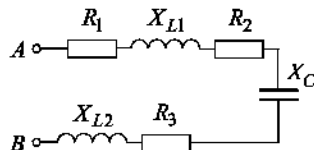


К ответу 19.43

**19.42.** 11 А; 398 В; 222 В; 2,43 кВ·А; 1,46 кВт и -1,94 квар. **19.43.** 67 Гц; 493 и 493 В; 4,0 кВ·А и 4,0 кВт. Резонанс напряжений. См. рисунок. **19.44.** 158 мкФ; 520 В; 4,0 кВ·А; 4,0 кВт; 1. На емкостном и индуктивном сопротивлениях могут возникать напряжения, значительно превышающие напряжения в цепи, что может вызвать пробой изоляции и короткое замыкание. **19.45.** См. рисунок;  $U_{AB} = \sqrt{(U_2 + U_4)^2 + (U_1 - U_3 + U_5)^2}$ ;  $\cos \varphi = \frac{U_2 + U_4}{\sqrt{(U_2 + U_4)^2 + (U_1 - U_3 + U_5)^2}}$ . **19.46.** См. рисунок; 20 В; 5,0 Ом; 1;

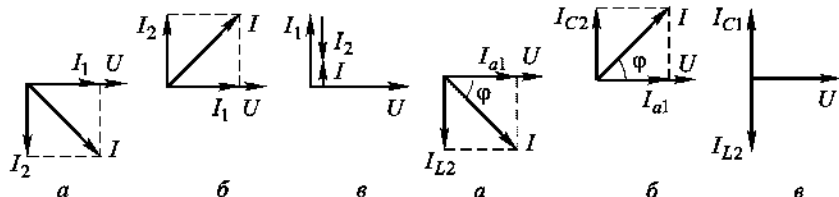


К ответу 19.45



К ответу 19.46

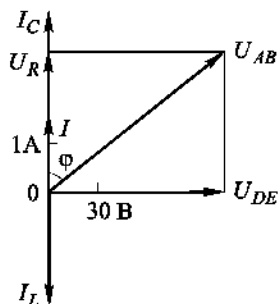
80 Вт; резонансу напряжений. **19.47.** 5 А, см. рисунок а; 5 А, рисунок б; 1 А, рисунок в. **19.48.** 14, 14 и 0 А. См. рисунок. **19.49.** Нет; 290 Гц.



К ответу 19.47

К ответу 19.48

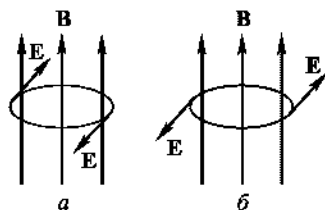
**19.50.** 20 А; 11,7 А, 20,13 А; 2,013 кВ·А; 2,01 кВт. **19.51.** 0 А (См. пример 74),  $I_L = I_C = 3,14$  А. При изменении частоты сила тока в неразветвленной части цепи возрастет. **19.52.** 148 В. См. рисунок. **19.53.** 10, 5 и 25 Ом; 3,94, 7,87 и 8,8 А; 39,4 В;  $36^\circ 52'$ ; 1936 В·А; 1549 Вт;  $-1162$  вар (знак минус означает, что преобладает емкостное сопротивление). **19.54.** При уменьшении емкости сопротивление  $X_C$  увеличивается, полное сопротивление уменьшается и накал лампы увеличивается, достигая максимума при резонансе напряжений; при дальнейшем уменьшении емкости, сопротивление цепи возрастает, а накал лампы уменьшается. **19.55.** На нагревание;  $\pi/2$ . **19.56.** Перегорит обмотка трансформатора; у трансформатора нет потерь на трение. **19.57.** 0,04; 2250. **19.58.** 880; 144; 6,11. **19.59.** 246. *Указание.*  $\Delta\Phi_2 = 0,962\Delta\Phi_1$ . **19.60.** Вторичная. При  $k > 1$  (трансформатор понижающий)  $I_2 > I_1$ , и для уменьшения тепловых потерь при большей силе тока  $I_2$  следует уменьшить сопротивление обмотки, что и достигается увеличением сечения проводов. **19.61.** Накал увеличится. Увеличится мощность  $P_2$ , потребляемая вторичной обмоткой, и, следовательно, мощность  $P_1$ , потребляемая первичной обмоткой, что при неизменном напряжении  $U_1$  связано с увеличением  $I_1$ , а возрастание  $I_1$  вызовет увеличение накала лампы. **19.62.** 90% **19.63.** 44. **19.64.** 0,120 м; 7,6 А. **19.65.** 110 В; 40 А; 98%. **19.66.** 38 В; 132; 1,0 А; 95%. **19.67.** 200 В. **19.68.** 150 В. **19.69.**  $\eta = k^2 P_2 / [I_2(kU - I^2 R_a)] = 98\%$ . **19.70.** Увеличить в  $\sqrt{n}$  раз.



К ответу 19.52

## § 20. Электромагнитные колебания и волны

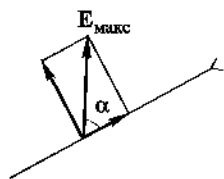
**20.1.** Индуктивность обеспечивает создание магнитного поля, а емкость — электрического, в процессе возникновения колебаний между индуктивностью и емкостью происходит непрерывный обмен энергией. **20.2.** Активное сопротивление приводит к уменьшению амплитуды, затуханию колебаний



К ответу 20.6

в контуре и увеличению периода свободных колебаний. **20.3.** Энергия электромагнитных колебаний в контуре расходуется на нагревание и излучение электромагнитных волн. Пополнять потери энергии за счет внешнего источника энергии. **20.4.** Изменяя емкость контура с помощью конденсатора переменной емкости или индуктивность с помощью ферромагнитного сердечника. **20.5.** Присоединить к контуру антенну и увеличить частоту колебаний. **20.6.** См. рисунок, векторы  $\mathbf{E}$  и  $\mathbf{B}$  всегда взаимно перпендикулярны, на рисунке *а* индукция возрастает, на рисунке *б* убывает.

**20.7.** Нет, только при неравномерном изменении магнитного поля. **20.8.** Нет; только в бегущих электромагнитных волнах. **20.9.** Нет; стоячие электромагнитные волны энергию не переносят. **20.10.** Электрическая составляющая  $E$  изменяется по вертикали параллельно антенне передающей станции; магнитная составляющая — перпендикулярно вектору  $E$ . Проволочную или стержневую антенну следует расположить вертикально, параллельно антенне передающей станции; рамочную антенну — в плоскости антенны передающей станции.



К ответу 20.12

**20.11.** 0,12 мВ; 200 кГц;  $1,5 \cdot 10^3$  м. **20.12.**  $\Delta \mathcal{E} = \mathcal{E}_{\text{макс}} - \mathcal{E}_{\text{макс}} \cos \alpha = 60$  мкВ. Не изменится (см. рисунок). **20.13.** За счет энергии электромагнитных волн, излучаемых передающими радиостанциями; при работе одной передающей станции равна ее частоте. Вынужденными колебаниями.

**20.14.** Период возрастет, а частота уменьшится в два раза. **20.15.** 281 мкс; 5,6 кГц; частота увеличится в два раза. **20.16.** 2,8 кГц; период возрастет в два раза. **20.17.** 4 мкс. **20.18.** 650 мкГц;  $\pi/2$ . **20.19.** 3,66 МГц.

**20.20.**  $i = Q'_t = -\pi \sin(10^4 \pi t)$ ;  $W_{\text{эл макс}} = W_{\text{маг макс}} = 50$  Дж; 10 Гн. **20.21.**  $\nu = \frac{I_{\text{макс}}}{2\pi C U_{\text{макс}}}$ . **20.22.**  $10^{-2}$  Дж;  $6,32 \cdot 10^{-4}$  Кл; 4,47 А;  $i = 4,47 \sin(7,07 \cdot 10^3 t)$ . **20.23.**  $I = \frac{U_{\text{макс}}}{2} \sqrt{\frac{3C}{L}}$ . **20.24.** 10 В. **20.25.** 47 мДж. **20.26.** 18,5 кГц. Ука-

зание. Воспользоваться формулой  $\nu = \frac{1}{2\pi} \sqrt{\frac{1}{LC} - \left(\frac{R}{2L}\right)^2}$ . **20.27.** 0,247 мс.

**20.28.** При настройке контура в резонанс с электромагнитными колебаниями в антенне, в электромагнитной волне. **20.29.** 6,1 МГц; к коротким.

**20.30.** 11,34 м. Частота не изменится, а длина волны увеличится в 2,65 раз. **20.31.** 42 м. **20.32.** 5,8 мкГц. **20.33.** 1,76–7,04 нФ. **20.34.** 10–100 м.

**20.35.** 486 м. **20.36.**  $\lambda = \nu \cdot 2\pi L \frac{I_{\text{макс}}}{U_{\text{макс}}}$ . **20.37.**  $\lambda = 2\pi \nu \frac{Q_{\text{макс}}}{I_{\text{макс}}}$ . **20.38.** 8,8 км.

**20.39.** На большие расстояния могут распространяться только короткие волны, отражающиеся от ионосферы; длинные волны, распространяющиеся вдоль поверхности Земли, быстро затухают, для них требуются мощные передатчики. Поэтому колебания низкой частоты накладываются на колебания высокой частоты (производится модуляция), которые доносят колебания низкой частоты до приемника. **20.40.** За счет источника электрической энергии. **20.41.** В 16 раз; в 36 раз. **20.42.** 120 км. **20.43.**  $500 \text{ с}^{-1}$ ; 30 м. **20.44.**  $10^3 \text{ с}^{-1}$ ; 0,4 мкс; 600. **20.45.** 12 км/с. **20.46.** 60 км/ч; уменьшилась бы на 83,3 Гп.

## § 21. Скорость света. Природа света

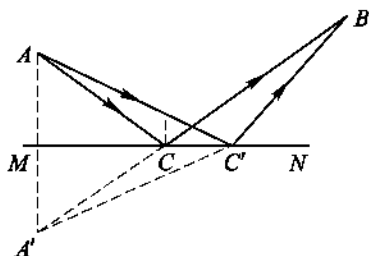
**21.1.** Нет, только колебания с частотами от  $4,0 \cdot 10^{14}$  до  $7,5 \cdot 10^{14}$  Гц. **21.2.** От  $7,5 \cdot 10^{-7}$  до  $4,0 \cdot 10^{-7}$ . **21.3.**  $5,4 \cdot 10^{14}$  Гц. **21.4.** Магнитная проницаемость указанных сред мало отличается от единицы. **21.5.** Наличие фотонов с энергией, определяемой формулой  $\epsilon = h\nu$ , где  $h$  — постоянный коэффици-



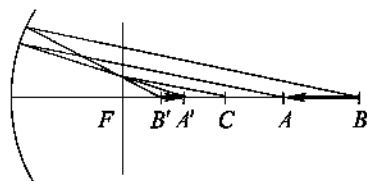
еит для квантов любых энергий — постоянная Планка. **21.6.** Максимальной энергией обладают фотоны фиолетового излучения ( $5,0 \cdot 10^{-19}$  Дж), минимальной — фотоны красного излучения ( $2,6 \cdot 10^{-19}$  Дж). **21.7.** Энергия кванта обратно пропорциональна длине волны излучения. **21.8.** Энергия фотона не изменяется, поскольку частота колебаний не зависит от среды. **21.9.** В 10 раз. **21.10.**  $2,8 \cdot 10^{19}$ . **21.11.** Нет. **21.12.** Сферическая поверхность радиусом  $R = ct$ . **21.13.** В случае, если среда будет изотропной. **21.14.** Линия, вдоль которой распространяется поток энергии, испущенной источником; нет. **21.15.**  $3 \cdot 10^5$  км/с. **21.16.** 300 415 км/с. **21.17.** 8 мин 16 с. **21.18.** Оптическая плотность среды  $n$  показывает, во сколько раз скорость света в данной среде меньше, чем в вакууме. **21.19.** От свойств среды, частоты электромагнитных колебаний и внешних условий (температуры). **21.20.** 1,5. **21.21.** 1,33; вода. **21.22.** 1,25;  $2,4 \cdot 10^8$  м/с;  $5,5 \cdot 10^{14}$  Гц.

## § 22. Отражение света. Плоские и сферические зеркала

**22.1.** При условии, что на плоское зеркало будет направлен пучок сходящихся лучей. **22.2.** На  $2\alpha$ . **22.3.**  $15^\circ$ . **22.4.**  $70^\circ$ . **22.5.** См. рисунок. **22.6.**  $2\alpha$ . **22.7.** Зеркала образуют двугранный прямой угол, а лучи, падающие на зеркала и отраженные от них, лежат в плоскости, перпендикулярной ребру двугранного угла. **22.8.**  $120^\circ$ . **22.9.** 3, 5, 7. **22.10.** Множество; равным расстоянию между зеркалами. **22.11.** 0,9 м. **22.12.** Зеркало не переворачивает изображение; из-за симметрии изображение кажется перевернутым справа налево так, как если бы предмет был повернут на  $180^\circ$ . **22.13.**  $\beta = 2\alpha$ ; нет. **22.14.**  $64^\circ$ . **22.15.** С увеличением угла падения возрастает. **22.16.** Известно, что коэффициент отражения зависит от угла падения лучей (см. задачу 22.15). От участка поверхности воды под самолетом лучи отражаются под малыми углами — коэффициент отражения уменьшается.



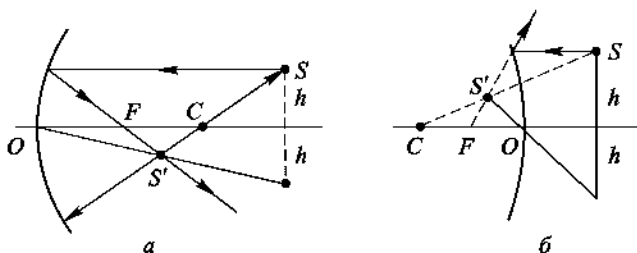
К ответу 22.5



К ответу 22.25

**22.17.** Действительное, на расстоянии 14,4 см от полюса; 6 см. **22.18.** 18 см; 12 см; 24 см; 8,3 дптр. **22.19.** Мнимое, увеличенное, прямое; -6 см; 15 см; -1,5. **22.20.** 60 см; действительное, обратное и увеличенное; 18 см; 3. Приблизительно на 12,5 см к зеркалу. **22.21.** 75 см; 60 см. **22.22.** На расстоянии  $3f$ ; 2. **22.23.** 20, 25 и 100 см. **22.24.** 10 см. **22.25.** См. рисунок; 13,3 см. **22.26.**  $\Phi = \sqrt{h_1 h_2} = 10$  дптр. **22.27.** 36 см. **22.28.** 75 см; мнимое. **22.29.** См. рисунок. *Указание.* При построении использовать закон отра-

жения света и лучи, параллельные главной оптической оси. Точка  $S$  находится в интервале  $2f < a < \infty$ , точка  $S'$  — в интервале  $f < a' < 2f$ , так как изображение действительное, обратное и расположено ближе к главной оптической оси, т. е. уменьшенное. **22.30.** 50 и  $-10$  см. **22.31.**  $R/6$ ,  $R/2$ . **22.32.**  $-0,6$  м,



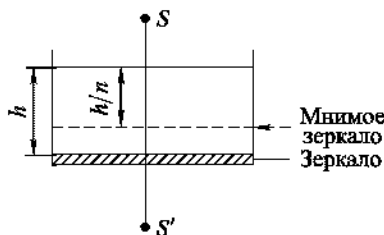
К ответу 22.29

точка  $S$  является мнимым источником. **22.33.** 7,5 см;  $-1/4$ ; приближается к зеркалу, возрастает. **22.34.** Мнимое, прямое, уменьшенное в 2 раза;  $-20$ , 80 и 20 см. **22.35.** 24 см. **22.36.** 80 и  $-16$  см. **22.37.**  $(6/7)R$ . **22.38.** Увеличивают угол обзора. Создается ошибочное представление о расстоянии до транспорта идущего позади, т. е. кажущееся расстояние больше действительного.

## § 23. Преломление света. Линзы.

### Угол зрения и оптические приборы

**23.1.** При одинаковой оптической плотности сред, при одинаковой скорости света в них, при угле падения, равном нулю. **23.2.** Нет. **23.3.** Для первого. **23.4.** 1,31;  $229 \cdot 10^3$  км/с. **23.5.**  $34^\circ$ . **23.6.** Для случая а:  $n_2 > n_1$ ,  $v_2 < v_1$ , для случая б:  $n_2 < n_1$ ,  $v_2 > v_1$ . **23.7.** 1,48; вторая; увеличится на  $4^\circ 33'$ . **23.8.** 1,57;  $1,24 \cdot 10^5$  км/с. **23.9.**  $52^\circ 53'$ . **23.10.** 1,157; 1,16; 1,54;  $1,95 \times 10^8$  м/с. **23.11.** На  $11^\circ$ . **23.12.**  $53^\circ$ . **23.13.**  $25^\circ$ . **23.14.** Человек видит в

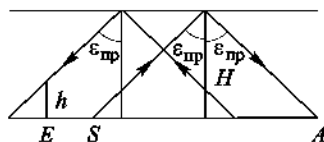


К ответу 23.20

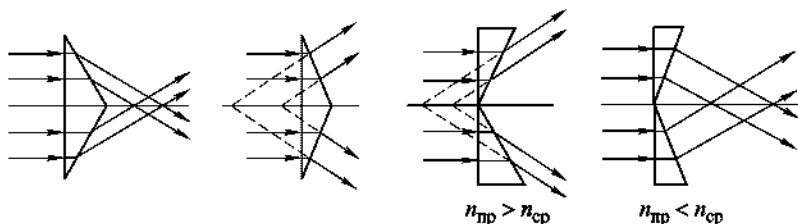
воде мнимое изображение, смещенное к поверхности воды. **23.15.** Уменьшится на 30,7 см. **23.16.**  $40^\circ$ ; 3,05 м. **23.17.** См. пример 84; уменьшается. **23.18.** 0,467 м. **23.19.** 3,2 м; мнимое. **23.20.** 58 см. Указание. См. рисунок: изображение симметрично относительно мнимого зеркала, расположенного на кажущемся дне сосуда на расстоянии  $h/n$  от поверхности воды. **23.21.** 2 м; см. рисунок к ответу 2.20.

**23.22.** 30 см. Указание. Изображение и источник света симметричны относительно мнимого дна, расположенного на расстоянии  $h_1/n_1 + h_2/n_2 = 8$  см от поверхности жидкости. **23.23.** При падении светового излучения на границу

среды с меньшей оптической плотностью под углом, равным или большим предельного. Энергия излучения возвращается в первую среду. **23.24.** В обоих примерах из-за полного отражения лучей; нет. **23.25.** Происходит полное отражение. **23.26.** В меньшем затухании сигнала, связанном с переходом энергии излучения во внутреннюю энергию, и во много раз большем объеме информации, которую можно передать по световоду по сравнению с проводником такого же диаметра; не влияют электромагнитные помехи. **23.27.**  $48^\circ 45'$ ;  $37^\circ 51'$ . **23.28.**  $41^\circ 49'$ . **23.29.** Нет, произойдет полное отражение. **23.30.** При  $\epsilon_1 \geq \arcsin(v/c)$ . **23.31.** Нет; свет не выйдет в первую среду. **23.32.**  $2,26 \cdot 10^8$  м/с; 1,6; 1,33; 0,83. **23.33.** 10 м. **23.34.** 10 м; 21 м; см. рисунок. **23.35.** 2,72 см;  $60^\circ$ . **23.36.**  $50^\circ$ ; на 3,9 см; 1,5. **23.37.**  $45^\circ$ ;  $32^\circ$ . **23.38.** Нет, только если  $n$  призмы больше  $n$  среды. **23.39.** См. рисунок. **23.40.**  $40^\circ 50'$ ; на  $30^\circ 50'$ . **23.41.**  $27^\circ 54'$ ; на  $57^\circ 54'$ .

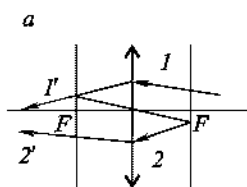


К ответу 23.34

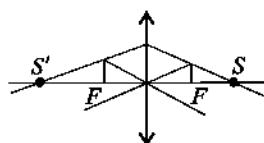
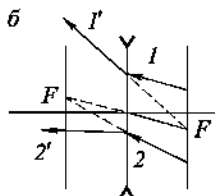


К ответу 23.39

**23.42.** 1,51. **23.43.**  $27^\circ 30'$ ; на  $12^\circ 30'$ . **23.44.** На  $1,92^\circ$ . **23.45.** 10 и 2,5 дптр;  $-8,0$  и  $-2,0$  дптр. **23.46.** 0,50; 0,10;  $-0,20$  и  $-0,125$  м. **23.47.** На оптической оси в 10 см за линзой; лучи пойдут расходящимся пучком, а их продолжения пересекутся в мнимом фокусе на расстоянии 10 см перед линзой. **23.48.** 30 см; 7,5 см. **23.49.** 4,2 дптр; 24 см. **23.50.** 1 дптр; 0,5 м; 1 м. **23.51.** Выпукловогнутая рассеивающая; изображение мнимое;  $-0,25$  м. **23.52.** 1,28 и  $-0,8$  дптр. **23.53.** 2,56 дптр; 0,39 м. **23.54.** Да, если материал линзы имеет меньшую оптическую плотность, чем у окружающей среды. **23.55.** См. рисунок. **23.56.** См. рисунок. **23.57.** См. рисунок; а,

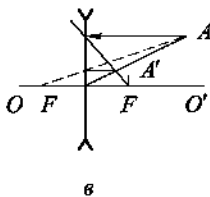
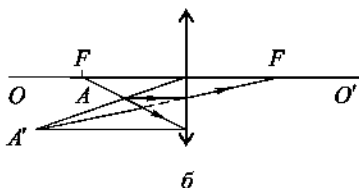
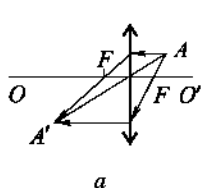


К ответу 23.55



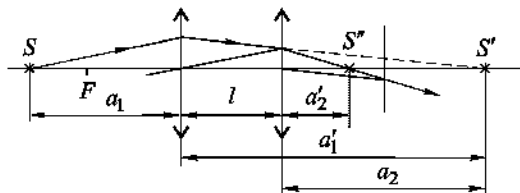
К ответу 23.56

$b$  — собирающие,  $a$  — рассеивающая. **23.58.** 60 см; действительное, увеличенное; 20 см; 2; 5,0 дптр. **23.59.** 60 см; действительное; 5 дптр. **23.60.** 30 см;



К ответу 23.57

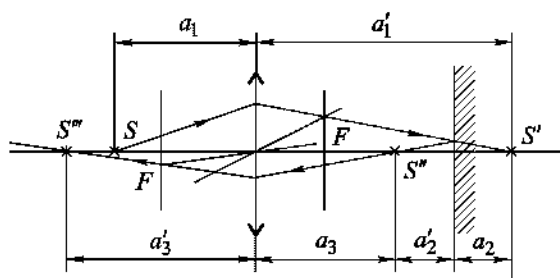
3,3 дптр. **23.61.** 0,8 м. **23.62.** При удалении линзы на 80 см от свечи; в 16 раз. **23.63.** 4 м. **23.64.** 60 см; 1,2 м; 2; 0,5. **23.65.** 6,0 см; 3/2; 2/3. **23.66.** 2,0 дптр; 0,50 м; 0,55 м. **23.67.**  $1,236 \times 1,854$  м. **23.68.** 4,7 см. **23.69.** 1,2 м. **23.70.** 0,09 м/с; вдоль главной оптической оси от линзы (предмет и его изображение перемещаются в одном направлении). **23.71.** 867 м/с. **23.72.** Мнимое изображение; -12 и 8 см. **23.73.** Рассеивающая; -8,0 см; 8 см. **23.74.** Рассеивающая; -5 дптр; -20 см. **23.75.** Да, если направить сходящийся пучок лучей на линзу так, чтобы точка пересечения их находилась за линзой ближе главного фокуса. **23.76.** -60 см. **23.77.** 2 м. **23.78.** 3,0 дптр. **23.79.** 3 дптр; увеличится на 4 дптр. *Указание.* Оптическая сила системы определяется по формуле  $\Phi_c = \Phi_1 + \Phi_2 - \Phi_1 \Phi_2 l$ , где  $l$  — расстояние между линзами. **23.80.** 1,4 см. **23.81.** -1 дптр. **23.82.** 2 дптр. **23.83.** 4 дптр. **23.84.** На расстоянии 60 см справа от собирающей линзы; 1,5. **23.85.** См. рисунок; изображение действительное на расстоянии 3,2 см от



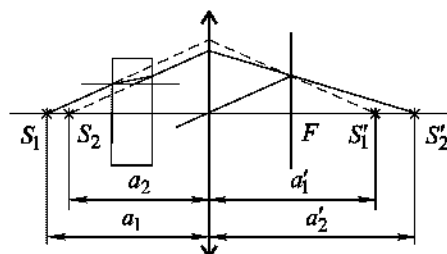
К ответу 23.85

второй линзы; 0,8. **23.86.** Действительное; в 4 раза увеличенное изображение на расстоянии 20 см справа от рассеивающей линзы; 20 см. **23.87.** См. рисунок; изображение действительное; слева от линзы на расстоянии 40 см. **23.88.** На 9 см; см. рисунок. **23.89.**  $\Phi_I = 2(n-1)(1/R_1 + 1/R_2) + 2/R_1$ ;  $\Phi_{II} = 2(n-1)(1/R_2 - 1/R_1) - 2/R_1$ ;  $\Phi_{III} = 2(n-1) \cdot 1/R_2$ ;  $\Phi_{IV} = -2(n-1)(1/R_1 + 1/R_2) - 2/R_1$ ;  $\Phi_V = 2(n-1)(1/R_2 - 1/R_1) - 2/R_1$ ;  $\Phi_{VI} = -2(n-1) \cdot 1/R_2$ . **23.90.** Действительное, 60 см, мнимое, -12 см. **23.91.** 0,3 м. **23.92.** Если угол зрения будет меньше  $1'$ . **23.93.** Около 72 м. **23.94.** Оценку расстояний до тел близких и далеких или их размеров человек

основывает на мускульных усилиях, создаваемых при аккомодации глаз. При сведении зрительных осей глаз под большим углом зрения мускульное напряжение значительно больше, при рассматривании далеких тел зрительные оси



К ответу 23.87



К ответу 23.88

располагаются параллельно и человек при этом без напряжения воспринимает тела одинаково. **23.95.** 4; уменьшится. **23.96.** Существует предел аккомодации глаза. **23.97.** 5 см; 20 дптр. **23.98.** 7. **23.99.** 66,7. **23.100.** 500. **23.101.** 180; 11 см. **23.102.** 1,67 см; 15; 16 см. **23.103.** Дифракцией. **23.104.** 60. **23.105.**  $f_{ок} = 0,060$  м,  $f_{об} = 14,9$  м. **23.106.** На 2 мм ближе к объективу. **23.107.**  $4^{\circ}41'$ .

## § 24. Фотометрия

**24.1.** 0,50 ср. **24.2.** 0,60 м. **24.3.**  $810 \text{ см}^2$ ; 0,40 ср. **24.4.** 120 кд. **24.5.** 80 кд;  $10^3$  лм. **24.6.** 1,7 лм;  $2,8 \cdot 10^{-2}$  ср; 754 лм. **24.7.** 100 кд; 25 лм;  $0,09 \text{ м}^2$ . **24.8.** 2 лм; 63 лк. **24.9.** 5 лк. **24.10.** 225 лм; 18 кд. **24.11.** 9,5 лм/Вт; 42 лм/Вт; люминесцентная, приблизительно в 4 раза. **24.12.** 180 лк. **24.13.**  $6 \cdot 10^5$  кд/м<sup>2</sup>. **24.14.** 1 кд. **24.15.**  $E_1/E_2 = 4$ . **24.16.** 55 лк; увеличится в 1,25 раза. **24.17.**  $h_2 = 0,75 h_1$ . **24.18.** 35 лк. **24.19.** 35 лк. **24.20.** 15 лк. **24.21.** 107 кд; 269 лм; 100 Вт. **24.22.**  $1,9 \cdot 10^4$  лк. **24.23.** Вертикально, приблизительно в 2 раза. **24.24.** В 7 раз. **24.25.** 10 м. **24.26.** В 1,34 раза. **24.27.** Увеличится на  $1/3$  лк. **24.28.** 2,7 м. **24.29.** Уменьшить на 1,6 с.

**24.30.** 16 лк. **24.31.**  $E_1/E_2 = 1,44$ . **24.32.** На расстоянии 0,8 м от лампы с большей силой света. **24.33.** 33 кд. **24.34.** 390 лк. **24.35.** С ближнего расстояния.

## § 25. Явления, объясняемые волновыми свойствами света

**25.1.** Да, если разделить с помощью отражений или преломлений волну, идущую от одного источника, на две части подобно тому, как это делается с помощью зеркал и бипризм Френеля. **25.2.** Светлая полоса, цвет которой определяется частотой. **25.3.**  $\pi$ . **25.4.**  $\lambda/4$ . **25.5.** 3,2 мм. **25.6.** Нет, в процессе наложения волн происходит перераспределение энергии. **25.7.** 0,6; 0,48 и 0,4 мкм; 0,68, 0,53 и 0,44 мкм. **25.8.** Желтые и темные полосы поменяются местами. **25.9.** 1,1 мкм; в 1,8 раза. **25.10.** 0,6 мкм. **25.11.** 0,36 мм. **25.12.** 14,4 мм. **25.13.** Интерференцией; при отражении волн видимого излучения от верхней и нижней границ пленки создается разность фаз, зависящая от длины волны и толщины пленки. **25.14.** Уменьшение коэффициента отражения поверхностью различных оптических устройств путем нанесения на них непоглощающих пленок, толщина которых соизмерима с длиной волны излучения, а показатель преломления несколько меньше. На явлении интерференции. Усиление интенсивности проходящего света. **25.15.** 0,12 мкм; 0,24 мкм. **25.16.** Черной, пленка будет то черной, то желтой. **25.17.** Явление интерференции; пучки вновь падают на зеркало  $NN$ , после чего доходят до экрана  $P$ ; интерференционную картину. **25.18.** Изменится разность хода, при этом сместятся интерференционные полосы на экране; используется в метрологии для измерения показателя преломления прозрачных сред, для измерения длин волн в оптическом и радиодиапазоне, в технике. **25.19.** Позволяет определять угловые расстояния между компонентами двойных звезд. Майкельсон впервые определил угловой диаметр звезды Бетельгейзе (красного гиганта) — он оказался равным  $0,047''$ . После определения расстояния до звезды был вычислен ее линейный диаметр, оказавшийся равным примерно  $4 \cdot 10^8$  км, что больше диаметра земной орбиты ( $3 \cdot 10^8$  км). **25.20.**  $1,8 \cdot 10^{-5}$  рад. **25.21.** 8,1 мм. **25.22.** 60 мкм. **25.23.** 9,8 полос/см. **25.24.** При вертикальном расположении пленки ее толщина увеличивается книзу — туда же перемещаются интерференционные полосы, в верхней части пленка чернеет после того, как ее толщина окажется меньше  $\lambda/4$  самых коротких длин волн видимого излучения. **25.25.** 0,46 мм. **25.26.** 0,56 мм; 0,58 мм. **25.27.** 4 мм. **25.28.** 0,589 мкм. **25.29.** Светлое; 4,6 мм. **25.30.** 2,44 и 3,5 м. **25.31.** При уменьшении размеров отверстия до тех пор, пока оно остается во много раз больше длины световой волны, четкому изображению способствует ослабление сферической аберрации; когда размеры отверстия и длина волны становятся соизмеримыми, проявляется дифракция. **25.32 \***.  $2 \cdot 10^{-3}$  мм. **25.33.**  $54^\circ 40'$ . **25.34.** 0,589 мкм.

\*) Во всех задачах о преломлении света на дифракционной решетке следует считать, что свет падает перпендикулярно к поверхности решетки.

**25.35.** 0,447 мкм. **25.36.** 7,4 см; 14,8 см. **25.37.** 10 мкм. **25.38.** Четвертый; 0,50 мкм. **25.39.** Способ записи и последующего восстановления волн видимого излучения; на явлении интерференции; интерференционная картина образуется сферической волной, отраженной предметом (предметной волной) и когерентной с ней плоской волной, идущей непосредственно от источника света (опорной волной). Основы голографии были заложены в 1948 г. физиком Д. Габором (Великобритания). **25.40.** Голограмма создает полную иллюзию реальности наблюдаемых объектов, их объемности и изменения ракурса при изменении точки наблюдения; используется для исследования движущихся частиц, например, в пузырьковых и искровых камерах; в перспективе голография позволит перейти к созданию голографического кино и телевидения; может применяться для хранения и обработки информации; интересны также акустическая голография и радиоголография, способствующие визуализации акустических полей и полей в радиодиапазоне. **25.41.** 53°. **25.42.** 55°7'. **25.43.** 1,59; анилин.

## § 26. Излучение и спектры. Рентгеновское излучение

**26.1.** От свойств среды и длины световой волны. **26.2.** В уменьшении показателя преломления с увеличением длины световой волны. **26.3.** Дифракционные спектры в отличие от дисперсионных пропорциональные, т.е. их ширина зависит от порядка спектра и с его увеличением ширина спектра возрастает; в дисперсионных спектрах наиболее растянута коротковолновая часть; в дифракционных на большие углы отклоняются волны большей длины; в дисперсионных — наоборот. **26.4.** При красном ближе. *Указание.* Красные лучи преломляются слабее. Для получения изображения на сетчатке глаза увеличивается оптическая сила хрусталика и расстояние до предмета кажется меньшим. **26.5.** В дисперсионном спектре максимально отклоняются фиолетовые лучи, минимально — красные; наиболее растянута коротковолновая часть. В дифракционном спектре участки спектра, имеющие одинаковые интервалы длин волн, имеют одинаковую ширину; ширина спектра пропорциональна его порядковому номеру. **26.6.** 579 нм;  $2,26 \cdot 10^8$  м/с; нет. **26.7.** Цвет прозрачного тела определяется составом света, проходящего через него; цвет непрозрачного тела определяется смесью тех цветов, которые оно отражает. **26.8.** Лампы дневного света. **26.9.** Яркостью и цветом, от задней грани красное менее яркое. **26.10.** Для прозрачного от проходящего света, для непрозрачного от смеси отраженных цветных лучей. Цвета, при наложении которых возникает белый цвет. **26.11.** Нет. **26.12.** Ярко-красного (пурпурного), зеленого и синего. От соотношения интенсивности цветов. **26.13.** В высокой чувствительности, скорости исследования, возможности анализа недоступных объектов. **26.14.** Химический состав — по спектру; температуру поверхности — по длине волны, соответствующей максимальной яркости; продольную составляющую скорости — по эффекту Доплера. **26.15.** Поглощением в атмосфере Солнца. **26.16.** Ультрафиолетовое излучение — с помощью

люминесценции и фотохимического действия, инфракрасное — с помощью термоэлементов; 5–400 нм; 760 нм–350 мкм. **26.17.** Ультрафиолетовые; да. **26.18.** Толщина атмосферы, поглощающей ультрафиолетовое излучение, на экваторе и в горах меньше. **26.19.** Углекислый газ поглощает инфракрасное излучение Земли, что и вызывает парниковый эффект. **26.20.** Озонный слой поглощает коротковолновую, наиболее опасную для жизни часть ультрафиолетового излучения. **26.21.** Луч света, попавший внутрь шара, после многократного отражения от стенок практически полностью поглощается; такое тело служит моделью черного тела. **26.22.** Главным образом превращается в теплоту, повышая температуру тела; кроме того, может вызывать фотоэффект, фотолюминесценцию, фотохимические превращения. **26.23.** От частоты и температуры теплового излучения, а также от материала тела и состояния его поверхности. **26.24.** 10,6 мкм; в области инфракрасного излучения. **26.25.** 5,9 кВт. *Указание.*  $p = \sigma S(b/\lambda)^4$ . **26.26.** 9,37 мкм; в сторону коротких волн. **26.27.** 200 К;  $1,45 \cdot 10^{-5}$  м. **26.28.** Земля получает энергии меньше, чем Юпитер, в 4,6 раза. **26.29.** 1,98 мкПа. **26.30.** Тормозное рентгеновское излучение возникает при торможении быстрых электронов при ударе об анод; имеет непрерывный спектр; не зависит от материала анода. Характеристическое излучение возникает при выбивании электронов из внутренних слоев, близких к ядру, и перемещении на их места электронов с удаленных слоев, имеет линейчатый спектр, зависящий от материала анода. **26.31.**  $2,48 \cdot 10^{-11}$  м. *Указание.*  $\lambda_{\min} = hc/(eU)$ . **26.32.** Не зависит, с увеличением напряжения возрастает. **26.33.**  $9,6 \cdot 10^5$  К. **26.34.** 2,42 пм. **26.35.** Возникнет тормозное рентгеновское излучение. **26.36.** Большая проникающая способность; ее зависимость от энергии фотонов, от среды, биологическое действие.

## § 27. Явления, объясняемые квантовыми свойствами электромагнитного излучения

**27.1.** В  $4,85 \cdot 10^{-4}$  раз. **27.2.**  $3 \cdot 10^{14}$  Гц; такой частотой обладает инфракрасное излучение, что справедливо, так как примерно 95% всего излучения лампы приходится на долю инфракрасного излучения. **27.3.** 50. **27.4.**  $6,83 \times 10^3$  лм. *Указание.*  $\Phi = Nhck/(\lambda t)$ , где для света с  $\lambda = 555$  нм  $k = 683$  лм/Вт. **27.5.** Электромагнитная волна своим электрическим полем вызывает смещение заряженных частиц, а возникающая при этом сила Лоренца (обусловленная магнитной составляющей) действует в направлении распространения электромагнитной волны, что и приводит к световому давлению. Квантовая теория объясняет световое давление ударами фотонов. **27.6.** Звезда устойчива, если световое давление уравновешивается действием сил тяготения, при нарушении равновесия звезда либо взрывается ( $p_{\text{св}} > p_{\text{тяг}}$ ), либо сжимается ( $p_{\text{св}} < p_{\text{тяг}}$ ). **27.7.** В 16 раз. **27.8.** Световое давление отбрасывает частицы, образующие хвост, в направлении от Солнца. **27.9.**  $4,0 \cdot 10^{-6}$ ;  $2,0 \times 10^{-6}$  и  $3,2 \cdot 10^{-6}$  Па. *Указание.*  $p = Nh(1 + \rho)/(\lambda St)$ . **27.10.**  $7,66 \cdot 10^{21}$ ;

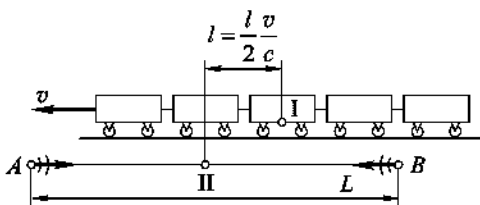


$9,14 \cdot 10^{-6}$  и  $8,23 \cdot 10^{-6}$  Па. **27.11.**  $1,86 \cdot 10^9$  Н. **27.12.**  $1,1 \cdot 10^{-7}$  м; сила светового давления. **27.13.** В переходе атомов и молекул в химически активное состояние. Примеры фотохимического действия света — образование углеводов в зеленых частях растений, выпетание красок, реакции в сетчатке глаза. **27.14.** На отрыв электрона от атома, на неупругие соударения внутри вещества, на преодоление потенциального барьера на поверхности вещества. **27.15.** В полупроводниках оторванные излучением электроны остаются в веществе, увеличивая его электропроводность, — возникает внутренний фотоэффект, в металлах выбитые электроны вылетают за пределы металла — возникает внешний фотоэффект. Да, при достаточно большой энергии фотонов. **27.16.** Фотоны выбивают из пластинки электроны, она разряжается, при дальнейшем выбивании электронов пластинка заряжается положительно — стрелка отклоняется. **27.17.**  $5,6 \cdot 10^{-7}$  м. **27.18.** При  $1,04 \times 10^{15}$  Гц. **27.19.** 2,38 В. **27.20.** Да; для бария. **27.21.** Да; нет. **27.22.**  $4,78 \times 10^{-19}$  Дж. **27.23.**  $7,27 \cdot 10^{-19}$  Дж;  $2,74 \cdot 10^{-7}$  м. **27.24.**  $6,61 \cdot 10^{-34}$  Дж·с. **27.25.**  $1,03 \cdot 10^6$  м/с; 3 В. **27.26.**  $4,87 \cdot 10^{-7}$  м. **27.27.** 1,81 В. **27.28.** 4,28 В. **27.29.**  $5,91 \cdot 10^{-11}$  Кл. **27.30.** Да, если электрон получит энергию от нескольких фотонов при  $Nh\nu \geq A_{\text{вых}}$  ( $N$  — число фотонов), что возможно при лазерном излучении. **27.31.**  $\lambda = \lambda_0 + \lambda_c$ , где  $\lambda_c = 2,43 \cdot 10^{-12}$  м — комптоновская длина волны электрона. **27.32.**  $\Delta\lambda = 0$ ; нет, нет. **27.33.** Для свободного электрона  $h\nu = h\nu' + m_e v^2/2$ ,  $p_\phi = p'_\phi + m_e v$ ; для связанного электрона  $h\nu = A + h\nu' + m_e v^2/2$ ,  $p_\phi = p'_\phi + m_e v$ . **27.34.** Нет, это величина постоянная, равная  $\lambda_c = \frac{h}{m_0 c} = 2,43 \cdot 10^{-12}$  м. **27.35.** В рассеянии фотонов, в изменении длины волны, в появлении волны с длиной  $\lambda_{\text{ст}}$ , не зависящей от длины волны фотона рентгеновского излучения; в получении электроном энергии и импульса. **27.36.**  $8,32 \cdot 10^{-11}$  м. **27.37.**  $7,28 \cdot 10^{-11}$  м; при  $5,45 \cdot 10^3$  м/с. **27.38.**  $2,65 \cdot 10^{-38}$  м. Очень мала длина волны де Бройля, связанная с телами. **27.39.** Длина волны, связанная с движущимся с большой скоростью электроном, значительно меньше длины волны видимого излучения.

## § 28. Основы специальной теории относительности

**28.1.** Тело отсчета, относительно которого определяются положение и движение других тел; связанная с ним система координат; заданный способ измерения времени. **28.2.** В инерциальных системах отсчета все явления природы протекают одинаково — в них выполняются законы Ньютона; в неинерциальных системах эти законы не выполняются. **28.3.** Да, если не учитывать вращение Земли. **28.4.** В 1636 г. Законы механики во всех инерциальных системах являются инвариантными, т. е. не изменяются при переходе от одной системы отсчета к другой; отсюда вытекает, что не существует механических опытов, позволяющих определить, покоится данная система или движется равномерно и прямолинейно. **28.5.**  $A = mg\Delta h$  — работа останется такой же в равномерно движущемся лифте, так как обе системы являются инерциаль-

ными. **28.6.**  $x'_1 = 200$  м,  $y'_1 = 5$  м,  $z'_1 = 15$  м;  $x'_2 = 100$  м,  $y'_2 = 5$  м,  $z'_2 = 15$  м;  $x'_3 = -100$  м,  $y'_3 = 5$  м,  $z'_3 = 15$  м. *Указание.*  $x' = x - v_x t$ ,  $y' = y$ ,  $z' = z$ . **28.7.**  $x_1 = 300$  м,  $y_1 = 0$ ,  $z_1 = 0$ ;  $x_2 = 0$ ,  $y_2 = 0$ ,  $z_2 = 0$ ;  $x_3 = -100$  м,  $y_3 = 20$  м,  $z_3 = 15$  м. *Указание.*  $x = x' + vt$ ,  $y = y'$ ,  $z = z'$ . **28.8.**  $v = v_x = 5,0$  м/с. **28.9.**  $v' = v + u$ ;  $v' = v_1 + v_2 = 50$  м/с;  $v' = v_1 - v_2 = 10$  м/с. **28.10.**  $5,0$  м/с. **28.11.**  $v = \sqrt{v_1^2 + v_2^2 + 2v_1v_2 \cos \alpha} \approx 5,82$  м/с. **28.12.** Да; нет. **28.13.** 1)  $x' = 0$ ,  $y' = 0$ ,  $z' = 0$ ,  $t' = 0$ ; 2)  $x' \approx 10^8$  м,  $y' = 0$ ,  $z' = 0$ ,  $t' \approx 0,33$  с; 3)  $x' \approx -1,2 \cdot 10^8$  м,  $y' = 0$ ,  $z' = 0$ ,  $t' \approx 7,0$  с. **28.14.**  $x = 1,8 \cdot 10^4$  м,  $y = 2,0 \times 10^2$  м,  $z = 15$  м,  $t = 6,0 \cdot 10^{-5}$  с. **28.15.** Нет; для наблюдателя II в точку A молния попала раньше; для наблюдателя III молния попала раньше в точку B; для наблюдателей, равноудаленных от A и B. **28.16.** Нет; так как поезд движется к точке A, то свет от фонаря A до встречи с движущимся наблюдателем I пройдет меньшее расстояние, чем свет от фонаря B; следовательно, для движущегося наблюдателя раньше загорится фонарь A. **28.17.** Фонарь B; фонарь B; фонарь A. Наблюдатель I должен находиться в точке N на таком расстоянии от середины перрона, чтобы к моменту прихода света от A и B к середине перрона он был напротив нее (см. рисунок). **28.18.** Нет.



К ответу 28.17

**28.19.** Длина стержня в системе отсчета, относительно которой он покоится; длина стержня в различных системах отсчета неодинакова; нет. **28.20.**  $0,80$  м. **28.21.**  $\Delta l = 0,4 l_0$ . **28.22.**  $42,3 \cdot 10^6$  м/с;  $2 \cdot 10^8$  м/с. **28.23.** Из формулы  $l = l_0 \sqrt{1 - v^2/c^2}$  следует, что при  $v \rightarrow c$   $l \rightarrow 0$ , следовательно, при  $v = c$  длина тела стала бы равной нулю, что невозможно. **28.24.** а)  $Q = Q'$ ,  $U$  уменьшается в  $\sqrt{1 - v^2/c^2}$  раз; б)  $Q = Q''$ ,  $U''$  и  $E''$  увеличиваются в  $1/\sqrt{1 - v^2/c^2}$  раз. **28.25.** 8 ч; 10 ч. **28.26.**  $2 \cdot 10^{-5}$  с,  $2 \cdot 10^{-6}$  с,  $6 \cdot 10^2$  м. **28.27.** 59 мин 59,8 с; 56 мин 34 с; 33 мин 7 с. **28.28.** 71 год. **28.29.** 80,8 и 11,3 года. **28.30.** 0,99 с. **28.31.** В системе отсчета, связанной с земным наблюдателем, путь, пройденный мезоном до распада, примерно равен  $5 \cdot 10^3$  м, и поэтому наблюдаемые у Земли мю-мезоны прилететь из космоса не могут. **28.32.** На  $1,2 \cdot 10^5$  км/с ( $u_{кл} = 4,0 \cdot 10^5$  км/с,  $u_{рел} = 2,8 \cdot 10^5$  км/с). **28.33.**  $u_1 = 0,36c$ ,  $u_2 = 0,99c$ . **28.34.** 4,1 мкс. **28.35.**  $u = c$ . **28.36.**  $u_{рел} = c$ ,  $u_{кл} = 2c$ , что противоречит теории относительности. **28.37.** Да, но его скорость меньше скорости света в вакууме, при этом возникает электромагнитное излучение (эффект Вавилова-Черенкова). **28.38.** При скоростях, близких к скорости света, изменением массы пренебрегать нельзя, поэтому ускорение  $a = F/m$  при  $F = \text{const}$

не будет постоянным. **28.39.** Из формулы  $m = m_0 / \sqrt{1 - v^2/c^2}$  следует, что  $m \approx m_0$  при  $v \ll c$ , при этих же значениях  $v \ll c$  можно считать справедливой механику Ньютона. **28.40.** В 1,51 раза. **28.41.** 1,34 кг. **28.42.** 0,80 с. **28.43.** Продольные размеры тела в направлении движения уменьшаются в  $\sqrt{1 - v^2/c^2}$  раз при неизменных поперечных размерах, масса тела увеличивается в  $1/\sqrt{1 - v^2/c^2}$  раз; плотность возрастает в  $1/(1 - v^2/c^2)$  раз; нет. **28.44.**  $3,64 \cdot 10^{-22}$  кг·м/с. **28.45.**  $p = 1,93 \cdot 10^{-18}$  кг·м/с;  $U = 2,8 \cdot 10^9$  В. **28.46.**  $p_1 = 0$ ,  $p_2 = mu_2$ , где  $m = \frac{m_0}{\sqrt{1 - v^2/c^2}}$ ;  $u_2 = \frac{v - (-v)}{1 - v(-v)/c^2} = \frac{2v}{1 + v^2/c^2}$  (по теореме сложения скоростей). **28.47.**  $E_{0e} = 8,2 \cdot 10^{-14}$  Дж = 0,511 МэВ;  $E_{0p} = 1,5 \cdot 10^{-10}$  Дж = 938 МэВ. **28.48.**  $E_k = 2m_0c^2$ ,  $E = 3m_0c^2$ ,  $p \approx 2,82m_0c$ . **28.49.**  $v \approx 0,865c \approx 2,59 \cdot 10^8$  м/с. **28.50.**  $T/T_0 = 1/\sqrt{1 - v^2/c^2} = 1,25$ , где  $1/\sqrt{1 - v^2/c^2} = (E_0 + E_k)/E_0$ . **28.51.**  $v = c\sqrt{1 - 1/(1 + E_k/E_0)^2} \approx 3 \times 10^8$  м/с,  $mc^2/(m_0c^2) = 1 + E_k/(m_0c^2) \approx 75,6$ . **28.52.**  $E_k = 10E_0 = 5,1$  МэВ =  $8,2 \cdot 10^{-13}$  Дж;  $p = 2,99 \cdot 10^{-21}$  кг·м/с. **28.53.**  $E = \frac{4}{3}m_0c^2$ ;  $E_k = \frac{1}{3}m_0c^2$ . **28.54.**  $eU = 10E_0$ ;  $U \approx 5,11 \cdot 10^6$  В. **28.55.** 9,38 ГВ; в 11 раз. **28.56.** 916 МВ. **28.57.**  $1,1 \cdot 10^{-27}$  кг·м/с;  $3,7 \cdot 10^{-36}$  кг. **28.58.**  $1,1 \cdot 10^{-27}$  кг·м/с;  $3,7 \cdot 10^{-36}$  кг. **28.59.** Нет; да. **28.60.**  $4,0 \cdot 10^{-11}$  м;  $7,5 \cdot 10^{18}$  Гц. **28.61.**  $9 \cdot 10^{13}$  Дж. **28.62.**  $1,0 \cdot 10^{-7}$  кг. **28.63.**  $3,87 \cdot 10^{26}$  Дж;  $4,3 \cdot 10^9$  кг.

## § 29. Строение атома

**29.1.** Отклонение небольшой части  $\alpha$ -частиц (около 0,2%) на углы больше  $90^\circ$  указывало на то, что в частице малых размеров — ядре сосредоточена почти вся масса атома и весь его положительный заряд. **29.2.** По классической теории атом в модели Резерфорда должен быть неустойчивым, что не согласуется с опытом. Да; нет. **29.3.** В основном состоянии может только поглощать с переходом на более высокий энергетический уровень; в возбужденном — поглощать и излучать с переходом соответственно на более высокий и более низкий энергетические уровни. **29.4.** Да; нет. **29.5.** Изменением энергии атома при его переходе с одного энергетического уровня на другой. **29.6.** В основном состоянии атом обладает определенной минимальной энергией и может находиться сколь угодно долго, возбужденные состояния — состояния, соответствующие всем разрешенным энергетическим уровням, кроме основного (время пребывания в этом состоянии ограничено, например, для атома водорода оно порядка  $10^{-8}$  с). **29.7.** Каждому переходу атома с одного энергетического уровня на другой соответствует определенная спектральная линия. **29.8.** Переходом с третьего на первый энергетический уровень — ультрафиолетовое излучение; с третьего на второй — видимое излучение; со второго на первый — ультрафиолетовое. **29.9.** Два в  $K$ -слое, восемь в  $L$ -слое и один в  $M$ -слое; два в  $K$ -слое и один в  $L$ -слое. **29.10.** Ультрафиолетовое, видимое и инфракрасное; рентгеновское. **29.11.** Нет, да. **29.12.** Потому что они возникают при переходе электро-

нов, близких к ядру, на более низкие свободные энергетические уровни, чему соответствуют строго определенные частоты; увеличиваются частоты. **29.13.**  $5,29 \cdot 10^{-11}$  м;  $6,57 \cdot 10^{15}$  Гц;  $1,52 \cdot 10^{-16}$  с. **29.14.** Длина орбиты в атоме Бора равна целому числу волн де Бройля; число длин волн  $n$  равно порядковому номеру орбиты. **29.15.** 3,29 и 2,47 Гц. **29.16.**  $3,65 \cdot 10^{-7}$  и  $6,56 \cdot 10^{-7}$  м. **29.17.**  $-8,68 \cdot 10^{-20}$  Дж. **29.18.**  $21,76 \cdot 10^{-19}$  Дж = 13,6 эВ; 0,77 Мм/с. **29.19.** 91 нм. **29.20.** Третья. **29.21.** Люминесцентное излучение, избыточное над тепловым, не зависит от температуры; в отличие от сплошного температурного люминесцентный спектр линейчатый. **29.22.** Длительность люминесцентного излучения ( $10^{-9}$ – $10^{-6}$  с), значительно превышающая период световых колебаний ( $10^{-14}$ – $10^{-15}$  с). **29.23.** Излучается энергия, затраченная на электронное возбуждение; переходит во внутреннюю энергию, затраченная на изменение колебательного и вращательного движений. **29.24.** Нет; излучение будет невидимо, так как длина волны вторичного излучения больше длины волны первичного. **29.25.** В высокой абсолютной и относительной чувствительности, что позволяет обнаружить  $10^{-8}$ – $10^{-11}$  г вещества и не вызывает, как правило, разрушения вещества; в быстроте получения результатов; анализ может быть повторен многократно на одном объекте. **29.26.** Самопроизвольное излучение — не когерентное, вынужденное излучение когерентное; вынужденное излучение. **29.27.** Высокая степень направленности, монохроматичность, значительная интенсивность.

### § 30. Ядерная физика

**30.1.**  $R_\kappa = R_\odot \sqrt[3]{D_\kappa/D_\kappa} = 6,05 \cdot 10^3$  км, здесь  $R_\odot$  — радиус Солнца,  $D_\kappa$  и  $D_\kappa$  — плотности солнечного и ядерного вещества. **30.2.** Произойдет перемещение на два места влево; на одно вправо. **30.3.** При превращении нейтрона в протон. **30.4.** 86; 220;  ${}^{220}_{86}\text{Rn}$ . **30.5.**  ${}^{209}_{83}\text{Bi}$ . **30.6.** Восемь и шесть. **30.7.**  ${}^{226}_{88}\text{Ra}$ . **30.8.** 11. **30.9.** Шесть  $\alpha$ -распадов и четыре  $\beta$ -распада. **30.10.**  ${}^{232}_{90}\text{Th} \rightarrow {}^{228}_{88}\text{Ra} + {}^4_2\text{He}$ ;  ${}^{228}_{88}\text{Ra} \rightarrow {}^{228}_{89}\text{Ac} + {}^0_{-1}\text{e}$ ;  ${}^{228}_{89}\text{Ac} \rightarrow {}^{228}_{90}\text{Th} + {}^0_{-1}\text{e}$ ;  ${}^{228}_{90}\text{Th} \rightarrow {}^{224}_{88}\text{Ra} + {}^4_2\text{He}$ ;  ${}^{224}_{88}\text{Ra} \rightarrow {}^{220}_{86}\text{Rn} + {}^4_2\text{He}$ ;  ${}^{220}_{86}\text{Rn} \rightarrow {}^{216}_{84}\text{Po} + {}^4_2\text{He}$ ;  ${}^{216}_{84}\text{Po} \rightarrow {}^{212}_{82}\text{Pb} + {}^4_2\text{He}$ ;  ${}^{212}_{82}\text{Pb} \rightarrow {}^{208}_{80}\text{Hg} + {}^4_2\text{He}$ ;  ${}^{208}_{80}\text{Hg} \rightarrow {}^{208}_{81}\text{Tl} + {}^0_{-1}\text{e}$ ;  ${}^{208}_{81}\text{Tl} \rightarrow {}^{208}_{82}\text{Pb} + {}^0_{-1}\text{e}$ . **30.11.** Нет. **30.12.** 1620 лет. **30.13.**  $\lambda = 1,7866 \cdot 10^{-9}$  Бк;  $\tau = 17,75$  года. **30.14.**  $\Delta N = 0,63 N_0$ ; здесь  $\Delta N$  — доля распавшихся атомов,  $N_0$  — их начальное значение. **30.15.** За 5,8 года. **30.16.** Приблизительно 30 лет. **30.17.** 1,24 %;  $8 \cdot 10^{-10}$  с $^{-1}$ . **30.18.**  $3,2 \cdot 10^{12}$  Бк. **30.19.**  $6,2 \cdot 10^9$  расп. **30.20.** За 5 мин 5 с. **30.21.** Около 1792 лет. **30.22.** Бэр (биологический эквивалент рентгена) есть доза любого вида ионизирующего излучения, производящая такое же биологическое действие, как и доза рентгеновских или  $\gamma$ -лучей в 1 рентген. **30.23.** Обратно пропорционально квадрату расстояния. **30.24.**  $2,94 \cdot 10^8$  м/с. **30.25.**  $112^\circ$ . **30.26.** На ионизации газа пролетающими в нем заряженными частицами. **30.27.** Для регистрации следов (треков) заряженных частиц высоких энергий, действие основано на

вскипании перегретой жидкости вблизи траектории движущейся частицы. **30.28.**  $1,64 \cdot 10^{-13}$  Дж;  $1,24 \cdot 10^{20}$  Гц; противоположное. **30.29.**  $2,47 \cdot 10^{20}$  Гц;  $1,022$  МэВ. **30.30.** На различии отклонений ядер изотопов элемента в электрическом и магнитном полях, обусловленных различием их масс. **30.31.** Разность между суммарной массой всех нуклонов ядра в свободном состоянии и массой самого ядра;  $\Delta m = Zm_p + (A - Z)m_n - M_{\text{я}}$ , или  $\Delta m = ZM_H + Nm_n - M_{\text{ат}}$ . **30.32.**  $\Delta m = 0,01594$  а.е.м. =  $0,0264604 \cdot 10^{-27}$  кг. **30.33.**  $0,512$  и  $931,5$  МэВ. **30.34.** Да; ядерные силы не имеют электромагнитной природы. **30.35.** Энергия, которую необходимо затратить, чтобы расщепить ядро на нуклоны, равна разности между суммой масс входящих в него нуклонов и массой ядра, умноженной на квадрат скорости света в вакууме. **30.36.**  $39,2$ ,  $559,1$  и  $1771,8$  МэВ. **30.37.**  $5,60$ ,  $8,74$  и  $7,60$  МэВ; вначале возрастает до Fe, затем уменьшается. **30.38.** Энергия притяжения растет пропорционально числу протонов, а энергия электростатического отталкивания пропорционально квадрату их зарядов. **30.39.** Ядро атома железа, так как удельная энергия связи его больше. **30.40.**  ${}^{14}_7\text{N} + {}^4_2\text{He} \rightarrow {}^{18}_8\text{O} + {}^1_1\text{H}$ ; с поглощением;  $1,2$  МэВ. **30.41.** На  $4,23 \cdot 10^{-29}$  кг =  $2,55 \cdot 10^{-2}$  а.е.м. **30.42.**  $7,27$  МэВ. **30.43.**  $1,56$  МэВ. **30.44.**  ${}^6_3\text{Li} + {}^2_1\text{H} \rightarrow 2 {}^4_2\text{He}$ ;  $22,34$  МэВ =  $3,57 \cdot 10^{-12}$  Дж. **30.45.** В природе существует только одно ядерное топливо — урановое, которое содержит делящиеся ядра  ${}^{235}\text{U}$ , обеспечивающие поддержание цепной реакции (ядерное горючее); имеющийся в руде  ${}^{238}\text{U}$  способен захватывать нейтроны и превращаться в делящиеся ядра  ${}^{239}\text{Pu}$  (вторичное горючее). **30.46.**  ${}^{239}_{93}\text{Np} \rightarrow {}^0_{-1}\text{e} + {}^{239}_{94}\text{Pu}$ . **30.47.** Уран-235; плутоний-239; уран-233. **30.48.** Используются в качестве замедлителя нейтронов. **30.49.**  $3 \cdot 10^{16}$ . **30.50.** Изменением глубины погружения стержней, содержащих бор и кадмий, сильно поглощающих нейтроны. **30.51.**  $26,3$  г. **30.52.**  $1233$  кг. **30.53.** Первая происходит при делении тяжелых ядер — используется в атомных реакторах; вторая осуществляется в результате синтеза легких ядер при высоких температурах — имеет место в звездах. **30.54.** Кулоновские силы отталкивания возрастают с увеличением порядкового номера элемента, и для их преодоления требуется кинетическая энергия, соответствующая большей температуре. **30.55.** Известно, что температура среды пропорциональна кинетической энергии частиц; для сближения и синтеза двух легких атомных ядер с номерами  $Z_1$  и  $Z_2$  они должны приобрести кинетическую энергию, сравнимую с энергией электростатического отталкивания  $\varepsilon = kZ_1Z_2e^2/r$  на расстояниях порядка размера ядра ( $\sim 10^{-13}$  см). **30.56.**  ${}^2_1\text{H} + {}^1_1\text{H} \rightarrow {}^4_2\text{He} + {}^1_0\text{n}$ ,  $17,6$  МэВ.

## § 31. Некоторые вопросы астрономии

**31.1.** Произвольным радиусом вычертить полусферу (на чертеже она обозначится как полуокружность); под разными углами к линии горизонта и на различных расстояниях, измеряемых по лучу зрения, изобразить точки и пронумеровать звезды, спроецировать их на небесную сферу и сде-

лать вывод. **31.2.** В космосе появляется возможность использовать в процессе наблюдений весь спектр электромагнитных излучений, при наземных наблюдениях атмосфера в значительной степени поглощает инфракрасные, ультрафиолетовые и рентгеновские излучения. **31.3.** Слева направо по часовой стрелке. **31.4. Указание.** Звезды и созвездия, которым они принадлежат, будут незаходящими, если выполняется условие  $\varphi \geq 90^\circ - \delta$ , где  $\varphi$  — географическая широта места наблюдения,  $\delta$  — склонение звезды. **31.5.** Сириус —  $\alpha$  Б. Пса, Вега —  $\alpha$  Лиры. **31.6.** Альдебаран, Капелла. **31.7.** Созвездие Лебедя. **31.8.** 0 ч 40 мин;  $+42^\circ$ . **31.9.**  $Z = 90^\circ - \varphi$ ;  $34^\circ 15'$ . **31.10.** Для широты Москвы созвездие Персея. **31.11.** Путь видимого годичного движения Солнца среди звезд; под углом  $23^\circ 27'$ . **31.12.** Созвездия, по которым проходят пути Солнца и Луны; всего 12 созвездий: Рыба, Овен, Телец, Близнецы, Рак, Лев, Дева, Весы, Скорпион, Стрелец, Козерог, Водолей. **31.13.**  $6'$ ,  $+23^\circ 27'$ ;  $18'$ ,  $-23^\circ 27'$ . **31.14.** В созвездии Возничего. **31.15.** В созвездии Стрельца. **31.16.** Прохождение светила через меридиан;  $h = 90^\circ - \varphi + \delta$ . **31.17.** Приблизительно  $58^\circ$ ;  $11^\circ$ . **31.18.**  $Z = \varphi - \delta = 21^\circ 27'$ ;  $h = 90^\circ - Z = 68^\circ 33'$ . **31.19.**  $24^\circ 34'$ . **31.20.**  $\varphi \geq 90^\circ - \delta$ , начиная с широты  $66^\circ 33'$ . **31.21.**  $\delta \geq 90^\circ - \varphi$ ;  $38^\circ 45'$ . **31.22.** На экваторе. **31.23.**  $3,84 \cdot 10^5$  км. **31.24.**  $p = 60^\circ, 3$ . **31.25.** В 109 раз. **31.26.**  $4,13 \times 10^{13}$  км. **31.27.** Радиус Земли настолько мал, что не может служить базисом для измерения параллактического смещения звезд и определения расстояния до них. **31.28.** Годичным параллаксом звезды называется угол, под которым со звезды видна большая полуось земной орбиты  $a$ , перпендикулярная лучу зрения;  $D = a / \sin p$ , при малых углах  $\sin p = p'' / 206\,265$  и  $D = 206\,265 / p''$  а.е. **31.29.**  $0'', 749$ . **31.30.**  $0'', 546$ . **31.31.** Около 8,85 года. **31.32.** Период обращения небесного тела вокруг Земли относительно звезд; для Луны — 27,3 сут. **31.33.** Период обращения небесного тела вокруг Земли относительно Солнца, или промежуток времени между двумя последовательными одинаковыми фазами; для Луны — 29,53 сут. **31.34.** Различие происходит из-за того, что за время одного оборота Луны, Земля проходит 1/12 часть орбиты вокруг Солнца. **31.35.** Солнечные лучи, преломляясь в земной атмосфере, достигают Луны. **31.36.** Земная атмосфера пропускает красного света больше, чем синего. **31.37.** Нет. **31.38.** С возрастанием скорости до 40 км/с орбита будет в виде более вытянутого эллипса (с эксцентриситетом, стремящимся к 0,8); при скорости 42 км/с орбита превратится в параболу, а при большей скорости — в гиперболу. **31.39.** В перигелии. **31.40.**  $39,5 \text{ а.е.} = 5,91 \cdot 10^9$  км. **Указание.** Применить третий закон Кеплера. **31.41.**  $0,725 \text{ а.е.} = 1,09 \cdot 10^8$  км;  $19,18 \text{ а.е.} = 2,87 \cdot 10^9$  км. **31.42.** 1,88 года. **31.43.**  $5,53 \cdot 10^3$  кг/м<sup>3</sup>. **31.44.** Отличие плотности поверхностного слоя Земли от ее среднего значения указывает на наличие плотного ядра в недрах Земли. Поскольку средняя плотность Луны такая же, как плотность поверхностных горных пород Земли, Луна, вероятно, не имеет плотного ядра и почти целиком состоит из скальных пород. **31.45.** 333000 масс Земли. **31.46.**  $1,4 \cdot 10^3$  кг/м<sup>3</sup>. **31.47.** Они состоят в основном из водорода

и гелия. **31.48.** Да. **31.49.**  $5 \cdot 10^{-4}$  кг/моль. **31.50.** Примерно  $8 \cdot 10^{41}$  Дж. **31.51.**  $1,05 \cdot 10^5$  К. **31.52.**  $1,6 \cdot 10^7$  К. **31.53.** Звезды; они удалены на очень большие расстояния от наблюдателя и излучают свет одинаково по всем направлениям. **31.54.** Освещенность, создаваемая на площадке, нормальной к направлению на помещенный вне атмосферы источник излучения; блеск светила (звезды) равен полной мощности излучения (светимости), деленной на площадь сферы ( $4\pi r^2$ , где  $r$  — расстояние от источника до Земли). **31.55.** При пользовании телескопом световой поток во столько раз больше светового потока, проходящего через зрачок невооруженного глаза, во сколько раз площадь объектива телескопа больше площади зрачка, и поэтому возможно наблюдение за более слабыми звездами. **31.56.** В 100 раз. **31.57.**  $\alpha$  Центавра примерно в  $4 \cdot 10^9$  раз ярче. **31.58.** В 100 раз. **31.59.**  $M = m + 5 - 5 \lg r$ . **31.60.** Расстояние до Солнца и  $\alpha$  Центавра меньше 10 пк. **31.61.** Компактные звезды с массой, сравнимой с массой Солнца, радиус которых меньше примерно в 100 раз радиуса Солнца. **31.62.** Вследствие малых размеров белых карликов средняя плотность их вещества очень велика (порядка  $10^9$  кг/м<sup>3</sup>); в миллионы раз выше плотности нормальных звезд; ускорение свободного падения на поверхности белых карликов имеет порядок  $10^6$  м/с<sup>2</sup>. **31.63.** На наличие у них магнитных полей. **31.64.** Гидростатически равновесные звезды, вещество которых состоит в основном из нейтронов. В 1967 г. были обнаружены в виде импульсных источников радиоизлучения — радиопульсаров; в 1971 г. — в виде рентгеновского излучения — рентгеновских пульсаров; в 1975 г. обнаружены вспышечные источники рентгеновского излучения — барстеры. **31.65.** Не исключена возможность, что нейтронные звезды могут быть источником  $\gamma$ -всплесков. **31.66.** В атомном ядре, представляющем систему нуклонов, действуют ядерные силы, обеспечивающие целостность ядра. Равновесие нейтронных звезд определяется балансом между сжимающей звезду силой тяжести (мизерной в атомном ядре) и перепадом давления от центра к ее поверхности. Колоссальное давление объясняется тем, что с уменьшением расстояния между нуклонами силы отталкивания превосходят ядерные силы. **31.67.** Область пространства, в которой поле тяготения настолько велико (сильно), что вторая космическая скорость (параболическая скорость) для находящихся в этой области тел должна была бы превышать скорость света, т.е. из черной дыры ничто не может вылетать, ибо в природе ничто не может двигаться со скоростью больше скорости света; черные дыры есть одна из стадий в эволюции звезд. **31.68.** Удаляется; 0,4861 нм; 300 км/с. **31.69.** 2,1 км/с. **31.70.** 30 км/с. **31.71.** 486,051 нм. **31.72.** Удаляется;  $1,38 \times 10^5$  км/с; на 230 нм. **31.73.**  $4,8 \cdot 10^4$  км/с. **31.74.** При скоростях объектов, близких к скорости света  $c$ , необходимо применять формулу, приведенную в сноске к задаче 31.68;  $v = 0,8c$ . **31.75.**  $3,8 \cdot 10^4$  км/с; уменьшается. **31.76.**  $2,4 \cdot 10^9$  Дж. **31.77.** 7,7 км/с;  $5,4 \cdot 10^3$  с. **31.78.** 7,8 км/с. **31.79.**  $4,24 \times 10^4$  км;  $3,6 \cdot 10^4$  км; 3,1 км/с. **31.80.** 750 км/с.

# ПРИЛОЖЕНИЯ

## А. ТАБЛИЦЫ ФИЗИЧЕСКИХ ВЕЛИЧИН

### І. Фундаментальные физические константы

|                                                              |                                                                                                                             |
|--------------------------------------------------------------|-----------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|
| Гравитационная постоянная                                    | $G = 6,672 \cdot 10^{-11} \text{ Н} \cdot \text{м}^2/\text{кг}^2$                                                           |
| Ускорение свободного падения<br>(нормальное)                 | $g_n = 9,80665 \text{ м/с}^2 \approx 9,81 \text{ м/с}^2$                                                                    |
| Нормальное атмосферное давление                              | $p_0 = 101\,325 \text{ Па}$                                                                                                 |
| Постоянная Авогадро                                          | $N_A = 6,022045 \cdot 10^{23} \text{ моль}^{-1}$                                                                            |
| Объем одного моля идеального газа<br>при нормальных условиях | $V_m = RT_0/p_0 =$<br>$= 22,41383 \cdot 10^{-3} \text{ м}^3/\text{моль}$                                                    |
| Универсальная газовая постоянная                             | $R = 8,31441 \text{ Дж}/(\text{моль} \cdot \text{К})$                                                                       |
| Постоянная Ломмонта                                          | $N_L = 2,7 \cdot 10^{25} \text{ м}^{-3}$                                                                                    |
| Постоянная Больцмана                                         | $k = R/N_A = 1,380662 \cdot 10^{-23} \text{ Дж/К}$                                                                          |
| Скорость света в вакууме                                     | $c = 2,99792458 \cdot 10^8 \text{ м/с}$                                                                                     |
| Магнитная постоянная                                         | $\mu_0 = 4\pi \cdot 10^{-7} \text{ Гн/м} =$<br>$= 1,25663706144 \cdot 10^{-6} \text{ Гн/м}$                                 |
| Электрическая постоянная                                     | $\epsilon_0 = 8,85418782 \cdot 10^{-12} \frac{\text{Кл}^2}{\text{Н} \cdot \text{м}^2} \left( \frac{\Phi}{\text{м}} \right)$ |
| Масса покоя электрона                                        | $m_e = 9,109534 \cdot 10^{-31} \text{ кг}$                                                                                  |
| Масса покоя протона                                          | $m_p = 1,6726485 \cdot 10^{-27} \text{ кг}$                                                                                 |
| Масса покоя нейтрона                                         | $m_n = 1,6749543 \cdot 10^{-27} \text{ кг}$                                                                                 |
| Атомная единица массы                                        | $1 \text{ а.е.м.} = 1,6605655 \cdot 10^{-27} \text{ кг}$                                                                    |
| Элементарный заряд                                           | $e = 1,6021892 \cdot 10^{-19} \text{ Кл}$                                                                                   |
| Постоянная Фарадея                                           | $F = N_A e = 9,648456 \cdot 10^4 \text{ Кл/моль}$                                                                           |
| Постоянная Планка                                            | $h = 6,626176 \cdot 10^{-34} \text{ Дж} \cdot \text{с}$                                                                     |
| Солнечная постоянная                                         | $J_C = 1370 \text{ Вт/м}^2$                                                                                                 |
| Постоянная Стефана-Больцмана                                 | $\sigma = 5,67032 \cdot 10^{-8} \text{ Вт}/(\text{м}^2 \cdot \text{К}^4)$                                                   |
| Постоянная Вина                                              | $b = 0,00289782 \text{ м} \cdot \text{К}$                                                                                   |
| Постоянная Ридберга                                          | $R_\infty = 10973731,77 \text{ м}^{-1}$                                                                                     |
| Радиус первой боровской орбиты                               | $a_0 = 5,29167706 \cdot 10^{-11} \text{ м}$                                                                                 |



## II. Единицы физических величин

| Наименование величины         | Обозначение и определяющее уравнение | Единица                              | Связь внесистемных единиц с единицами СИ                                                                            |
|-------------------------------|--------------------------------------|--------------------------------------|---------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|
| 1. Основные единицы СИ        |                                      |                                      |                                                                                                                     |
| Длина                         | $l$                                  | метр (м)                             | 1 см = $10^{-2}$ м<br>1 км = $10^3$ м                                                                               |
| Масса                         | $m$                                  | килограмм (кг)                       | 1 г = $10^{-3}$ кг<br>1 ц = $10^2$ кг<br>1 т = $10^3$ кг                                                            |
| Время                         | $t$                                  | секунда (с)                          | 1 мин = 60 с<br>1 ч = 3600 с<br>1 сут = 86 400 с                                                                    |
| Термодинамическая температура | $T$                                  | кельвин (К)                          | 1° = 1 К<br>$t\text{ }^{\circ}\text{C} = T - 273,15\text{ К}$                                                       |
| Сила электрического тока      | $I$                                  | ампер (А)                            |                                                                                                                     |
| Сила света                    | $J$                                  | кандела(кд)                          |                                                                                                                     |
| Количество вещества           | $\mu$                                | моль                                 | 1 кмоль = $10^3$ моль                                                                                               |
| 2. Дополнительные единицы СИ  |                                      |                                      |                                                                                                                     |
| Плоский угол                  | $\varphi = \frac{l}{R}$              | радиан (рад)                         | 1° = $\frac{\pi}{180}$ рад<br>1' = $\frac{\pi}{108} \cdot 10^{-2}$ рад<br>1'' = $\frac{\pi}{648} \cdot 10^{-3}$ рад |
| Телесный угол                 | $\Omega = \frac{S}{R^2}$             | стерадиан (ср)                       |                                                                                                                     |
| 3. Производные единицы СИ     |                                      |                                      |                                                                                                                     |
| Площадь                       | $S = l^2$                            | квадратный метр (м²)                 | 1 см² = $10^{-4}$ м²<br>1 км² = $10^6$ м²                                                                           |
| Объем, вместимость            | $V = l^3$                            | кубический метр (м³)                 | 1 см³ = $10^{-6}$ м³<br>1 л = $1,000028 \cdot 10^{-3}$ м³                                                           |
| Плотность                     | $\rho = \frac{m}{V}$                 | килограмм на кубический метр (кг/м³) | 1 г/см³ = $10^3$ кг/м³                                                                                              |

Продолжение

| Наименование величины                             | Обозначение и определяющее уравнение              | Единица                                           | Связь внесистемных единиц с единицами СИ                                                                                             |
|---------------------------------------------------|---------------------------------------------------|---------------------------------------------------|--------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|
| Скорость                                          | $v = \frac{l}{t}$                                 | метр в секунду<br>(м/с)                           | $1 \text{ см/с} = 10^{-2} \text{ м/с}$<br>$1 \text{ км/ч} = \frac{1}{3,6} \text{ м/с}$                                               |
| Ускорение                                         | $a = \frac{\Delta v}{\Delta t}$                   | метр на секунду в квадрате<br>(м/с <sup>2</sup> ) | $1 \text{ см/с}^2 = 10^{-2} \text{ м/с}^2$                                                                                           |
| Сила, вес                                         | $F = ma,$<br>$G = mg$                             | ньютон<br>(Н)                                     | $1 \text{ кгс} = 9,80665 \text{ Н}$<br>$1 \text{ дин} = 10^{-5} \text{ Н}$                                                           |
| Импульс                                           | $p = mv$                                          | килограмм · метр в секунду<br>(кг · м/с)          | $1 \text{ г} \cdot \text{см/с} = 10^{-5} \text{ кг} \cdot \text{м/с}$                                                                |
| Импульс силы                                      | $I = Ft$                                          | ньютон-секунда (Н · с)                            | $1 \text{ кгс} \cdot \text{с} = 9,80665 \text{ Н} \cdot \text{с}$                                                                    |
| Работа, энергия<br>(кинетическая, потенциальная)  | $A = FS,$<br>$K = \frac{mv^2}{2},$<br>$\Pi = mgh$ | джоуль<br>(Дж)                                    | $1 \text{ эрг} = 10^{-7} \text{ Дж}$                                                                                                 |
| Мощность                                          | $P = \frac{A}{t}$                                 | Ватт<br>(Вт)                                      | $1 \text{ эрг/с} = 10^{-7} \text{ Вт}$<br>$1 \text{ л.с.} = 735,449 \text{ Вт}$                                                      |
| Давление                                          | $p = \frac{F}{S}$                                 | паскаль<br>(Па)                                   | $1 \text{ ат} = 9,80665 \cdot 10^4 \text{ Па}$<br>$1 \text{ атм} = 101\,325 \text{ Па}$<br>$1 \text{ мм рт.ст.} = 133,32 \text{ Па}$ |
| Напряжение<br>(механическое)                      | $\sigma = \frac{F}{S}$                            | паскаль<br>(Па)                                   |                                                                                                                                      |
| Жесткость                                         | $k = \frac{F}{\Delta l}$                          | ньютон на метр<br>(Н/м)                           |                                                                                                                                      |
| Период; период колебаний математического маятника | $T = t/n,$<br>$T = 2\pi\sqrt{l/g}$                | секунда<br>(с)                                    |                                                                                                                                      |
| Частота                                           | $\nu = \frac{1}{T}$                               | герц<br>(Гц)                                      |                                                                                                                                      |

Продолжение

| Наименование величины                                              | Обозначение и определяющее уравнение       | Единица                                            | Связь внесистемных единиц с единицами СИ |
|--------------------------------------------------------------------|--------------------------------------------|----------------------------------------------------|------------------------------------------|
| Угловая скорость                                                   | $\omega = \varphi/t$                       | радиан в секунду (рад/с)                           |                                          |
| Круговая частота                                                   | $\omega = 2\pi\nu$                         | секунда в минус первой степени (с <sup>-1</sup> )  |                                          |
| Угловое ускорение                                                  | $\epsilon = \frac{\Delta\omega}{\Delta t}$ | радиан на секунду в квадрате (рад/с <sup>2</sup> ) |                                          |
| Фаза колебательного процесса                                       | $\varphi = \omega t + \varphi_0$           | радиан (рад)                                       |                                          |
| Количество теплоты                                                 | $Q = A$                                    | Джоуль (Дж)                                        | 1 кал = 4,1868 Дж<br>1 ккал = 4186,8 Дж  |
| Удельная теплоемкость                                              | $c = \frac{Q}{m\Delta T}$                  | джоуль на килограмм · кельвин (Дж/кг · К)          | 1 ккал/(кг · °С) = 4186,8 Дж/(кг · К)    |
| Молярная теплоемкость                                              | $C = \frac{Q}{M\Delta T}$                  | джоуль на моль · кельвин (Дж/моль · К)             |                                          |
| Удельная теплота фазового превращения (плавления, парообразования) | $\lambda = Q/m,$<br>$r = Q/m$              | джоуль на килограмм (Дж/кг)                        |                                          |
| Температурный коэффициент линейного расширения                     | $\alpha = \frac{\Delta l}{l_0 \Delta T}$   | кельвин в минус первой степени (К <sup>-1</sup> )  |                                          |
| объемного расширения                                               | $\beta = \frac{\Delta V}{V_0 \Delta T}$    |                                                    |                                          |
| Динамическая вязкость                                              | $\eta = \frac{F}{S(\Delta v/\Delta l)}$    | паскаль · секунда (Па · с)                         |                                          |
| Поверхностное натяжение                                            | $\sigma = \frac{F}{l}$                     | ньютон на метр (Н/м)                               | 1 дин/см = 10 <sup>-9</sup> Н/м          |

Продолжение

| Наименование величины                                                | Обозначение и определяющее уравнение                                   | Единица                                        | Связь внесистемных единиц с единицами СИ                                                   |
|----------------------------------------------------------------------|------------------------------------------------------------------------|------------------------------------------------|--------------------------------------------------------------------------------------------|
| Электрический заряд                                                  | $Q = It$                                                               | кулон (Кл)                                     | 1 СГС <sub>Q</sub> = $1/3 \cdot 10^{-9}$ Кл                                                |
| Поверхностная плотность электрического заряда                        | $\sigma = \frac{Q}{S}$                                                 | кулон на квадратный метр (Кл/м <sup>2</sup> )  |                                                                                            |
| Напряженность электрического поля                                    | $E = U/l$<br>$E = F/Q$ ,<br>$E = \frac{Q}{4\pi\epsilon_0\epsilon r^2}$ | вольт на метр (В/м)                            | 1 СГС <sub>E</sub> = $3 \cdot 10^4$ В/м                                                    |
| Разность электрических потенциалов, напряжение, электродвижущая сила | $\varphi_1 - \varphi_2 = A/Q$ ,<br>$U = IR$ ,<br>$\mathcal{E} = A/q$   | Вольт (В)                                      | 1 СГС <sub>U</sub> = 300 В                                                                 |
| Электрическая емкость, электрическая емкость плоского конденсатора   | $C = Q/U$<br>$C = \epsilon_0\epsilon S/d$                              | Фарад (Ф)                                      | 1 см = $\frac{1}{9 \cdot 10^{11}}$ Ф                                                       |
| Энергия заряженного конденсатора                                     | $W_{эл} = \frac{CU^2}{2}$                                              | джоуль (Дж)                                    |                                                                                            |
| Плотность энергии электрического поля                                | $w_{эл} = \frac{\epsilon_0\epsilon E^2}{2}$                            | джоуль на кубический метр (Дж/м <sup>3</sup> ) |                                                                                            |
| Плотность электрического тока                                        | $j = \frac{I}{S}$                                                      | ампер на квадратный метр (А/м <sup>2</sup> )   |                                                                                            |
| Электрическое сопротивление                                          | $R = U/I$<br>$R = \rho l/S$                                            | ом (Ом)                                        |                                                                                            |
| Электрическая проводимость                                           | $G = \frac{1}{R}$                                                      | сименс (См)                                    |                                                                                            |
| Работа тока в электрической цепи                                     | $A = UI t$ ,<br>$A = I^2 R t$ ,<br>$A = U^2 t/R$                       | джоуль (Дж)                                    | 1 МэВ = $1,602 \cdot 10^{-13}$ Дж<br>1 Вт · ч = 3600 Дж<br>1 кВт · ч = $3,6 \cdot 10^6$ Дж |

Продолжение

| Наименование величины                                                                                         | Обозначение и определяющее уравнение                                                          | Единица                                         | Связь внесистемных единиц с единицами СИ |
|---------------------------------------------------------------------------------------------------------------|-----------------------------------------------------------------------------------------------|-------------------------------------------------|------------------------------------------|
| Мощность электрического тока                                                                                  | $P = IU,$<br>$P = I^2 R,$<br>$P = U^2 / R$                                                    | Ватт (Вт)                                       |                                          |
| Электрохимический эквивалент                                                                                  | $k = \frac{m}{Q}$                                                                             | килограмм на кулон (кг/Кл)                      |                                          |
| Магнитная индукция                                                                                            | $B = \frac{F}{I \Delta l}$                                                                    | тесла (Тл)                                      | 1 Гс = $10^{-4}$ Тл                      |
| Магнитный момент контура с током                                                                              | $p_m = IS$                                                                                    | ампер-квадратный метр (А·м <sup>2</sup> )       |                                          |
| Магнитный поток                                                                                               | $\Phi = BS_{\perp}$                                                                           | вебер (Вб)                                      | 1 Мккс = $10^{-8}$ Вб                    |
| Напряженность магнитного поля<br>Напряженность магнитного поля: прямого тока,<br>кругового тока,<br>соленоида | $H = \frac{B}{\mu_0 \mu}$<br><br>$H = \frac{I}{2\pi r},$<br>$H = \frac{I}{2r},$<br>$H = Iw/l$ | ампер на метр (А/м)                             | 1 Э = $\frac{10^3}{4}$ А/м               |
| Индуктивность цепи                                                                                            | $L = \frac{\psi}{I}$                                                                          | генри (Гн)                                      | 1 см = $10^{-9}$ Гн                      |
| Энергия магнитного поля                                                                                       | $W_{\text{маг}} = \frac{LI^2}{2}$                                                             | джоуль (Дж)                                     |                                          |
| Объемная плотность энергии магнитного поля                                                                    | $w_{\text{маг}} = \frac{\mu_0 \mu H^2}{2}$                                                    | джоуль на кубический метр (Дж/м <sup>3</sup> )  |                                          |
| Оптическая сила линзы                                                                                         | $D = \frac{1}{F}$                                                                             | диоптрия (дптр)                                 |                                          |
| Световой поток                                                                                                | $\Phi = J\omega$                                                                              | люмен (лм)                                      |                                          |
| Освещенность                                                                                                  | $E = \Phi/S,$<br>$E = J/r^2$                                                                  | люкс (лк)                                       |                                          |
| Яркость                                                                                                       | $B = J/S_{\perp}$                                                                             | кандела на квадратный метр (кд/м <sup>2</sup> ) |                                          |

|   |                                | ПЕРИОДИЧЕСКАЯ СИСТЕМА ЭЛЕМЕНТОВ Д.И.МЕНДЕЛЕЕВА |                                  |                                  |                                |  |
|---|--------------------------------|------------------------------------------------|----------------------------------|----------------------------------|--------------------------------|--|
| 1 | I                              |                                                |                                  |                                  |                                |  |
|   |                                | II                                             | III                              | IV                               | V                              |  |
| 2 | Li<br>3<br>6,941<br>ЛИТИЙ      | Be<br>4<br>9,01218<br>БЕРИЛЛИЙ                 | B<br>5<br>10,81<br>БОР           | C<br>6<br>12,011<br>УГЛЕРОД      | N<br>7<br>14,0067<br>АЗОТ      |  |
| 3 | Na<br>11<br>22,9897<br>НАТРИЙ  | Mg<br>12<br>24,305<br>МАГНИЙ                   | Al<br>13<br>26,98154<br>АЛЮМИНИЙ | Si<br>14<br>28,085<br>КРЕМНИЙ    | P<br>15<br>30,97376<br>ФOSФОР  |  |
| 4 | K<br>19<br>39,098<br>КАЛИЙ     | Ca<br>20<br>40,08<br>КАЛЬЦИЙ                   | Sc<br>21<br>44,9559<br>СКАНДИЙ   | Ti<br>22<br>47,90<br>ТИТАН       | V<br>23<br>50,9415<br>ВАНАДИЙ  |  |
|   | Cu<br>29<br>63,546<br>МЕДЬ     | Zn<br>30<br>65,38<br>ЦИНК                      | Ga<br>31<br>68,72<br>ГАЛЛИЙ      | Ge<br>32<br>72,59<br>ГЕРМАНИЙ    | As<br>33<br>74,9216<br>МЫШЬЯК  |  |
| 5 | Rb<br>37<br>85,468<br>РУБИДИЙ  | Sr<br>38<br>87,62<br>СТРОНЦИЙ                  | Y<br>39<br>88,9059<br>ИТРИЙ      | Zr<br>40<br>91,22<br>ЦИРКОНИЙ    | Nb<br>41<br>92,9064<br>НИОБИЙ  |  |
|   | Ag<br>47<br>107,868<br>СЕРЕБРО | Cd<br>48<br>112,41<br>КАДМИЙ                   | In<br>49<br>114,82<br>ИНДИЙ      | Sn<br>50<br>118,69<br>ОЛОВО      | Sb<br>51<br>121,7<br>СУРЬМА    |  |
| 6 | Cs<br>55<br>132,9054<br>ЦЕЗИЙ  | Ba<br>56<br>137,33<br>БАРИЙ                    | La*<br>57<br>138,905<br>ЛАНТАН   | Hf<br>72<br>178,49<br>ГАФНИЙ     | Ta<br>73<br>180,947<br>ТАНТАЛ  |  |
|   | Au<br>79<br>196,9665<br>ЗОЛОТО | Hg<br>80<br>200,59<br>РУТУТЬ                   | Tl<br>81<br>204,37<br>ТАЛЛИЙ     | Pb<br>82<br>207,2<br>СВИНЕЦ      | Bi<br>83<br>208,9804<br>ВИСМУТ |  |
| 7 | Fr<br>87<br>(223)<br>ФРАНЦИЙ   | Ra<br>88<br>226,0254<br>РАДИЙ                  | Ac**<br>89<br>(227)<br>АКТИНИЙ   | Ku<br>104<br>(261)<br>КУРЧАТОВИЙ | Db<br>105<br><br>ДУБИЙ         |  |

\* ЛАНТАНОИДЫ

|                             |                                   |                              |                               |                              |                               |                                 |
|-----------------------------|-----------------------------------|------------------------------|-------------------------------|------------------------------|-------------------------------|---------------------------------|
| Ce<br>58<br>140,12<br>ЦЕРИЙ | Pr<br>59<br>140,9077<br>ПРАЗЕОДИМ | Nd<br>60<br>144,24<br>НЕОДИМ | Pm<br>61<br>(145)<br>ПРОМЕТИЙ | Sm<br>62<br>150,4<br>САМАРИЙ | Eu<br>63<br>151,96<br>ЕВРОПИЙ | Gd<br>64<br>157,25<br>ГАДОЛИНИЙ |
|-----------------------------|-----------------------------------|------------------------------|-------------------------------|------------------------------|-------------------------------|---------------------------------|

\*\* АКТИНОИДЫ

|                               |                                     |                            |                                  |                               |                               |                            |
|-------------------------------|-------------------------------------|----------------------------|----------------------------------|-------------------------------|-------------------------------|----------------------------|
| Th<br>90<br>232,0381<br>ТОРИЙ | Pa<br>91<br>231,0359<br>ПРОТАКТИНИЙ | U<br>92<br>238,029<br>УРАН | Np<br>93<br>237,0482<br>НЕПУТНИЙ | Pu<br>94<br>(244)<br>ПЛУТОНИЙ | Am<br>95<br>(243)<br>АМЕРИЦИЙ | Cm<br>96<br>(247)<br>КУРИЙ |
|-------------------------------|-------------------------------------|----------------------------|----------------------------------|-------------------------------|-------------------------------|----------------------------|

| ТЕМА<br>ЛЕЕВА              |                              | VII                        |                             | VIII                       |  | <div>Обозначение<br/>элемента</div> <div><div>Li</div><div>ЛИТИЙ</div></div> <div>Атомный<br/>номер</div> <div>3</div> <div>Атомная<br/>масса</div> <div>6.941</div> |  |
|----------------------------|------------------------------|----------------------------|-----------------------------|----------------------------|--|----------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|--|
| VI                         |                              |                            |                             |                            |  |                                                                                                                                                                      |  |
| 1<br>1,0079<br>ВОДОРОД     | 2<br>4,00260<br>ГЕЛИЙ        |                            |                             |                            |  |                                                                                                                                                                      |  |
| 8<br>15,999<br>КИСЛОРОД    | 9<br>18,998403<br>ФТОР       | 10<br>20,179<br>НЕОН       |                             |                            |  |                                                                                                                                                                      |  |
| 16<br>32,06<br>СЕРА        | 17<br>35,453<br>ХЛОР         | 18<br>39,948<br>АРГОН      |                             |                            |  |                                                                                                                                                                      |  |
| Cr 24<br>51,996<br>ХРОМ    | Mn 25<br>54,9380<br>МАРГАНЕЦ | Fe 26<br>55,847<br>ЖЕЛЕЗО  | Co 27<br>58,9332<br>КОБАЛЬТ | Ni 28<br>58,70<br>НИКЕЛЬ   |  |                                                                                                                                                                      |  |
| 34<br>78,96<br>СЕЛЕН       | 35<br>79,904<br>БРОМ         | 36<br>83,80<br>КРИПТОН     |                             |                            |  |                                                                                                                                                                      |  |
| Mo 42<br>95,94<br>МОЛИБДЕН | Tc 43<br>98,9062<br>ТЕХНЕЦИЙ | Ru 44<br>101,07<br>РУТЕНИЙ | Rh 45<br>102,9055<br>РОДИЙ  | Pd 46<br>106,4<br>ПАЛЛАДИЙ |  |                                                                                                                                                                      |  |
| 52<br>127,60<br>ТЕЛЛУР     | I 53<br>126,9045<br>ИОД      | Xe 54<br>131,30<br>КСЕНОН  |                             |                            |  |                                                                                                                                                                      |  |
| W 74<br>183,85<br>ВОЛЬФРАМ | Re 75<br>186,207<br>РЕЙНИЙ   | Os 76<br>190,2<br>ОСМИЙ    | Ir 77<br>192,2<br>ИРИДИЙ    | Pt 78<br>195,09<br>ПЛАТИНА |  |                                                                                                                                                                      |  |
| 84<br>(209)<br>ПОЛОНИЙ     | At 85<br>(210)<br>АСТАТ      | Rn 86<br>(222)<br>РАДОН    |                             |                            |  |                                                                                                                                                                      |  |
| Sb 106<br>СИБОРИЙ          | Bh 107<br>БОРИЙ              | Hs 108<br>ГАСИЙ            | Mt 109<br>МЕНТЕНРИЙ         |                            |  |                                                                                                                                                                      |  |

|          |        |        |           |          |         |        |       |          |       |        |          |         |         |
|----------|--------|--------|-----------|----------|---------|--------|-------|----------|-------|--------|----------|---------|---------|
| Tb       | 65     | Dy     | 66        | Ho       | 67      | Er     | 68    | Tm       | 69    | Yb     | 70       | Lu      | 71      |
| 158,9254 | ТЕРБИЙ | 162,50 | ДИСПРОЗИЙ | 164,9304 | ГОЛЬМИЙ | 167,26 | ЭРБИЙ | 168,9342 | ТУЛИЙ | 173,04 | ИТТЕРБИЙ | 174,967 | ЛЮТЕЦИЙ |

|       |         |       |            |       |            |       |        |       |            |       |           |       |              |
|-------|---------|-------|------------|-------|------------|-------|--------|-------|------------|-------|-----------|-------|--------------|
| Bk    | 97      | Cf    | 98         | Es    | 99         | Fm    | 100    | Md    | 101        | [No]  | 102       | [Lr]  | 103          |
| (247) | БЕРКЛИЙ | (251) | КАЛИФОРНИЙ | (254) | ЭЙНШТЕЙНИЙ | (257) | ФЕРМИЙ | (258) | МЕНДЕЛЕВИЙ | (255) | [НОБЕЛИЙ] | (256) | [ЛЮДОВИКСИЙ] |

## III. Плотность некоторых веществ

| Вещество                              | $\rho$ , кг/м <sup>3</sup> | Вещество                           | $\rho$ , кг/м <sup>3</sup> |
|---------------------------------------|----------------------------|------------------------------------|----------------------------|
| <b>Твердые вещества (при 293 К)</b>   |                            |                                    |                            |
| Алмаз                                 | $3,5 \cdot 10^3$           | Нихром                             | $8,3 \cdot 10^3$           |
| Алюминий                              | $2,7 \cdot 10^3$           | Олово                              | $7,3 \cdot 10^3$           |
| Вольфрам                              | $1,93 \cdot 10^4$          | Парафин                            | $9,0 \cdot 10^2$           |
| Германий                              | $5,32 \cdot 10^3$          | Платина                            | $2,15 \cdot 10^4$          |
| Графит                                | $2,1 \cdot 10^3$           | Поваренная соль                    | $2,1 \cdot 10^3$           |
| Железо, сталь                         | $7,8 \cdot 10^3$           | Полоний                            | $9,28 \cdot 10^3$          |
| Золото                                | $1,93 \cdot 10^4$          | Пробка                             | $2,4 \cdot 10^2$           |
| Иридий                                | $2,24 \cdot 10^4$          | Свинец                             | $1,14 \cdot 10^4$          |
| Кирпич                                | $1,8 \cdot 10^3$           | Серебро                            | $1,05 \cdot 10^4$          |
| Константан                            | $8,9 \cdot 10^3$           | Слюда                              | $2,8 \cdot 10^3$           |
| Латунь                                | $8,5 \cdot 10^3$           | Стекло                             | $2,5 \cdot 10^3$           |
| Лед (0 °С)                            | $0,9 \cdot 10^3$           | Уголь каменный                     | $1,4 \cdot 10^3$           |
| Манганин                              | $8,5 \cdot 10^3$           | Уран                               | $1,87 \cdot 10^4$          |
| Медь                                  | $8,9 \cdot 10^3$           | Фарфор                             | $2,3 \cdot 10^3$           |
| Сульфат меди                          | $2,2 \cdot 10^3$           | Цинк                               | $7,1 \cdot 10^3$           |
| Нашатырь                              | $1,5 \cdot 10^3$           | Сульфид цинка                      | $4,04 \cdot 10^3$          |
| Никелин                               | $8,8 \cdot 10^3$           | Чугун                              | $7,4 \cdot 10^3$           |
| Никель                                | $8,9 \cdot 10^3$           | Эбонит                             | $1,2 \cdot 10^3$           |
| <b>Жидкости (при 293 К)</b>           |                            |                                    |                            |
| Анилин                                | $1,02 \cdot 10^3$          | Масло растительное (оливковое)     | $9,2 \cdot 10^2$           |
| Бензин                                | $7,0 \cdot 10^2$           | Нефть                              | $(8 \div 9) \cdot 10^2$    |
| Бензол                                | $9 \cdot 10^2$             | Нитробензол                        | $1,2 \cdot 10^3$           |
| Вода при 277 К                        | $1,0 \cdot 10^3$           | Раствор сульфата меди (насыщенный) | $1,15 \cdot 10^3$          |
| Вода при 373 К                        | $0,958 \cdot 10^3$         | Ртуть                              | $13,6 \cdot 10^3$          |
| Вода морская                          | $1,03 \cdot 10^3$          | Спирт этиловый                     | $7,9 \cdot 10^2$           |
| Глицерин                              | $1,20 \cdot 10^3$          | Эфир серный                        | $7,1 \cdot 10^2$           |
| Керосин                               | $8,0 \cdot 10^2$           |                                    |                            |
| Масло минеральное                     | $9,2 \cdot 10^2$           |                                    |                            |
| <b>Газы (при нормальных условиях)</b> |                            |                                    |                            |
| Азот                                  | 1,25                       | Криптон                            | 3,74                       |
| Аммиак                                | 0,77                       | Ксенон                             | 5,85                       |
| Аргон                                 | 1,78                       | Метан                              | 0,72                       |
| Ацетилен                              | 1,17                       | Неон                               | 0,90                       |
| Водород                               | 0,09                       | Пропан                             | 2,01                       |
| Воздух                                | 1,29                       | Светильный газ                     | 0,73                       |
| Гелий                                 | 0,18                       | Углекислый газ                     | 1,98                       |
| Кислород                              | 1,43                       | Хлор                               | 3,21                       |



**IV. Удельная теплоемкость некоторых веществ**

| Вещество                              | $c$ , Дж/(кг · К) | Вещество                      | $c$ , Дж/(кг · К) |
|---------------------------------------|-------------------|-------------------------------|-------------------|
| <b>Твердые тела</b>                   |                   |                               |                   |
| Алюминий                              | 880               | Парафин                       | 3200              |
| Бетон                                 | 920               | Песок                         | 970               |
| Дерево                                | 2700              | Платина                       | 125               |
| Железо, сталь                         | 460               | Свинец                        | 120               |
| Золото                                | 125               | Сера                          | 712               |
| Кирпич                                | 750               | Серебро                       | 250               |
| Латунь                                | 380               | Стекло                        | 840               |
| Лед                                   | 2090              | Цемент                        | 800               |
| Медь                                  | 380               | Цинк                          | 400               |
| Нафталин                              | 1300              | Чугун                         | 550               |
| Олово                                 | 250               |                               |                   |
| <b>Жидкости</b>                       |                   |                               |                   |
| Вода                                  | 4187              | Масло трансформаторное        | 2093              |
| Глицерин                              | 2430              | Ртуть                         | 125               |
| Железо                                | 830               | Спирт этиловый                | 2430              |
| Керосин                               | 2140              | Эфир серный                   | 2330              |
| Масло машинное                        | 2100              |                               |                   |
| <b>Газы (при постоянном давлении)</b> |                   |                               |                   |
| Азот                                  | 1000              | Воздух ( $M = 0,029$ кг/моль) | 1000              |
| Аммиак                                | 2100              | Гелий                         | 5200              |
| Водород                               | 14300             | Углекислый газ                | 830               |
| Водяной пар                           | 2200              |                               |                   |

**V. Удельная теплота сгорания некоторых видов топлива**

| Вещество               | $q$ , Дж/кг       | Вещество        | $q$ , Дж/кг       |
|------------------------|-------------------|-----------------|-------------------|
| <b>Твердые топлива</b> |                   |                 |                   |
| Бурый уголь            | $9,3 \cdot 10^6$  | Каменный уголь: |                   |
| Древесные чурки        | $1,5 \cdot 10^7$  | марки А-I       | $2,05 \cdot 10^7$ |
| Древесный уголь        | $2,97 \cdot 10^7$ | марки А-II      | $3,03 \cdot 10^7$ |
| Дрова сухие, солома    | $8,3 \cdot 10^6$  | Порох           | $3,0 \cdot 10^7$  |
| Кокс                   | $3,03 \cdot 10^7$ | Торф            | $1,5 \cdot 10^6$  |
| <b>Жидкие топлива</b>  |                   |                 |                   |
| Бензин, нефть          | $4,6 \cdot 10^7$  | Лигроин         | $4,33 \cdot 10^7$ |
| Дизельное горючее      | $4,2 \cdot 10^7$  | Мазут           | $4,0 \cdot 10^7$  |
| Керосин                | $4,31 \cdot 10^7$ | Спирт этиловый  | $2,7 \cdot 10^7$  |

Продолжение

| Вещество                                                                  | $q$ , Дж/кг       | Вещество       | $q$ , Дж/кг       |
|---------------------------------------------------------------------------|-------------------|----------------|-------------------|
| <b>Газообразные топлива</b> (для $1 \text{ м}^3$ при нормальных условиях) |                   |                |                   |
| Генераторный газ                                                          | $5,5 \cdot 10^6$  | Природный газ  | $3,55 \cdot 10^7$ |
| Коксовый газ                                                              | $1,64 \cdot 10^7$ | Светильный газ | $2,1 \cdot 10^7$  |

# **VI. Температура точки кипения и удельная теплота парообразования некоторых веществ**

| Вещество       | $T_k$ , К | $t_k$ , °С | $r$ , Дж/кг       |
|----------------|-----------|------------|-------------------|
| Аммиак         | 239,6     | −33,4      | $1,37 \cdot 10^6$ |
| Ацетон         | 329,2     | 56,2       | $5,2 \cdot 10^5$  |
| Бензин         | 423       | 150        | $3,0 \cdot 10^5$  |
| Вода           | 373       | 100        | $2,26 \cdot 10^6$ |
| Вода тяжелая   | 374,43    | 101,43     | $2,06 \cdot 10^6$ |
| Воздух         | 81        | −192       | $2,1 \cdot 10^5$  |
| Железо         | 3323      | 3050       | $5,8 \cdot 10^4$  |
| Ртуть          | 630       | 357        | $2,85 \cdot 10^5$ |
| Скипидар       | 433       | 160        | $2,94 \cdot 10^5$ |
| Спирт этиловый | 351       | 78         | $8,57 \cdot 10^5$ |
| Фреон-12       | 243,2     | −29,8      | $1,68 \cdot 10^6$ |
| Эфир серный    | 308       | 35         | $3,52 \cdot 10^5$ |

# **VII. Давление насыщенного водяного пара и его плотность при различных значениях температуры**

| $t$ , °С | $p_n$ , кПа | $\rho$ , $10^{-3}$ кг/м <sup>3</sup> | $t$ , °С | $p_n$ , кПа | $\rho$ , $10^{-3}$ кг/м <sup>3</sup> |
|----------|-------------|--------------------------------------|----------|-------------|--------------------------------------|
| −10      | 0,260       | 2,14                                 | 11       | 1,306       | 10,0                                 |
| −5       | 0,401       | 3,24                                 | 12       | 1,399       | 10,7                                 |
| −4       | 0,437       | 3,51                                 | 13       | 1,492       | 11,4                                 |
| −3       | 0,476       | 3,81                                 | 14       | 1,599       | 12,1                                 |
| −2       | 0,517       | 4,13                                 | 15       | 1,706       | 12,8                                 |
| −1       | 0,563       | 4,47                                 | 16       | 1,813       | 13,6                                 |
| 0        | 0,613       | 4,80                                 | 17       | 1,933       | 14,5                                 |
| 1        | 0,653       | 5,20                                 | 18       | 2,066       | 15,4                                 |
| 2        | 0,706       | 5,60                                 | 19       | 2,199       | 16,3                                 |
| 3        | 0,760       | 6,00                                 | 20       | 2,333       | 17,3                                 |
| 4        | 0,813       | 6,40                                 | 21       | 2,493       | 18,3                                 |
| 5        | 0,880       | 6,80                                 | 22       | 2,639       | 19,4                                 |
| 6        | 0,933       | 7,30                                 | 23       | 2,813       | 20,6                                 |
| 7        | 1,000       | 7,80                                 | 24       | 2,986       | 21,8                                 |
| 8        | 1,066       | 8,30                                 | 25       | 3,173       | 23,0                                 |
| 9        | 1,146       | 8,80                                 | 26       | 3,359       | 24,4                                 |
| 10       | 1,226       | 9,40                                 | 27       | 3,559       | 25,8                                 |

Продолжение

| $t, ^\circ\text{C}$ | $p_n, \text{кПа}$ | $\rho, 10^{-3} \text{кг/м}^3$ | $t, ^\circ\text{C}$ | $p_n, \text{кПа}$ | $\rho, 10^{-3} \text{кг/м}^3$ |
|---------------------|-------------------|-------------------------------|---------------------|-------------------|-------------------------------|
| 28                  | 3,786             | 27,2                          | 60                  | 19,92             | 130,0                         |
| 29                  | 3,999             | 28,7                          | 80                  | 47,33             | 293                           |
| 30                  | 4,239             | 30,3                          | 100                 | 101,3             | 598                           |
| 40                  | 7,371             | 51,2                          | 120                 | 198,5             | 1123                          |
| 50                  | 12,33             | 83,0                          | 160                 | 618,0             | 3259                          |
|                     |                   |                               | 200                 | 1554              | 7763                          |

### VIII. Температура кипения и критические параметры некоторых веществ

| Вещество       | Температура кипения<br>$t, ^\circ\text{C}$ | Критические                                    |                                             |
|----------------|--------------------------------------------|------------------------------------------------|---------------------------------------------|
|                |                                            | температура<br>$t_{\text{кр}}, ^\circ\text{C}$ | давление<br>$p_{\text{кр}}, 10^5 \text{Па}$ |
| Вода           | 100                                        | 374,2                                          | 218,5                                       |
| Спирт этиловый | 78                                         | 243,1                                          | 63                                          |
| Эфир этиловый  | 35                                         | 193,8                                          | 35,6                                        |
| Ксенон         | -108                                       | 18,76                                          | 57,64                                       |
| Кислород       | -183                                       | -118,4                                         | 49,7                                        |
| Аргон          | -186                                       | -122,4                                         | 48                                          |
| Криптон        | -193                                       | -63,62                                         | 54,27                                       |
| Азот           | -196                                       | -147,1                                         | 33,5                                        |
| Водород        | -253                                       | -241                                           | 12,8                                        |
| Гелий          | -269                                       | -267,9                                         | 2,25                                        |

### IX. Психрометрическая таблица

| Показания сухого термометра |                  | Разность показаний сухого и влажного термометров |    |    |    |    |    |    |    |    |   |    |    |
|-----------------------------|------------------|--------------------------------------------------|----|----|----|----|----|----|----|----|---|----|----|
| К                           | $^\circ\text{C}$ | 0                                                | 1  | 2  | 3  | 4  | 5  | 6  | 7  | 8  | 9 | 10 | 11 |
| 273                         | 0                | 100                                              | 82 | 63 | 45 | 28 | 11 |    |    |    |   |    |    |
|                             | 1                | 100                                              | 83 | 65 | 48 | 32 | 16 |    |    |    |   |    |    |
|                             | 2                | 100                                              | 84 | 68 | 51 | 35 | 20 |    |    |    |   |    |    |
|                             | 3                | 100                                              | 84 | 69 | 54 | 39 | 24 | 10 |    |    |   |    |    |
| 278                         | 4                | 100                                              | 85 | 70 | 56 | 42 | 28 | 14 |    |    |   |    |    |
|                             | 5                | 100                                              | 86 | 72 | 58 | 45 | 32 | 19 | 6  |    |   |    |    |
|                             | 6                | 100                                              | 86 | 73 | 60 | 47 | 35 | 23 | 10 |    |   |    |    |
|                             | 7                | 100                                              | 87 | 74 | 61 | 49 | 37 | 26 | 14 |    |   |    |    |
|                             | 8                | 100                                              | 87 | 75 | 63 | 51 | 40 | 28 | 18 | 7  |   |    |    |
|                             | 9                | 100                                              | 88 | 76 | 64 | 53 | 42 | 31 | 21 | 11 |   |    |    |

Продолжение

| Показания<br>сухого<br>термометра |    | Разность показаний сухого и влажного термометров |    |    |    |    |    |    |    |    |    |    |    |
|-----------------------------------|----|--------------------------------------------------|----|----|----|----|----|----|----|----|----|----|----|
| К                                 | °C | 0                                                | 1  | 2  | 3  | 4  | 5  | 6  | 7  | 8  | 9  | 10 | 11 |
| 283                               | 10 | 100                                              | 88 | 76 | 65 | 54 | 44 | 34 | 24 | 14 | 4  |    |    |
|                                   | 11 | 100                                              | 88 | 77 | 66 | 56 | 46 | 36 | 26 | 17 | 8  |    |    |
|                                   | 12 | 100                                              | 89 | 78 | 68 | 57 | 48 | 38 | 29 | 20 | 11 |    |    |
|                                   | 13 | 100                                              | 89 | 79 | 69 | 59 | 49 | 40 | 31 | 23 | 14 | 6  |    |
| 288                               | 14 | 100                                              | 90 | 79 | 70 | 60 | 51 | 42 | 33 | 25 | 17 | 9  |    |
|                                   | 15 | 100                                              | 90 | 80 | 71 | 61 | 52 | 44 | 36 | 27 | 20 | 12 | 5  |
|                                   | 16 | 100                                              | 90 | 81 | 71 | 62 | 54 | 45 | 37 | 30 | 22 | 15 | 8  |
|                                   | 17 | 100                                              | 90 | 81 | 72 | 64 | 55 | 47 | 39 | 32 | 24 | 17 | 10 |
| 293                               | 18 | 100                                              | 91 | 82 | 73 | 64 | 56 | 48 | 41 | 34 | 26 | 20 | 13 |
|                                   | 19 | 100                                              | 91 | 82 | 74 | 65 | 58 | 50 | 43 | 35 | 29 | 22 | 15 |
|                                   | 20 | 100                                              | 91 | 83 | 74 | 66 | 59 | 51 | 44 | 37 | 30 | 24 | 18 |
|                                   | 21 | 100                                              | 91 | 83 | 75 | 67 | 60 | 52 | 46 | 39 | 32 | 26 | 20 |
| 298                               | 22 | 100                                              | 92 | 83 | 76 | 68 | 61 | 54 | 47 | 40 | 34 | 28 | 22 |
|                                   | 23 | 100                                              | 92 | 84 | 76 | 69 | 61 | 55 | 48 | 42 | 36 | 30 | 24 |
|                                   | 24 | 100                                              | 92 | 84 | 77 | 69 | 62 | 56 | 49 | 43 | 37 | 31 | 26 |
|                                   | 25 | 100                                              | 92 | 84 | 77 | 70 | 63 | 57 | 50 | 44 | 38 | 33 | 27 |
| 303                               | 26 | 100                                              | 92 | 85 | 78 | 71 | 64 | 58 | 51 | 45 | 40 | 34 | 29 |
|                                   | 27 | 100                                              | 92 | 85 | 78 | 71 | 65 | 59 | 52 | 47 | 41 | 36 | 30 |
|                                   | 28 | 100                                              | 93 | 85 | 78 | 72 | 65 | 59 | 53 | 48 | 42 | 37 | 32 |
|                                   | 29 | 100                                              | 93 | 86 | 79 | 72 | 66 | 60 | 54 | 49 | 43 | 38 | 33 |
| 303                               | 30 | 100                                              | 93 | 86 | 79 | 73 | 67 | 61 | 55 | 50 | 44 | 39 | 34 |

**Х. Поверхностное натяжение некоторых жидкостей (при 293 К)**

| Вещество         | $\sigma$ , Н/м | Вещество              | $\sigma$ , Н/м |
|------------------|----------------|-----------------------|----------------|
| Ацетон           | 0,024          | Мыльный раствор       | 0,040          |
| Бензин           | 0,029          | Раствор сульфата меди | 0,074          |
| Вода             | 0,072          | Ртуть                 | 0,470          |
| Глицерин         | 0,059          | Скипидар              | 0,027          |
| Керосин          | 0,024          | Спирт этиловый        | 0,022          |
| Масло касторовое | 0,033          | Эфир этиловый         | 0,017          |

**XI. Модуль упругости некоторых веществ**

| Вещество | $E$ , ГПа | Вещество | $E$ , ГПа |
|----------|-----------|----------|-----------|
| Алюминий | 70        | Медь     | 130       |
| Бетон    | 20        | Свинец   | 17        |
| Железо   | 200       | Сталь    | 220       |
| Кирпич   | 28        | Чугун    | 90        |
| Латунь   | 110       |          |           |

## XII. Температура плавления и удельная теплота плавления твердых тел (при нормальном давлении)

| Вещество     | $t_{пл}, ^\circ\text{C}$ | $\lambda, 10^4 \text{ Дж/кг}$ | Вещество      | $t_{пл}, ^\circ\text{C}$ | $\lambda, 10^4 \text{ Дж/кг}$ |
|--------------|--------------------------|-------------------------------|---------------|--------------------------|-------------------------------|
| Алюминий     | 659                      | 38                            | Ртуть         | -39                      | 1,25                          |
| Вода, лед    | 0                        | 33,5                          | Свинец        | 327                      | 2,5                           |
| Вода тяжелая | 3,82                     | 31,6                          | Сера          | 112,8                    | 5,5                           |
| Вольфрам     | 3410                     | 2,6                           | Серебро       | 960                      | 8,8                           |
| Железо       | 1530                     | 2,7                           | Сплав Вуда *) | 60                       | 3,2                           |
| Золото       | 1064                     | 6,6                           | Сталь         | 1400                     | 21                            |
| Медь         | 1083                     | 18                            | Цинк          | 419                      | 11,8                          |
| Нафталин     | 80                       | 15,1                          | Чугун белый   | 1200                     | 13                            |
| Олово        | 232                      | 5,8                           | Чугун серый   | 1150                     | 9,7                           |

## XIII. Температурный коэффициент линейного расширения некоторых твердых тел

| Вещество      | $\alpha, \text{K}^{-1}$      | Вещество | $\alpha, \text{K}^{-1}$ |
|---------------|------------------------------|----------|-------------------------|
| Алюминий      | $2,3 \cdot 10^{-5}$          | Никель   | $1,28 \cdot 10^{-5}$    |
| дюралюминий   |                              | Олово    | $2,1 \cdot 10^{-5}$     |
| Бетон, цемент | $(10 \div 14) \cdot 10^{-6}$ | Платина  | $9 \cdot 10^{-6}$       |
| Бронза        | $1,8 \cdot 10^{-5}$          | Платинит | $9 \cdot 10^{-6}$       |
| Вольфрам      | $4 \cdot 10^{-6}$            | Свинец   | $2,9 \cdot 10^{-5}$     |
| Железо, сталь | $1,2 \cdot 10^{-5}$          | Стекло   | $9 \cdot 10^{-6}$       |
| Золото        | $1,4 \cdot 10^{-5}$          | Цинк     | $2,9 \cdot 10^{-5}$     |
| Инвар         | $6 \cdot 10^{-7}$            | Чугун    | $1,0 \cdot 10^{-5}$     |
| Латунь        | $1,9 \cdot 10^{-5}$          | Эбонит   | $7,0 \cdot 10^{-5}$     |
| Медь          | $1,7 \cdot 10^{-5}$          |          |                         |

## XIV. Температурный коэффициент объемного расширения некоторых жидкостей

| Вещество    | $\beta, \text{K}^{-1}$ | Вещество               | $\beta, \text{K}^{-1}$ |
|-------------|------------------------|------------------------|------------------------|
| Ацетон      | $1,2 \cdot 10^{-3}$    | Глицерин               | $5,0 \cdot 10^{-4}$    |
| Бензин      | $1,0 \cdot 10^{-3}$    | Керосин                | $1,0 \cdot 10^{-3}$    |
| Вода        |                        | Масло трансформаторное | $6,0 \cdot 10^{-4}$    |
| при 5-10 °C | $5,3 \cdot 10^{-3}$    | Нефть                  | $1,0 \cdot 10^{-3}$    |
| 10-20       | $1,5 \cdot 10^{-4}$    | Ртуть                  | $1,8 \cdot 10^{-4}$    |
| 20-40       | $3,02 \cdot 10^{-4}$   | Серная кислота         | $5,7 \cdot 10^{-4}$    |
| 40-60       | $4,58 \cdot 10^{-4}$   | Спирт этиловый         | $1,1 \cdot 10^{-3}$    |
| 60-80       | $5,87 \cdot 10^{-4}$   | Эфир этиловый          | $1,6 \cdot 10^{-3}$    |
| 80-100      | $7,02 \cdot 10^{-4}$   |                        |                        |

\*) В состав сплава Вуда с указанной температурой плавления входят 50% висмута, 25% свинца, по 12,5% олова и кадмия.

**XV. Диэлектрическая проницаемость некоторых веществ**

| Вещество               | $\epsilon$ | Вещество         | $\epsilon$ |
|------------------------|------------|------------------|------------|
| Анилин                 | 84         | Мрамор           | 8–9        |
| Бензин                 | 2,306      | Парафин          | 2,2        |
| Вакуум                 | 1          | Парафинированная | 2,0        |
| Вода (при 0 °C)        | 88         | бумага           |            |
| Вода                   | 81         | Резина           | 2–3        |
| Воздух                 |            |                  |            |
| при 1 атм              | 1,0006     | Сера             | 3,6–4,3    |
| при 100 атм            | 1,055      | Слюда            | 6–9        |
| Воск                   | 5,806      | Стекло           | 5–10       |
| Глицерин               | 39         | Фарфор           | 4–7        |
| Керосин                | 2          | Эбонит           | 2,7        |
| Лед (при –18 °C)       | 3,206      | Янтарь           | 2,8        |
| Масло трансформаторное | 2,2–2,5    |                  |            |

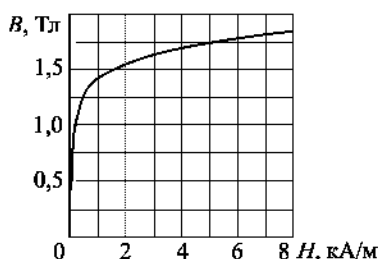
**XVI. Удельное сопротивление некоторых веществ**

| Вещество   | $\rho$ , Ом·м        | Вещество | $\rho$ , Ом·м                  |
|------------|----------------------|----------|--------------------------------|
| Алюминий   | $2,7 \cdot 10^{-8}$  | Олово    | $1,13 \cdot 10^{-7}$           |
| Вольфрам   | $5,3 \cdot 10^{-8}$  | Осмий    | $9,5 \cdot 10^{-8}$            |
| Железо     | $9,9 \cdot 10^{-8}$  | Платина  | $1,05 \cdot 10^{-7}$           |
| Золото     | $2,2 \cdot 10^{-8}$  | Реотан   | $4,5 \cdot 10^{-7}$            |
| Константан | $4,7 \cdot 10^{-7}$  | Ртуть    | $9,54 \cdot 10^{-7}$           |
| Латунь     | $6,3 \cdot 10^{-8}$  | Свинец   | $2,07 \cdot 10^{-7}$           |
| Манганин   | $3,9 \cdot 10^{-7}$  | Серебро  | $1,58 \cdot 10^{-8}$           |
| Медь       | $1,68 \cdot 10^{-8}$ | Уголь    | $(4,0 \div 5,0) \cdot 10^{-5}$ |
| Никелин    | $4,2 \cdot 10^{-7}$  | Фехраль  | $1,1 \cdot 10^{-6}$            |
| Никель     | $7,3 \cdot 10^{-8}$  | Цинк     | $5,95 \cdot 10^{-8}$           |
| Нихром     | $1,05 \cdot 10^{-6}$ |          |                                |

**XVII. Электрохимический эквивалент некоторых веществ**

| Вещество | $K$ , кг/Кл           | Вещество      | $K$ , кг/Кл           |
|----------|-----------------------|---------------|-----------------------|
| Алюминий | $9,32 \cdot 10^{-8}$  | Никель        | $3,04 \cdot 10^{-7}$  |
| Водород  | $1,044 \cdot 10^{-8}$ | двухвалентный |                       |
| Золото   | $6,81 \cdot 10^{-7}$  | Никель        | $2,03 \cdot 10^{-7}$  |
| Калий    | $4,052 \cdot 10^{-7}$ | трехвалентный |                       |
| Кальций  | $2,077 \cdot 10^{-7}$ | Ртуть         | $2,072 \cdot 10^{-6}$ |
| Кислород | $8,29 \cdot 10^{-8}$  | Свинец        | $1,074 \cdot 10^{-6}$ |
| Магний   | $1,26 \cdot 10^{-7}$  | Серебро       | $1,118 \cdot 10^{-6}$ |
| Медь     | $3,294 \cdot 10^{-7}$ | Хлор          | $3,67 \cdot 10^{-7}$  |
| Натрий   | $2,383 \cdot 10^{-7}$ | Цинк          | $3,388 \cdot 10^{-7}$ |

**XVIII. График зависимости индукции магнитного поля от напряженности в мягкой стали при ее первоначальном намагничивании**



**XIX. Температурный коэффициент сопротивления некоторых веществ**

| Вещество   | $\alpha, 10^{-4} \text{ K}^{-1}$ |
|------------|----------------------------------|
| Вольфрам   | 50                               |
| Константан | 0,05                             |
| Манганин   | 0,08                             |
| Никелин    | 1                                |
| Нихром     | 2                                |
| Реотан     | 4                                |
| Фехраль    | 2                                |

**XX. Показатель преломления некоторых веществ**

| Вещество      | $n$    | Вещество             | $n$     |
|---------------|--------|----------------------|---------|
| Алмаз         | 2,42   | Сахар                | 1,56    |
| Анилин        | 1,59   | Сероуглерод          | 1,63    |
| Ацетон        | 1,36   | Сильвин              | 1,49    |
| Бензол        | 1,50   | Скипидар             | 1,51    |
| Вода          | 1,33   | Спирт метиловый      | 1,33    |
| Воздух        | 1,0003 | Спирт этиловый       | 1,36    |
| Глицерин      | 1,47   | Стекло (легкий крон) | 1,50    |
| Каменная соль | 1,54   | Стекло (флинт)       | 1,6–1,8 |
| Кварц         | 1,54   | Тетрахлорид углерода | 1,46    |

**XXI. Энергия связи атомных ядер**

| Ядро              | $E_{\text{св}}, \text{ МэВ}$ | Ядро                   | $E_{\text{св}}, \text{ МэВ}$ | Ядро                   | $E_{\text{св}}, \text{ МэВ}$ |
|-------------------|------------------------------|------------------------|------------------------------|------------------------|------------------------------|
| $^2_1\text{H}$    | 2,2                          | $^{20}_{10}\text{Ne}$  | 160,6                        | $^{222}_{86}\text{Rn}$ | 1708,2                       |
| $^3_1\text{H}$    | 8,5                          | $^{23}_{11}\text{Na}$  | 186,6                        | $^{226}_{88}\text{Ra}$ | 1731,6                       |
| $^3_2\text{He}$   | 7,7                          | $^{24}_{12}\text{Mg}$  | 198,3                        | $^{228}_{89}\text{Ac}$ | 1741,6                       |
| $^4_2\text{He}$   | 28,3                         | $^{27}_{13}\text{Al}$  | 225,0                        | $^{228}_{90}\text{Th}$ | 1743,0                       |
| $^6_3\text{Li}$   | 32,0                         | $^{30}_{14}\text{Si}$  | 255,2                        | $^{232}_{90}\text{Th}$ | 1766,5                       |
| $^7_3\text{Li}$   | 39,2                         | $^{30}_{15}\text{P}$   | 250,6                        | $^{234}_{90}\text{Th}$ | 1777,7                       |
| $^9_4\text{Be}$   | 58,2                         | $^{31}_{15}\text{P}$   | 262,9                        | $^{233}_{92}\text{U}$  | 1771,8                       |
| $^{10}_5\text{B}$ | 64,7                         | $^{56}_{26}\text{Fe}$  | 492,2                        | $^{235}_{92}\text{U}$  | 1783,8                       |
| $^{11}_5\text{B}$ | 76,2                         | $^{64}_{30}\text{Zn}$  | 559,1                        | $^{236}_{92}\text{U}$  | 1790,2                       |
| $^{12}_6\text{C}$ | 92,2                         | $^{130}_{50}\text{Sn}$ | 1020,6                       | $^{238}_{92}\text{U}$  | 1801,7                       |
| $^{13}_6\text{C}$ | 97,1                         | $^{138}_{56}\text{Ba}$ | 1158,5                       | $^{239}_{92}\text{U}$  | 1806,5                       |
| $^{14}_7\text{N}$ | 104,7                        | $^{139}_{57}\text{La}$ | 1164,8                       | $^{239}_{93}\text{Np}$ | 1807,0                       |
| $^{16}_8\text{O}$ | 127,6                        | $^{206}_{82}\text{Pb}$ | 1622,3                       | $^{239}_{94}\text{Pu}$ | 1806,9                       |
| $^{17}_8\text{O}$ | 131,8                        | $^{208}_{82}\text{Pb}$ | 1636,4                       | $^{240}_{94}\text{Pu}$ | 1813,3                       |

**XXII. Масса атомов некоторых изотопов**

| Символ изотопа    | Масса, а.е.м. | Символ изотопа          | Масса, а.е.м. |
|-------------------|---------------|-------------------------|---------------|
| ${}^1_1\text{H}$  | 1,00782       | ${}^7_3\text{Li}$       | 7,01600       |
| ${}^2_1\text{H}$  | 2,01410       | ${}^9_4\text{Be}$       | 9,01219       |
| ${}^3_1\text{H}$  | 3,01605       | ${}^{12}_6\text{C}$     | 12,0000       |
| ${}^3_2\text{He}$ | 3,01603       | ${}^{14}_7\text{N}$     | 14,00307      |
| ${}^4_2\text{He}$ | 4,00260       | ${}^{17}_8\text{O}$     | 16,9991       |
| ${}^6_3\text{Li}$ | 6,01513       | ${}^{235}_{92}\text{U}$ | 235,0439      |

**XXIII. Некоторые астрономические величины**

(приведены средние значения величин)

|                                          |                         |
|------------------------------------------|-------------------------|
| Радиус Земли                             | $6,37 \cdot 10^6$ м     |
| Масса Земли                              | $5,98 \cdot 10^{24}$ кг |
| Радиус Солнца                            | $6,95 \cdot 10^8$ м     |
| Масса Солнца                             | $1,98 \cdot 10^{30}$ кг |
| Радиус Луны                              | $1,74 \cdot 10^6$ м     |
| Масса Луны                               | $7,33 \cdot 10^{22}$ кг |
| Расстояние между центрами Земли и Солнца | $1,49 \cdot 10^{11}$ м  |
| Расстояние между центрами Земли и Луны   | $3,84 \cdot 10^8$ м     |
| Период обращения Луны вокруг Земли       | 27,3 сут                |

**XXIV. Сведения о некоторых ярких звездах, видимых в России**

| Звезда                        | Звездная величина $m$ | Прямое восхождение $\alpha$ | Склонение $\delta$ |
|-------------------------------|-----------------------|-----------------------------|--------------------|
| $\alpha$ Тельца (Альдебаран)  | 1,06                  | 4 ч 31 мин 54 с             | $+16^\circ 22,2'$  |
| $\beta$ Ориона (Ригель)       | 0,34                  | 5 ч 11 мин 10 с             | $-8^\circ 16,9'$   |
| $\alpha$ Возничего (Капелла)  | 0,21                  | 5 ч 11 мин 31 с             | $+45^\circ 55,7'$  |
| $\alpha$ Ориона (Бетельгейзе) | 0,92                  | 5 ч 51 мин 23 с             | $+7^\circ 23,7'$   |
| $\alpha$ Б. Пса (Сириус)      | -1,58                 | 6 ч 42 мин 4 с              | $-16^\circ 37,1'$  |
| $\alpha$ Близнецов (Кастор)   | 1,99                  | 7 ч 30 мин 8 с              | $+32^\circ 2,6'$   |
| $\alpha$ Лиры (Вега)          | 0,14                  | 18 ч 34 мин 34 с            | $+34^\circ 43,1'$  |
| $\alpha$ Лебедя (Денеб)       | 1,33                  | 20 ч 39 мин 3 с             | $+45^\circ 1,8'$   |

**XXV. Алфавит греческий**

|                          |                    |                        |                        |
|--------------------------|--------------------|------------------------|------------------------|
| $A\alpha$ — альфа        | $\eta$ — эта       | $\nu$ — ню             | $\tau$ — тау           |
| $B\beta$ — бета          | $\theta$ — тета    | $\xi$ — кси            | $\upsilon$ — ипсилон   |
| $\Gamma\gamma$ — гамма   | $\iota$ — йота     | $\omicron$ — омикрон   | $\Phi\phi$ — фи        |
| $\Delta\delta$ — дельта  | $\kappa$ — каппа   | $\pi$ — пи             | $\chi\xi$ — хи         |
| $E\varepsilon$ — эпсилон | $\lambda$ — ламбда | $\rho$ — ро            | $\Psi\psi$ — пси       |
| $Z\zeta$ — дзета         | $\mu$ — мю         | $\Sigma\sigma$ — сигма | $\Omega\omega$ — омега |



**XXVI. Приставки для образования кратных и дольных единиц**

| Кратность и дольность                  | Приставки |             |
|----------------------------------------|-----------|-------------|
|                                        | Название  | Обозначение |
| $1\,000\,000\,000\,000\,000 = 10^{15}$ | пета      | П           |
| $1\,000\,000\,000\,000 = 10^{12}$      | тера      | Т           |
| $1\,000\,000\,000 = 10^9$              | гига      | Г           |
| $1\,000\,000 = 10^6$                   | мега      | М           |
| $1\,000 = 10^3$                        | кило      | к           |
| $100 = 10^2$                           | гекто     | г           |
| $10 = 10^1$                            | дека      | да          |
| $0,1 = 10^{-1}$                        | деци      | д           |
| $0,01 = 10^{-2}$                       | санتي     | с           |
| $0,001 = 10^{-3}$                      | милли     | м           |
| $0,000\,001 = 10^{-6}$                 | микро     | мк          |
| $0,000\,000\,001 = 10^{-9}$            | нано      | н           |
| $0,000\,000\,000\,001 = 10^{-12}$      | пико      | п           |
| $0,000\,000\,000\,000\,001 = 10^{-15}$ | фемто     | ф           |

**Б. НЕКОТОРЫЕ МАТЕМАТИЧЕСКИЕ ФОРМУЛЫ****Алгебра**

1.  $(a+b)^2 = a^2 + 2ab + b^2$ ;  $(a-b)^2 = a^2 - 2ab + b^2$ ;  
 $(a+b)^3 = a^3 + 3a^2b + 3ab^2 + b^3$ ;  $(a-b)^3 = a^3 - 3a^2b + 3ab^2 - b^3$ ;  
 $a^2 - b^2 = (a-b)(a+b)$ ;  $a^3 - b^3 = (a-b)(a^2 + ab + b^2)$ ;  
 $a^3 + b^3 = (a+b)(a^2 - ab + b^2)$ .

2. Следующее неравенство означает, что среднее арифметическое больше или равно среднему геометрическому:

$$\frac{a+b}{2} \geq \sqrt{ab}, \quad a \geq 0, b \geq 0.$$

Равенство достигается при  $a = b$ .

3. Если дано квадратное уравнение в общем виде:

$$ax^2 + bx + c = 0,$$

то два решения его можно найти по формуле

$$x_{1,2} = \frac{-b \pm \sqrt{b^2 - 4ac}}{2a} \quad \text{или} \quad x_{1,2} = \frac{-b/2 \pm \sqrt{(b/2)^2 - ac}}{a}.$$

Последнюю формулу удобно употреблять при четном  $b$ . Для приведенного квадратного уравнения  $x^2 + px + q = 0$  два решения определяются формулой

$$x_{1,2} = -p/2 \pm \sqrt{p^2/4 - q}.$$

4. Пусть дана система двух уравнений с двумя неизвестными:

$$a_1x + b_1y = c_1, \quad a_2x + b_2y = c_2.$$

Для того чтобы найти решение этой системы, надо из одного уравнения (например, из первого) выразить одно неизвестное через другое (например,  $y$  через  $x$ ) и подставить в другое уравнение:

$$y = (c_1 - a_1x)/b_1, \quad a_2x + b_2(c_1 - a_1x)/b_1 = c_2.$$

Решая это уравнение, получаем

$$x = \frac{c_1b_2 - c_2b_1}{a_1b_2 - a_2b_1}.$$

Подставляя  $x$  в выражение для  $y$ , определяем  $y$ :

$$y = \frac{a_1c_2 - a_2c_1}{a_1b_2 - a_2b_1}.$$

Для системы большего числа уравнений метод решения остается тем же самым; из какого-нибудь уравнения выражаем одно неизвестное и подставляем во все остальные уравнения. После этого количество уравнений и неизвестных уменьшается на единицу. Затем исключаем таким же образом по очереди остальные неизвестные, пока не останется одно уравнение с одним неизвестным, которое легко находится. Остальные неизвестные находим в обратном порядке.

5. Приведем некоторые формулы приближенного вычисления. Если  $\varepsilon \ll 1$  (по крайней мере в 10 раз), тогда

$$\begin{aligned} \frac{1}{1+\varepsilon} &= 1-\varepsilon, & \frac{1}{1-\varepsilon} &= 1+\varepsilon; \\ (1+\varepsilon)^2 &= 1+2\varepsilon; & (1-\varepsilon)^2 &= 1-2\varepsilon; & \sqrt{1+\varepsilon} &= 1+\varepsilon/2; \\ (1+\varepsilon)^3 &= 1+3\varepsilon; & (1-\varepsilon)^3 &= 1-3\varepsilon; & \sqrt{1-\varepsilon} &= 1-\varepsilon/2. \end{aligned}$$

Пользуясь этими формулами, можно легко производить некоторые вычисления с достаточно большой точностью. Например,

$$\begin{aligned} \sqrt{\frac{1}{3,96}} &= \sqrt{\frac{1}{4-0,04}} = \sqrt{\frac{1}{4(1-0,04/4)}} = \frac{1}{2\sqrt{1-0,01}} = \frac{1}{2(1-0,01/2)} = \\ &= \frac{1}{2} \frac{1}{1-0,005} = \frac{1}{2} (1+0,005) = 0,5025. \end{aligned}$$

## Геометрия

1. Пусть дан прямоугольный треугольник с катетами  $a$ ,  $b$  и гипотенузой  $c$ . Тогда  $a^2 + b^2 = c^2$ .

2. Площадь треугольника равна  $S = \frac{1}{2}ah$ , где  $h$  — высота, опущенная на сторону  $a$  из противоположной вершины.

Площадь прямоугольника со сторонами  $a$  и  $b$ :  $S = ab$ .

Площадь трапеции с основаниями  $a$  и  $b$  и высотой  $h$ :  $S = \frac{1}{2}(a+b)h$ .

Площадь круга радиусом  $r$ :  $S = \pi r^2$ .

3. Площадь поверхности и объем шара радиусом  $r$ :

$$S = 4\pi r^2; \quad V = \frac{4}{3}\pi r^3.$$

Площадь боковой поверхности прямого цилиндра, у которого  $r$  — радиус основания и  $h$  — образующая, она же высота:

$$S = 2\pi r h.$$

Площадь полной поверхности и объем прямого цилиндра:

$$S = 2\pi r(r + h); \quad V = \pi r^2 h.$$

## Тригонометрия

1. Функции суммы и разности углов:

$$\sin(\alpha + \beta) = \sin \alpha \cdot \cos \beta + \cos \alpha \cdot \sin \beta;$$

$$\cos(\alpha + \beta) = \cos \alpha \cdot \cos \beta - \sin \alpha \cdot \sin \beta;$$

$$\sin(\alpha - \beta) = \sin \alpha \cdot \cos \beta - \cos \alpha \cdot \sin \beta;$$

$$\cos(\alpha - \beta) = \cos \alpha \cdot \cos \beta + \sin \alpha \cdot \sin \beta.$$

2. Функции двойного угла:

$$\sin 2\alpha = 2 \sin \alpha \cdot \cos \alpha; \quad \cos 2\alpha = \cos^2 \alpha - \sin^2 \alpha.$$

3. Функции половинного угла:

$$2 \sin^2(\alpha/2) = 1 - \cos \alpha; \quad 2 \cos^2(\alpha/2) = 1 + \cos \alpha.$$

4. Сумма и разность функций:

$$\sin \alpha + \sin \beta = 2 \sin \frac{\alpha + \beta}{2} \cdot \cos \frac{\alpha - \beta}{2}; \quad \cos \alpha + \cos \beta = 2 \cos \frac{\alpha + \beta}{2} \cdot \cos \frac{\alpha - \beta}{2};$$

$$\sin \alpha - \sin \beta = 2 \cos \frac{\alpha + \beta}{2} \cdot \sin \frac{\alpha - \beta}{2}; \quad \cos \alpha - \cos \beta = 2 \sin \frac{\alpha + \beta}{2} \cdot \sin \frac{\alpha - \beta}{2}.$$

5. Выражение функции через тангенс:

$$\sin \alpha = \frac{\operatorname{tg} \alpha}{\sqrt{1 + \operatorname{tg}^2 \alpha}}; \quad \cos \alpha = \frac{1}{\sqrt{1 + \operatorname{tg}^2 \alpha}}.$$

6. Теорема косинусов для произвольного треугольника со сторонами  $a, b, c$ :

$$a^2 = b^2 + c^2 - 2bc \cos A,$$

где  $A$  — угол, лежащий против стороны  $a$ .

Теорема синусов:

$$\frac{a}{\sin A} = \frac{b}{\sin B} = \frac{c}{\sin C},$$

где  $A, B, C$  — углы, лежащие против сторон  $a, b, c$  соответственно.

7. Для  $\varepsilon \ll 1$ :

$$\sin \varepsilon = \varepsilon; \quad \cos \varepsilon = 1; \quad \operatorname{tg} \varepsilon = \varepsilon, \quad \text{где } \varepsilon \text{ дан в радианах.}$$

8. Производные и интегралы:

$$(x^n)' = nx^{n-1}; \quad (\sin x)' = \cos x; \quad \int \frac{dx}{x} = \ln |x|;$$

$$\left(\frac{1}{x^n}\right)' = -\frac{n}{x^{n+1}}; \quad (\cos x)' = -\sin x; \quad \int \sin x \, dx = -\cos x;$$

$$(\sqrt{x})' = \frac{1}{2\sqrt{x}}; \quad \int x^n \, dx = \frac{x^{n+1}}{n+1}; \quad \int \cos x \, dx = \sin x.$$

## Значения синусов и тангенсов для углов 0–90°

| Угол, град | Синус  | Тангенс | Угол, град | Синус  | Тангенс |
|------------|--------|---------|------------|--------|---------|
| 0          | 0,0000 | 0,0000  | 46         | 0,7193 | 1,036   |
| 1          | 0,0175 | 0,0175  | 47         | 0,7314 | 1,072   |
| 2          | 0,0349 | 0,0349  | 48         | 0,7431 | 1,111   |
| 3          | 0,0523 | 0,0524  | 49         | 0,7574 | 1,150   |
| 4          | 0,0698 | 0,0699  | 50         | 0,7660 | 1,192   |
| 5          | 0,0872 | 0,0875  | 51         | 0,7771 | 1,235   |
| 6          | 0,1045 | 0,1051  | 52         | 0,7880 | 1,280   |
| 7          | 0,1219 | 0,1228  | 53         | 0,7986 | 1,327   |
| 8          | 0,1392 | 0,1405  | 54         | 0,8090 | 1,376   |
| 9          | 0,1564 | 0,1584  | 55         | 0,8192 | 1,428   |
| 10         | 0,1736 | 0,1763  | 56         | 0,8290 | 1,483   |
| 11         | 0,1908 | 0,1944  | 57         | 0,8387 | 1,540   |
| 12         | 0,2079 | 0,2126  | 58         | 0,8480 | 1,600   |
| 13         | 0,2250 | 0,2309  | 59         | 0,8572 | 1,664   |
| 14         | 0,2419 | 0,2493  | 60         | 0,8660 | 1,732   |
| 15         | 0,2588 | 0,2679  | 61         | 0,8746 | 1,804   |
| 16         | 0,2756 | 0,2867  | 62         | 0,8829 | 1,881   |
| 17         | 0,2924 | 0,3057  | 63         | 0,8910 | 1,963   |
| 18         | 0,3090 | 0,3249  | 64         | 0,8988 | 2,050   |
| 19         | 0,3256 | 0,3443  | 65         | 0,9063 | 2,145   |
| 20         | 0,3420 | 0,3640  | 66         | 0,9135 | 2,246   |
| 21         | 0,3584 | 0,3839  | 67         | 0,9205 | 2,356   |
| 22         | 0,3746 | 0,4040  | 68         | 0,9272 | 2,475   |
| 23         | 0,3907 | 0,4245  | 69         | 0,9336 | 2,605   |
| 24         | 0,4067 | 0,4452  | 70         | 0,9397 | 2,747   |
| 25         | 0,4226 | 0,4663  | 71         | 0,9455 | 2,904   |
| 26         | 0,4384 | 0,4877  | 72         | 0,9511 | 3,078   |
| 27         | 0,4540 | 0,5095  | 73         | 0,9563 | 3,271   |
| 28         | 0,4695 | 0,5317  | 74         | 0,9631 | 3,487   |
| 29         | 0,4848 | 0,5543  | 75         | 0,9659 | 3,732   |
| 30         | 0,5000 | 0,5774  | 76         | 0,9703 | 4,011   |
| 31         | 0,5150 | 0,6009  | 77         | 0,9744 | 4,331   |
| 32         | 0,5299 | 0,6249  | 78         | 0,9781 | 4,705   |
| 33         | 0,5446 | 0,6494  | 79         | 0,9816 | 5,145   |
| 34         | 0,5592 | 0,6745  | 80         | 0,9848 | 5,671   |
| 35         | 0,5736 | 0,7002  | 81         | 0,9877 | 6,314   |
| 36         | 0,5878 | 0,7265  | 82         | 0,9903 | 7,115   |
| 37         | 0,6018 | 0,7536  | 83         | 0,9925 | 8,144   |
| 38         | 0,6157 | 0,7813  | 84         | 0,9945 | 9,514   |
| 39         | 0,6293 | 0,8098  | 85         | 0,9962 | 11,43   |
| 40         | 0,6428 | 0,8391  | 86         | 0,9976 | 14,30   |
| 41         | 0,6561 | 0,8693  | 87         | 0,9986 | 19,08   |
| 42         | 0,6691 | 0,9004  | 88         | 0,9994 | 28,64   |
| 43         | 0,6820 | 0,9325  | 89         | 0,9998 | 57,29   |
| 44         | 0,6947 | 0,9657  | 90         | 1,0000 |         |
| 45         | 0,7071 | 1,0000  |            |        |         |

Учебное издание

*ГЛАДКОВА Римма Александровна*

*ЦОДИКОВ Фридрих Семенович*

## **ЗАДАЧИ И ВОПРОСЫ ПО ФИЗИКЕ**

Редактор *Д.А. Миртова*

Оригинал-макет: *В.В. Затекин*

Оформление переплета: *А.Ю. Алехина*

Подписано в печать 11.11.05. Формат 60×90/16. Бумага офсетная.  
Печать офсетная. Усл. печ. л. 24. Уч.-изд. л. 28,6. Тираж 2000 экз.  
Заказ №

Издательская фирма «Физико-математическая литература»

МАИК «Наука/Интерпериодика»

117997, Москва, ул. Профсоюзная, 90

E-mail: [fizmat@maik.ru](mailto:fizmat@maik.ru), [fmisale@maik.ru](mailto:fmisale@maik.ru);

<http://www.fml.ru>

Отпечатано с готовых диапозитивов  
в ОАО «Чебоксарская типография № 1»  
428019, г. Чебоксары, пр. И. Яковлева, 15

ISBN 5-9221-0637-6



9 785922 106375