Оглавление

От авторов 5

Глава I Теоретический материал для подготовки к ЕГЭ 6
§ 1. Механика 6
1.1. Кинематика 6
1.2. Динамика 10
1.3. Статика и гидростатика 13
1.4. Законы сохранения в механике 15
1.5. Механические колебания и волны 17
§ 2. Молекулярная физика. Термодинамика 19
2.1. Молекулярная физика 19
2.2. Термодинамика 23
§ 3. Электродинамика 26
3.1. Электростатика 26
3.2. Электроёмкость. Конденсаторы. Энергия электрического поля 28
3.3. Постоянный ток 29
3.4. Магнитостатика 32
3.5. Электромагнитная индукция 33
3.6. Электромагнитные колебания и волны 34
§ 4. Оптика 36
4.1. Геометрическая оптика 36
4.2. Волновая оптика 41
§ 5. Квантовая физика 43
5.1. Фотоны. Фотоэффект 43
5.2. Атомная физика 45
5.3. Ядерная физика 46
Краткие справочные данные 48

Глава II Тренировочные варианты 50
Инструкция по выполнению работы 50
Вариант № 1 52
Вариант № 2 63
Вариант № 3 74
Вариант № 4 83
Вариант № 5 92
Вариант № 6 102
Вариант № 7 112

Вариант № 8 121
Вариант № 9 131
Вариант № 10 141
Вариант № 11 150
Вариант № 12 160
Вариант № 13 170
Вариант № 14 179
Вариант № 15 189
Вариант № 16 199
Вариант № 17 209
Вариант № 18 218
Вариант № 19 228
Вариант № 20 237
Вариант № 21 246
Вариант № 22 255
Вариант № 23 263
Вариант № 24 273
Вариант № 25 282
Вариант № 26 292
Вариант № 27 302
Вариант № 28 312
Вариант № 29 321
Вариант № 30 329

Примеры выполнения заданий с развёрнутым ответом 337

Ответы 461

§ 2. Молекулярная физика. Термодинамика

2.1. Молекулярная физика

Основные положения молекулярно-кинетической теории (МКТ) заключаются в следующем:

1. Вещества состоят из атомов и молекул.

2. Атомы и молекулы находятся в непрерывном хаотическом движении. Этот процесс называется *тепловым движением*.

3. Атомы и молекулы взаимодействуют между собой с силами притяжения и отталкивания.

Характер движения и взаимодействия молекул может быть разным, в связи с этим принято различать 3 агрегатных состояния вещества: *твёрдое, жидкое и газообразное*. Наиболее сильно взаимодействие между молекулами в твёрдых телах. В них молекулы расположены в так называемых узлах кристаллической решётки, т. е. в положениях, при которых равны силы притяжения и отталкивания между молекулами. Движение молекул в твёрдых телах сводится к колебательному около этих положений равновесия. В жидкостях ситуация отличается тем, что, поколебавшись около каких-то положений равновесия, молекулы часто их меняют. В газах молекулы далеки друг от друга, поэтому силы взаимодействия между ними очень малы и молекулы движутся поступательно, изредка сталкиваясь между собой и со стенками сосуда, в котором они находятся.

Диффузией называют взаимное проникновение одних молекул между другими молекулами.

Броуновским движением называют непрерывное хаотическое движение взвешенных в жидкости или газе частиц под действием ударов молекул растворителя.

Относительной молекулярной массой M_r называют отношение массы m_o молекулы к $1/12$ массы атома углерода m_{oc}.

Количество вещества в молекулярной физике принято измерять в молях.

Молем ν называется количество вещества, в котором содержится столько же атомов или молекул (структурных единиц), сколько их содержится в 12 г углерода. Это число атомов в 12 г углерода называется *числом Авогадро* $N_A = 6{,}023 \cdot 10^{23}$ моль$^{-1}$.

Молярная масса $M = M_r \cdot 10^{-3}$ *кг/моль* — это масса одного моля вещества.

Количество молей в веществе можно рассчитать по формуле

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

Идеальный газ — это газ, взаимодействие между молекулами которого пренебрежимо мало. В идеальном газе пренебрегают размерами молекул.

Основное уравнение МКТ устанавливает связь давления идеального газа с массой молекул, концентрацией и средним значением квадрата скорости молекулы:

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

где $n = \frac{N}{V}$ — концентрация молекул, m_0 — масса одной молекулы, $\overline{v^2}$ — среднее значение квадрата скорости.

Средняя кинетическая энергия поступательного движения молекулы газа

$$\bar{E}_\text{к} = \frac{m_0 \overline{v^2}}{2}.$$

Тогда основное уравнение МКТ можно записать так:

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

Абсолютным нулём температуры называют предельную температуру, при которой давление идеального газа обращается в ноль, т. е. это температура, при которой прекращается тепловое движение молекул.

Абсолютная температурная шкала — это температурная шкала, в которой за начало отсчёта принят абсолютный ноль температур. Эту шкалу предложил английский учёный Кельвин. Между шкалами Кельвина и Цельсия существует следующая связь: $T\ \text{К} = t\ ^\circ\text{C} + 273$.

Связь средней кинетической энергии поступательного движения молекул газа и температуры

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

Средний квадрат скорости теплового движения молекул

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

где $k = 1{,}38 \cdot 10^{-23}$ Дж/К — постоянная Больцмана.

Средняя квадратичная скорость — корень квадратный из среднего квадрата скорости теплового движения молекул

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

Связь давления идеального газа с его концентрацией и температурой имеет вид:

$$p = nkT.$$

При одинаковом давлении и температуре концентрация молекул у всех газов одна и та же.

Уравнение состояния идеального газа (уравнение Менделеева — Клапейрона):

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

где $R = k \cdot N_A = 8{,}31$ Дж/(моль·К) — универсальная газовая постоянная.

Другие формы записи уравнения Менделеева — Клапейрона:

$$pV = \nu RT = NkT, \quad p = \frac{\rho RT}{M}.$$

Для любых термодинамических процессов, происходящих с газом постоянной массы, выполняется соотношение

$$\frac{p_1V_1}{T_1} = \frac{p_2V_2}{T_2} = const.$$

Изотермический процесс (закон Бойля — Мариотта):
для данной массы газа при неизменной температуре произведение давления на его объём есть величина постоянная

$$pV = const.$$

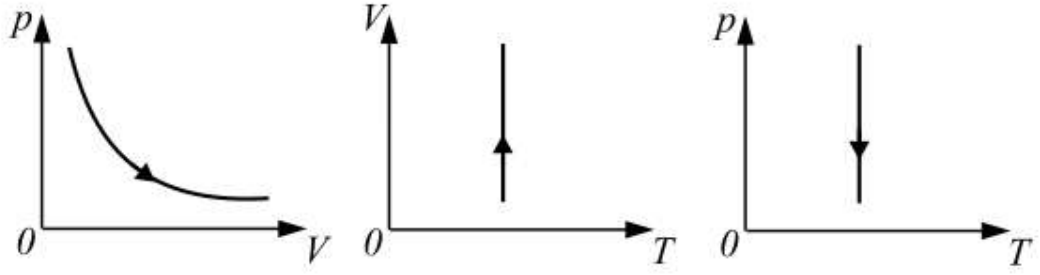


Рис. 6

Изохорный процесс (закон Шарля):
для данной массы газа при неизменном объёме отношение давления к температуре в градусах Кельвина есть величина постоянная

$$\frac{p}{T} = const.$$

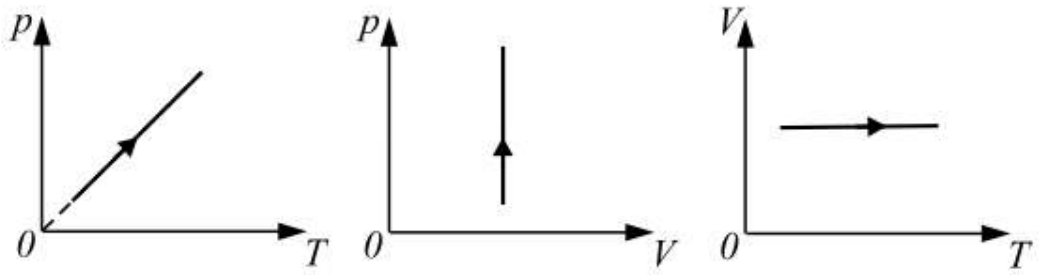


Рис. 7

Изобарный процесс (закон Гей-Люссака):
для данной массы газа при неизменном давлении отношение объёма газа к температуре в градусах Кельвина есть величина постоянная

$$\frac{V}{T} = const.$$

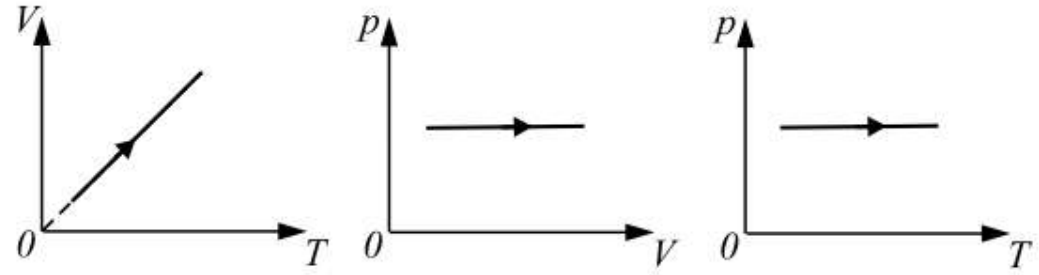


Рис. 8

Закон Дальтона:
если в сосуде находится смесь нескольких газов, то давление смеси равно сумме парциальных давлений, т. е. тех давлений, которые каждый газ создавал бы в отсутствие остальных:

$$p_{\text{общ.}} = p_1 + p_2 + p_3 + \ldots + p_n.$$

В воздухе, представляющем из себя смесь газов, наряду с другими газами находятся водяные пары. Их содержание принято характеризовать термином «влажность». Различают абсолютную и относительную влажность.

Абсолютной влажностью называют плотность водяных паров в воздухе — ρ ($[\rho] = \text{г/м}^3$). Можно характеризовать абсолютную влажность парциальным давлением водяных паров — p ($[p] =$ мм рт. ст.; Па).

Относительная влажность (φ) — отношение плотности водяного пара, имеющегося в воздухе, к плотности того водяного пара, который должен был бы содержаться в воздухе при этой температуре, чтобы пар был насыщенным. Можно измерять относительную влажность как отношение парциального давления водяного пара (p) к тому давлению ($p_{\text{н.п.}}$), которое имеет насыщенный пар при этой температуре:

$$\varphi = \frac{p}{p_{\text{н.п.}}} \cdot 100\,\% = \frac{\rho}{\rho_{\text{н.п.}}} \cdot 100\,\%.$$

2.2. Термодинамика

Внутренняя энергия тела равна сумме кинетических энергий беспорядочного движения всех молекул относительно центра масс тела и потенциальных энергий взаимодействия всех молекул друг с другом.

Внутренняя энергия идеального газа представляет собой сумму кинетических энергий беспорядочного движения его молекул; так как молекулы идеального газа не взаимодействуют друг с другом, то их потенциальная энергия обращается в нуль.

Внутренняя энергия одноатомного идеального газа

$$U = \frac{3}{2}\nu RT = \frac{3}{2}NkT = \frac{3}{2}\frac{m}{M}RT = \nu c_v T = \frac{3}{2}pV.$$

Количеством теплоты Q называют энергию, передаваемую газу в результате теплообмена.

Удельная теплоёмкость — это количество теплоты, которое получает или отдаёт 1 кг вещества при изменении его температуры на 1 К:

$$c = \frac{Q}{m\Delta T}, \qquad [c] = \frac{\text{Дж}}{\text{кг} \cdot \text{К}}.$$

При расширении газ совершает положительную работу, при сжатии — отрицательную. Работа A, совершаемая внешними телами над газом, отличается от работы газа A' только знаком:

$$A = -A'.$$

Графический смысл работы — это площадь под соответствующим графиком зависимости pV.

Закон сохранения энергии в тепловых процессах (первый закон термодинамики):
изменение внутренней энергии системы при переходе её из одного состояния в другое равно сумме работы внешних сил и количества теплоты, переданного системе:

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

Применение первого закона термодинамики к изопроцессам:

а) *изотермический процесс* $T = const \Rightarrow \Delta T = 0$.

В этом случае изменение внутренней энергии идеального газа

$$\Delta U = \frac{3}{2} R \Delta T = 0.$$

Следовательно, $Q = A'$.

Всё переданное газу тепло расходуется на совершение им работы против внешних сил;

б) *изохорный процесс* $V = const \Rightarrow \Delta V = 0$.

В этом случае работа газа равна нулю.

Следовательно, $\Delta U = Q$. Всё переданное газу тепло расходуется на увеличение его внутренней энергии;

в) *изобарный процесс* $p = const \Rightarrow \Delta p = 0$.

В этом случае

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

Работа газа в изобарном процессе равна произведению давления газа на изменение его объёма:

$$A' = p(V_2 - V_1) = p \cdot \Delta V.$$

Адиабатным называется процесс, происходящий без теплообмена с окружающей средой,

$$Q = 0.$$

В этом случае $A' = -\Delta U$, т. е. изменение внутренней энергии газа происходит за счёт совершения работы газа над внешними телами.

Количество теплоты, необходимое для нагревания тела в твёрдом или жидком состоянии в пределах одного агрегатного состояния, рассчитывается по формуле

$$Q = cm(t_2 - t_1),$$

где c — удельная теплоёмкость тела, m — масса тела, t_1 — начальная температура, t_2 — конечная температура.

Количество теплоты, необходимое для плавления тела при температуре плавления, рассчитывается по формуле

$$Q = \lambda m,$$

где λ — удельная теплота плавления, m — масса тела.

Количество теплоты, необходимое для парообразования, рассчитывается по формуле

$$Q = Lm,$$

где L — удельная теплота парообразования, m — масса тела.

Количество теплоты, выделяемое при сгорании топлива, рассчитывается по формуле

$$Q = qm,$$

где q — удельная теплота сгорания топлива, m — масса топлива.

Если система изолирована, теплообмен с окружающей средой отсутствует, то справедливо уравнение теплового баланса:

$$Q_1 + Q_2 + Q_3 + ... = 0.$$

Для того чтобы превратить часть тепловой энергии в механическую, чаще всего пользуются тепловыми двигателями. *Коэффициентом полезного действия теплового двигателя* называют отношение работы A, совершаемой двигателем, к количеству теплоты, полученному от нагревателя:

$$\eta = \frac{A_{\text{за цикл}}}{Q_{\text{н}}} = \frac{Q_{\text{н}} - |Q_{\text{х}}|}{Q_{\text{н}}} = 1 - \frac{|Q_{\text{х}}|}{Q_{\text{н}}}.$$

Здесь $Q_{\text{н}}$ — количество теплоты, полученное рабочим телом от нагревателя; $Q_{\text{х}}$ — количество теплоты, переданное рабочим телом холодильнику.

Французский инженер С. Карно придумал идеальную тепловую машину с идеальным газом в качестве рабочего тела. КПД такой машины

$$\eta = \frac{T_{\text{н}} - T_{\text{х}}}{T_{\text{н}}}.$$

Здесь $T_{\text{н}}$ — температура нагревателя; $T_{\text{х}}$ — температура холодильника.

§ 3. Электродинамика

3.1. Электростатика

Точечными зарядами называют такие заряды, расстояния между которыми гораздо больше их размеров.

Закон Кулона:
сила взаимодействия двух точечных неподвижных зарядов в вакууме прямо пропорциональна произведению модулей зарядов и обратно пропорциональна квадрату расстояния между ними:

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

Коэффициент пропорциональности в этом законе

$$k = 9 \cdot 10^9 \frac{\text{Н} \cdot \text{м}^2}{\text{Кл}^2}.$$

В СИ коэффициент k записывается в виде

$$k = \frac{1}{4\pi\varepsilon_0},$$

где $\varepsilon_0 = 8{,}85 \cdot 10^{-12}$ Ф/м (электрическая постоянная).

Закон Кулона для случая взаимодействия электрических зарядов в диэлектрике имеет вид:

$$F = k\frac{|q_1| \cdot |q_2|}{\varepsilon r^2} = \frac{1}{4\pi\varepsilon_0\varepsilon}\frac{|q_1| \cdot |q_2|}{r^2},$$

где ε — диэлектрическая проницаемость.

Электрические заряды взаимодействуют между собой с помощью электрического поля. Для качественного описания электрического поля используется силовая характеристика, которая называется напряжённостью электрического поля ($\vec{E}$). *Напряжённость электрического поля* равна отношению силы, действующей на пробный заряд q_0, помещённый в некоторую точку поля, к величине этого заряда

$$\vec{E} = \frac{\vec{F}}{q_0}.$$

Направление вектора напряжённости совпадает с направлением силы, действующей на положительный пробный заряд, $[E]$ =В/м. Из закона Кулона и определения напряжённости поля следует, что напряжённость поля точечного заряда

$$E = k\frac{q}{r^2},$$

где q — заряд, создающий поле; r — расстояние от точки, где находится заряд, до точки, где создаётся поле.

Если электрическое поле создаётся не одним, а несколькими зарядами, то для нахождения напряжённости результирующего поля используется принцип суперпозиции электрических полей: напряжённость результирующего поля равна векторной сумме напряжённостей полей, созданных каждым из зарядов в отдельности:

$$\vec{E} = \vec{E_1} + \vec{E_2} + ... + \vec{E_n}.$$

Однородное электрическое поле — это электрическое поле, напряжённость которого одинакова по модулю и направлению во всех точках пространства ($\vec{E} = const$).

Работа электрического поля при перемещении заряда.
Найдём работу перемещения положительного заряда силами Кулона в однородном электрическом поле. Пусть поле перемещает заряд q из точки 1 в точку 2:

$$A = qE(d_1 - d_2) = -(qEd_2 - qEd_1).$$

В электрическом поле работа не зависит от формы траектории, по которой перемещается заряд. Из механики известно, что если работа не зависит от формы траектории, то она равна изменению потенциальной энергии с противоположным знаком:

$$A = -(W_{p2} - W_{p1}) = -\Delta W.$$

Отсюда следует, что

$$W_p = qEd.$$

Потенциалом электрического поля называют отношение потенциальной энергии заряда в поле к этому заряду:

$$\varphi = \frac{W_p}{q}.$$

Запишем работу поля в виде

$$A = -(W_{p2} - W_{p1}) = -q(\varphi_2 - \varphi_1) = q(\varphi_1 - \varphi_2) = qU.$$

Здесь $U = \varphi_1 - \varphi_2$ — *разность потенциалов* в начальной и конечной точках траектории. Разность потенциалов называют также *напряжением*.

Связь напряжённости поля и разности потенциалов для однородного электростатического поля

$$U = E \cdot d.$$

Потенциал электрического поля системы зарядов равен алгебраической сумме потенциалов полей, созданных каждым из зарядов,

$$\varphi = \varphi_1 + \varphi_2 + \ldots.$$

Если проводник расположить в электрическом поле, то происходит явление электростатической индукции. Результирующая напряжённость внутри проводника в этом случае равна нулю. Внутри и на поверхности проводника потенциал одинаковый. Следовательно, поверхность проводника является эквипотенциальной поверхностью.

Если диэлектрик расположить в электрическом поле, то происходит явление поляризации. Величина, которая показывает, во сколько раз напряжённость поля в вакууме больше, чем напряжённость в диэлектрике, называется *диэлектрической проницаемостью* этого диэлектрика.

3.2. Электроёмкость. Конденсаторы. Энергия электрического поля

Электроёмкостью конденсатора называют физическую величину, численно равную отношению заряда одной из обкладок конденсатора к разности потенциалов между его обкладками. Электроёмкость измеряется в фарадах [1 Ф].

$$C = \frac{q}{U}.$$

Формула для подсчёта ёмкости плоского воздушного конденсатора имеет вид:

$$C = \frac{\varepsilon_0 S}{d},$$

где S — площадь обкладок, d — расстояние между ними.

Если пространство между обкладками конденсатора заполнено диэлектриком проницаемостью ε, то электроёмкость конденсатора можно найти по формуле

$$C = \frac{\varepsilon\varepsilon_0 S}{d}.$$

Конденсаторы можно соединять в батареи. При параллельном соединении ёмкость батареи C равна сумме ёмкостей конденсаторов:

$$C_{\text{паралл.}} = C_1 + C_2 + C_3 + \dots .$$

Разности потенциалов между обкладками одинаковы, а заряды прямо пропорциональны ёмкостям.

При последовательном соединении величина, обратная ёмкости батареи, равна сумме обратных ёмкостей, входящих в батарею,

$$\frac{1}{C_{\text{посл.}}} = \frac{1}{C_1} + \frac{1}{C_2} + \frac{1}{C_3} + \dots .$$

Заряды на конденсаторах одинаковы, а разности потенциалов обратно пропорциональны ёмкостям.

Заряженный конденсатор обладает энергией. Энергию заряженного конденсатора можно подсчитать по любой из следующих формул:

$$W = \frac{q^2}{2C} = \frac{CU^2}{2} = \frac{qU}{2}.$$

3.3. Постоянный ток

Электрический ток — направленное движение электрических зарядов. В различных веществах носителями заряда выступают частицы разного знака. За положительное направление тока принято направление движения положительных зарядов. Количественно электрический ток характеризуют его силой. Это заряд, прошедший за единицу времени через поперечное сечение проводника:

$$I = \frac{\Delta q}{\Delta t}.$$

Закон Ома для участка цепи имеет вид:

$$I = \frac{U}{R}.$$

Коэффициент пропорциональности R, называемый *электрическим сопротивлением*, является характеристикой проводника $[R] =$ Ом. *Сопротивление проводника* зависит от его геометрии и свойств материала:

$$R = \rho\frac{l}{S},$$

где l — длина проводника, ρ — удельное сопротивление, S — площадь поперечного сечения, ρ является характеристикой материала и его состояния $[\rho] =$ Ом·м.

Проводники можно соединять последовательно. Сопротивление такого соединения находится как сумма сопротивлений:

$$R_{\text{посл.}} = R_1 + R_2 + R_3 + \dots .$$

При последовательном соединении через проводники течёт один и тот же ток, а напряжение на сопротивлениях прямо пропорционально этим сопротивлениям:

$$U_1 : U_2 : U_3 = R_1 : R_2 : R_3.$$

При параллельном соединении величина, обратная сопротивлению, равна сумме обратных сопротивлений:

$$\frac{1}{R_{\text{паралл.}}} = \frac{1}{R_1} + \frac{1}{R_2} + \frac{1}{R_3} + \dots .$$

Напряжение на всех резисторах при параллельном соединении одинаково, а токи обратно пропорциональны величинам сопротивлений:

$$I_1 : I_2 : I_3 = \frac{1}{R_1} : \frac{1}{R_2} : \frac{1}{R_3}.$$

Для того чтобы в цепи длительное время протекал электрический ток, в составе цепи должны содержаться источники тока. Количественно источники тока характеризуют их *электродвижущей силой* (ЭДС). Это отношение работы, которую совершают сторонние силы при переносе электрических зарядов по замкнутой цепи, к величине перенесённого заряда: