

**МИНИСТЕРСТВО ОБРАЗОВАНИЯ И НАУКИ
РОССИЙСКОЙ ФЕДЕРАЦИИ**

**КАЗАНСКИЙ ГОСУДАРСТВЕННЫЙ АРХИТЕКТУРНО-
СТРОИТЕЛЬНЫЙ УНИВЕРСИТЕТ**

Кафедра физики

ФИЗИКА

Часть II

Раздел II

МОЛЕКУЛЯРНАЯ ФИЗИКА. ТЕРМОДИНАМИКА

Методические указания
к решению задач и контрольные задания
по физике для студентов- заочников
всех направлений подготовки

Казань
2013

УДК 530.1
ББК 22.34
Ж25

Ж25 Физика. Ч. II. Р. II. Молекулярная физика. Термодинамика: Методические указания к решению задач и контрольные задания по физике для студентов-заочников всех направлений подготовки / Сост.: Н.А. Жихарева, Г.Г. Сучкова. Под ред. Л.И. Маклакова. – Казань: Изд-во Казанск. гос. архитектур.-строит. ун-та, 2013. – 27 с.

Печатается по решению Редакционно-издательского совета Казанского государственного архитектурно-строительного университета

Данные методические указания являются составной частью методического обеспечения организации самостоятельной работы студентов-заочников.

Основной учебный материал курса физики разделен на две части. Второй раздел второй части посвящен рассмотрению вопросов молекулярной физики и термодинамики.

Табл. 1.

Рецензент
Доцент кафедры автоматики и электротехники
В.С. Дериновский

УДК 530.1
ББК 22.34

© Казанский государственный
архитектурно-строительный
университет, 2013

© Жихарева Н.А., Сучкова Г.Г.,
2013

**РАБОЧАЯ ПРОГРАММА КУРСА ФИЗИКИ
ДЛЯ ИНЖЕНЕРНО-ТЕХНИЧЕСКИХ
СПЕЦИАЛЬНОСТЕЙ ЗАОЧНЫХ ОТДЕЛЕНИЙ И ВУЗОВ
МОЛЕКУЛЯРНАЯ ФИЗИКА И ТЕРМОДИНАМИКА**

Элементарная молекулярно-кинетическая теория газов. Термодинамическая система. Идеальный газ. Основное уравнение молекулярно-кинетической теории идеального газа. Распределение Максвелла. Температура. Уравнение Менделеева-Клапейрона. Число степеней свободы. Распределение энергии по степеням свободы. Внутренняя энергия термодинамической системы. Внутренняя энергия идеального газа.

Количество теплоты. Первый закон термодинамики. Работа газа при изменении его объёма. Применение первого закона термодинамики к различным процессам: изохорический, изобарический, изотермический и адиабатический процессы.

Связь теплоёмкости идеального газа со степенями свободы молекул. Термодинамическая вероятность. Энтропия. Формула Больцмана. Изменение энтропии при некоторых термодинамических процессах. Равновесные и неравновесные, обратимые и необратимые процессы. Теплообмен. Адиабатический процесс. Второй закон термодинамики. Тепловые двигатели. Цикл Карно.

ЛИТЕРАТУРА

1. Савельев И.В. Курс общей физики: В 5 кн.: учеб. пособие для вузов / И.В. Савельев. – М.: АСТ : Астрель, 2004.
2. Фриш С.Э. Курс общей физики: учебник: в 3-х т / С.Э. Фриш, А.В. Тиморева. – СПб.: Лань, 2007. Т. 1, 2, 3.
3. Трофимова Т.И. Курс физики: учеб. пособие для студентов вузов. – М.: Высшая школа.
4. Волькенштейн В.С. Сборник задач по общему курсу физики: для студентов техн. вузов. – СПб.: Книжный мир, 2007.
5. Трофимова Т.И. Сборник задач по курсу физики с решениями: учебное пособие для студентов вузов. – М.: Высшая школа, 2008.

**ОБЩИЕ МЕТОДИЧЕСКИЕ УКАЗАНИЯ
К РЕШЕНИЮ ЗАДАЧ И ВЫПОЛНЕНИЮ КОНТРОЛЬНЫХ РАБОТ**

1. За время изучения курса общей физики студент-заочник должен представить в учебное заведение четыре контрольные работы.
2. В контрольной работе № 4 студент должен решить девять задач по приведенной ниже таблице вариантов: в таблице необходимо выбрать ва-

риант, соответствующий последней цифре номера зачетной книжки. Например, если шифр 11-04-125, то из таблицы выбираются задачи 5-го варианта.

Контрольная работа № 4

Таблица вариантов

Вариант	Номера задач								
0	410	420	430	440	450	460	470	480	490
1	401	411	421	431	441	451	461	471	481
2	402	412	422	432	442	452	462	472	482
3	403	413	423	433	443	453	463	473	483
4	404	414	424	434	444	454	464	474	484
5	405	415	425	435	445	455	465	475	485
6	406	416	426	436	446	456	466	476	486
7	407	417	427	437	447	457	467	477	487
8	408	418	428	438	448	458	468	478	488
9	409	419	429	439	449	459	469	479	489

3. Контрольные работы нужно выполнить чернилами в школьной тетради, на обложке которой необходимо четко привести следующие сведения: фамилию, имя, отчество; факультет, шифр, подробный адрес, номер выполняемой контрольной работы.

4. Условия задач в контрольной работе надо переписать полностью без сокращений. Для замечаний преподавателя на страницах тетради оставлять поля.

5. В конце контрольной работы указать, каким учебным пособием или учебником студент пользовался при изучении физики (название учебника, автор, год издания). Это делается для того, чтобы рецензент в случае необходимости мог указать, что следует студенту изучить для завершения контрольных работ.

6. Высылать на рецензию следует одновременно не более одной работы. Во избежание одних и тех же ошибок очередную работу следует высылать только после получения рецензии на предыдущую.

7. Если контрольная работа при рецензировании не зачтена, студент обязан представить ее на повторную рецензию, включив в нее те задачи, решение которых оказались неверными. Повторную работу необходимо представить вместе с незачтенной.

8. Зачтенные контрольные работы предъявляются экзаменатору. Студент должен быть готов во время экзамена дать пояснения по существу решения задач, входящих в контрольные работы.

9. Решения задач следует сопровождать краткими, но исчерпывающими пояснениями; в тех случаях, когда это возможно, дать чертеж, выполненный с помощью чертежных принадлежностей.

10. Решить задачи надо в общем виде, т.е. выразить искомую величину в буквенных обозначениях величин, заданных в условии задачи. При таком способе решения не производятся вычисления промежуточных величин.

11. После получения расчетной формулы для проверки правильности ее следует подставить в правую часть формулы вместо символов величин обозначения единиц этих величин, произвести с ними необходимые действия и убедиться в том, что полученная при этом единица соответствует искомой величине. Если никакого соответствия нет, то это означает, что задача решена неверно.

12. Числовые значения величин при подстановке их в расчетную формулу следует выражать только в единицах СИ. В виде исключения допускается выражать в любых, но одинаковых единицах числовые значения однородных величин, стоящих в числителе и знаменателе дроби и имеющих одинаковые степени.

13. При подстановке в расчетную формулу, а также при записи ответа числовые значения величин следует записывать как произведение десятичной дроби с одной значащей цифрой перед запятой на соответствующую степень десяти. Например, вместо 3520 надо записать $3,52 \cdot 10^3$, вместо 0,00129 записать $1,29 \cdot 10^{-3}$ и т.п.

14. Вычисления по расчетной формуле надо проводить с соблюдением правил приближенных вычислений («Задачник» по физике А.Г. Чертова, А.А. Воробьева Приложение о приближенных вычислениях). Как правило, окончательный ответ следует записывать с тремя значащими цифрами. Это относится и к случаю, когда результат получен с применением калькулятора.

Основные формулы

Основные параметры газа: V , P , T , μ , ν – соответственно, объем, давление, абсолютная температура, молярная масса газа, количество вещества;

$$[V] = \text{м}^3; \quad 1 \text{ л} = 1 \cdot 10^{-3} \text{ м}^3; \quad [P] = \text{Н/м}^2 = \text{Па};$$

$$1 \text{ МПа} = 1 \cdot 10^6 \text{ Па}; \quad 1 \text{ мм рт. ст.} = 133,3 \text{ Па}; \quad 1 \text{ атм} = 760 \text{ мм рт. ст.} \approx 10^5 \text{ Па};$$

$$[T] = \text{К}; \quad T = t \text{ } ^\circ\text{C} + 273;$$

$$R = 8,31 \text{ Дж/(моль} \cdot \text{К)} \text{ – универсальная газовая постоянная.}$$

Количество вещества – это число структурных элементов (молекул, атомов и т.п.), содержащихся в системе или теле; $[v]=\text{моль}$.

Моль равен количеству вещества системы, содержащей столько же структурных элементов, сколько содержится атомов в углероде-12 массой 0,012 кг.

Количество вещества тела (системы):

$$v = N / N_A ,$$

где N – число структурных элементов (молекул, атомов, ионов и т.п.), составляющих тело (систему), N_A – постоянная Авогадро ($N_A = 6.02 \cdot 10^{23} \text{ моль}^{-1}$).

Молярная масса вещества:

$$M = m / v ,$$

где m – масса однородного тела (системы), v – количество вещества этого тела.

Относительная молекулярная масса вещества:

$$M_r = \sum n_i A_{r,i} ,$$

где n_i – число атомов i -го химического элемента, входящих в состав молекулы данного вещества; $A_{r,i}$ – относительная атомная масса этого элемента. Относительные атомные массы приводятся в таблице Менделеева Д.И.

Связь молярной массы M с относительной молекулярной массой вещества:

$$M = M_r k ,$$

где $k = 10^{-3} \text{ кг/моль}$.

Количество вещества смеси газов:

$$v = v_1 + v_2 + \dots + v_n = \frac{N_1}{N_A} + \frac{N_2}{N_A} + \dots + \frac{N_n}{N_A}$$

или

$$v = \frac{m_1}{M_1} + \frac{m_2}{M_2} + \dots + \frac{m_n}{M_n} ,$$

где v, N_i, m_i, M_i – соответственно, количество вещества, число молекул, масса, молярная масса i -го компонента смеси.

Уравнение Менделеева-Клапейрона (уравнение состояния идеального газа):

$$pV = \frac{m}{M}RT \quad \text{или} \quad pV = \nu RT$$

где m – масса; M – молярная масса газа; R – универсальная газовая постоянная; $\nu = \frac{m}{M}$ – количество вещества; T – термодинамическая температура.

Закон Дальтона, определяющий давление смеси газов

$$p = p_1 + p_2 + \dots + p_n,$$

где p_i – парциальные давления компонентов смеси; n – число компонентов смеси.

Парциальным давлением называется давление газа, которое производил бы этот газ, если бы только он один находился в сосуде, занятом смесью.

Молярная масса смеси газов:

$$M = \frac{m_1 + m_2 + \dots + m_n}{\nu_1 + \nu_2 + \dots + \nu_n},$$

где m_i – масса i -го компонента смеси; $\nu_i = \frac{m_i}{M_i}$ – количество вещества

i -го компонента смеси; n – число компонентов смеси.

Массовая доля i -го компонента смеси газа (в долях единицы или процентах)

$$\omega = \frac{m_i}{m},$$

где m – масса смеси.

Концентрация молекул

$$n = \frac{N}{V} = \frac{N_A \rho}{M},$$

где N – число молекул, содержащихся в данной системе; ρ – плотность вещества; V – объем системы.

Формула справедлива не только для газов, но и для любого агрегатного состояния вещества.

Основное уравнение кинетической теории газов:

$$p = \frac{2}{3} n \langle \varepsilon_n \rangle ,$$

где $\langle \varepsilon_n \rangle$ – средняя кинетическая энергия поступательного движения молекулы.

Средняя кинетическая энергия поступательного движения молекулы

$$\langle \varepsilon_n \rangle = \frac{3}{2} kT ,$$

где k – постоянная Больцмана.

Средняя полная кинетическая энергия молекулы:

$$\langle \varepsilon_n \rangle = \frac{i}{2} kT ,$$

где i – число степеней свободы молекулы. Для одноатомного газа $i=3$, для двухатомного газа $i=5$, для многоатомного газа $i=6$.

Зависимость давления газа от концентрации молекул и температуры

$$p = nkT .$$

Скорости молекул:

$$\langle V_{\text{кв}} \rangle = \sqrt{\frac{3kT}{m}} = \sqrt{\frac{3RT}{M}} \quad \text{– средняя квадратичная;}$$

$$\langle V \rangle = \sqrt{\frac{8kT}{m}} = \sqrt{\frac{8RT}{M}} \quad \text{– средняя арифметическая;}$$

$$V_g = \sqrt{\frac{2kT}{m}} = \sqrt{\frac{2RT}{M}} \quad \text{– наиболее вероятная,}$$

где m – масса одной молекулы; M – молярная масса.

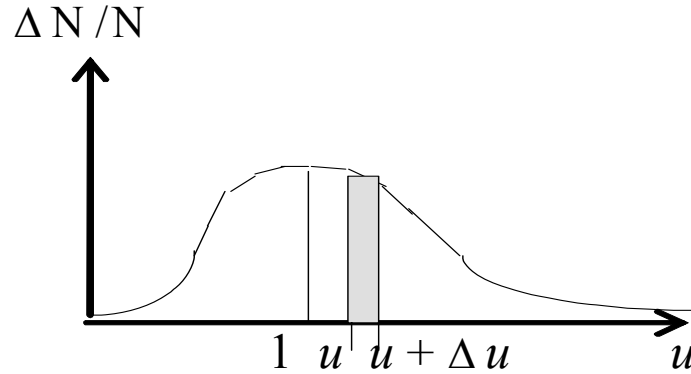
Относительная скорость молекулы:

$$U = V / V_g ,$$

где V – скорость данной молекулы.

Распределение Максвелла определяет распределение молекул по скоростям. Число молекул, относительные скорости которых заключены в пределах от u до $u + du$:

$$dN(u) = Nf(u)du = \frac{4}{\sqrt{\pi}} Nu^2 \exp(-u^2) du,$$



Удельные теплоемкости газа при постоянном объеме (c_v) и постоянном давлении (c_p):

$$c_v = \frac{i}{2} \cdot \frac{R}{M}, \quad c_p = \frac{i+2}{2} \cdot \frac{R}{M}.$$

Связь между удельной c и молярной C теплоемкостями:

$$c = \frac{C}{M} \quad \text{и} \quad C = cM.$$

Уравнение Майера:

$$C_p - C_v = R,$$

где C_p и C_v – молярные теплоемкости при постоянном объеме и постоянном давлении, соответственно.

Среднее число столкновений молекулы за 1 секунду:

$$\langle z \rangle = \sqrt{2} \pi \sigma^2 n \langle V \rangle,$$

где n – концентрация молекул;
 σ – эффективный диаметр молекулы;
 $\langle V \rangle$ – среднеарифметическая скорость молекулы.

Средняя длина свободного пробега молекул газа:

$$\langle \lambda \rangle = \frac{\langle v \rangle}{\langle z \rangle} = \frac{1}{\sqrt{2} \pi \sigma^2 n}.$$

Внутренняя энергия идеального газа:

$$U = \frac{m}{M} \cdot \frac{i}{2} RT = \frac{m}{M} C_v T .$$

Первое начало термодинамики:

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

где Q – теплота, сообщенная системе (газу); ΔU – изменение внутренней энергии системы; A – работа, совершенная системой против внешних сил.

Работа расширения газа:

$$A = \int_{V_1}^{V_2} p dV \quad - \text{ в общем случае;}$$

$$A = p(V_2 - V_1) \quad - \text{ при изобарном процессе;}$$

$$A = \frac{m}{M} RT \ln \frac{V_2}{V_1} \quad - \text{ при изотермическом процессе;}$$

$$A = -\Delta U = \frac{m}{M} C_v \Delta T \quad \text{или} \quad A = \frac{RT_1}{\gamma - 1} \cdot \frac{m}{M} \left[1 - \left(\frac{V_1}{V_2} \right)^{\gamma-1} \right] -$$

при адиабатном процессе, где $\gamma = \frac{c_p}{c_v}$ – показатель адиабаты.

Уравнение Пуассона, связывающее параметры идеального газа при адиабатном процессе (различные формы записи):

$$pV^\gamma = const , \quad \frac{T_2}{T_1} = \left(\frac{V_1}{V_2} \right)^{\gamma-1} ,$$

$$\frac{p_2}{p_1} = \left(\frac{V_1}{V_2} \right)^\gamma , \quad \frac{T_2}{T_1} = \left(\frac{p_2}{p_1} \right)^{\frac{\gamma-1}{\gamma}} .$$

Термический КПД цикла:

$$\eta = \frac{Q_1 - Q_2}{Q_1},$$

где Q_1 – теплота, полученная рабочим телом от теплопередатчика;
 Q_2 – теплота, переданная рабочим телом теплоприемнику.

Термический КПД цикла Карно:

$$\eta = \frac{T_1 - T_2}{T_1},$$

где T_1 и T_2 – термодинамические температуры теплоотдатчика и теплоприемника.

Разность энтропий двух состояний $\Delta S = S_2 - S_1$ определяется формулой:

$$\Delta S = \int_1^2 \frac{dQ}{T}.$$

Коэффициент поверхностного натяжения:

$$\alpha = \frac{F}{l} \quad \text{или} \quad \alpha = \frac{\Delta E}{\Delta S},$$

где F – сила поверхностного натяжения, действующая на контур l , ограничивающий поверхность жидкости; ΔU – изменение свободной энергии поверхностной пленки жидкости, связанное с изменением площади ΔS поверхности этой пленки.

Формула Лапласа, выражающая давление, создаваемое сферической поверхностью жидкости:

$$p = \frac{2\alpha}{R},$$

где R – радиус сферической поверхности.

Высота подъема жидкости в капиллярной трубке:

$$h = \frac{2\alpha \cos\theta}{\rho g R},$$

где θ – краевой угол ($\theta = 0$ при полном смачивании стенок трубки жидкостью, $\theta = \pi$ при полном несмачивании); R – радиус канала трубки; ρ – плотность жидкости; g – ускорение свободного падения.

Высота подъема жидкости между двумя близкими и параллельными друг другу плоскостями:

$$h = \frac{2\alpha \cos\theta}{\rho g d},$$

где d – расстояние между плоскостями.

Примеры решения задач

Пример 1. Определить для серной кислоты: 1) относительную молекулярную массу M_r ; 2) молярную массу M .

Решение. 1. Относительная молекулярная масса вещества равна сумме относительных атомных масс всех элементов, атомы которых входят в состав молекулы данного вещества и определяется по формуле:

$$M_r = \sum n_i A_{r,i} \quad (1)$$

где n_i – число атомов i -го химического элемента, входящих в состав молекулы данного вещества; $A_{r,i}$ – относительная атомная масса этого элемента.

Химическая формула серной кислоты имеет вид H_2SO_4 . Так как в состав молекулы серной кислоты входят атомы трех элементов, то стоящая в правой части равенства (1) сумма будет состоять из трех слагаемых и эта формула примет вид:

$$M_r = n_1 A_{r,1} + n_2 A_{r,2} + n_3 A_{r,3}. \quad (2)$$

Из формулы серной кислоты далее следует, что $n_1 = 2$ (два атома водорода), $n_2 = 1$ (один атом серы) и $n_3 = 4$ (четыре атома водорода).

Значения относительных атомных масс водорода, серы и кислорода найдем в таблице Д.И. Менделеева.

$$A_{r,1} = 1, \quad A_{r,2} = 32, \quad A_{r,3} = 16.$$

Подставив значения n_i и $A_{r,i}$ в формулу (2), найдем относительную молекулярную массу серной кислоты $M_r = 98$.

Зная относительную молекулярную массу, найдем молярную массу серной кислоты по формуле:

$$M = M_r k, \quad (3)$$

где $k = 10^{-3}$ кг/моль.

Подставив в формулу (3) значения величин, получим $M = 98 \cdot 10^{-3}$ кг/моль.

Пример 2. Определить число молекул N , содержащихся в объеме $V=1 \text{ мм}^3$ воды, и массу m_1 молекулы воды. Считая условно, что молекулы воды имеют вид шариков, соприкасающихся друг с другом, найти диаметр молекул d .

Решение. Число молекул N , содержащихся в некоторой системе массой m , равно произведению постоянной Авогадро N_A на количество вещества ν :

$$N = \nu N_A .$$

Так как $\nu = m / M$, где M – молярная масса, то $N = \frac{mN_A}{M}$.

Выразив в этой формуле массу как произведение плотности на объем V , получим:

$$N = \frac{\rho V N_A}{M} .$$

Произведем вычисления, учитывая, что $M = 18 \cdot 10^{-3}$ кг/моль:

$N = (10^3 \cdot 10^{-9}) / (18 \cdot 10^{-3}) \cdot 6,02 \cdot 10^{23} = 3,34 \cdot 10^{19}$ молекул. Массу одной молекулы m_1 можно найти по формуле:

$$m_1 = M / N_A . \quad (1)$$

Подставив в формулу (1) значения M и N_A , найдем массу молекулы воды

$$m_1 = 18 \cdot 10^{-3} / 6,02 \cdot 10^{23} = 2,99 \cdot 10^{-26} \text{ кг} .$$

Если молекулы воды плотно прилегают друг к другу, то можно считать, что на каждую молекулу приходится объем (кубическая ячейка), $V = d^3$, где d – диаметр молекулы. Отсюда

$$d = \sqrt[3]{V} . \quad (2)$$

Объем V найдем, разделив молярный объем V_m на число молекул в моле, т.е. на N_A :

$$V = V_m / N_A . \quad (3)$$

Подставим выражение (3) в выражение (2):

$$d = \sqrt[3]{\frac{V_m}{N_A}} ,$$

где $V_m = M/\rho$. Тогда

$$d = \sqrt[3]{\frac{M}{\rho N_A}} . \quad (4)$$

Проверим, дает ли правая часть выражения (4) единицу длины:

$$\sqrt[3]{\frac{[M]}{[\rho][N_A]}} = \sqrt[3]{\frac{\text{кг} / \text{моль}}{\text{кг} / \text{м}^3 \cdot \text{моль}^{-1}}} = \text{м}.$$

Проведем вычисления:

$$d^3 = (18 \cdot 10^{-3}) / (10^3 \cdot 6,02 \cdot 10^{23}) = 2,99 \cdot 10^{-29} \text{ м}^3 \quad \text{или} \quad d = 3,11 \cdot 10^{-10} \text{ м}.$$

Пример 3. В баллоне объемом 10 л находится гелий под давлением $p_1 = 1$ МПа и при температуре $T_1 = 300$ К. После того как из баллона было взято $m = 10$ г гелия, температура в баллоне понизилась до $T_2 = 290$ К. Определить давление p_2 гелия, оставшегося в баллоне.

Решение. Для решения задач воспользуемся уравнением Менделеева-Клапейрона, применив его к конечному состоянию газа:

$$p_2 V = \frac{m_2}{M} R T_2, \quad (1)$$

где m_2 – масса гелия в баллоне в конечном состоянии; M – молярная масса гелия; R – универсальная газовая постоянная.

Из уравнения (1) выразим искомое давление:

$$p_2 = \frac{m_2}{M V} R T_2. \quad (2)$$

Массу m_2 гелия выразим через массу m_1 , соответствующую начальному состоянию и массу гелия, взятого из баллона:

$$m_2 = m_1 - m. \quad (3)$$

Массу m_1 гелия найдем также из уравнения Менделеева-Клапейрона, применив его к начальному состоянию:

$$m_1 = \frac{M p_1 V}{R T_1}. \quad (4)$$

Подставив выражение массы m_1 в формулу (3), а затем выражение m_2 в (2), найдем:

$$p_2 = \left(\frac{M p_1 V}{R T_1} - m \right) \frac{R T_2}{M V},$$

или

$$p_2 = \frac{T_2}{T_1} p_1 - \frac{mRT_2}{MV} . \quad (5)$$

Проверим, дает ли формула (5) единицу давления. В правой части формулы 2 слагаемых. Очевидно, что первое слагаемое дает единицу давления. Проверим второе слагаемое:

$$\frac{[m][R][T]}{[M][V]} = \frac{\text{кг} \cdot \text{Дж} / (\text{моль} \cdot \text{К}) \cdot \text{К}}{(\text{кг} / \text{моль}) \cdot \text{м}^3} = \frac{\text{Дж}}{\text{м}^3} = \frac{\text{Н} \cdot \text{м}}{\text{м}^3} = \frac{\text{Н}}{\text{м}^2} = \text{Па} .$$

Паскаль является единицей давления. Произведем вычисления по формуле (5), учитывая, что $M = 4 \cdot 10^{-3}$ кг/моль.

Получим $p_2 = 3,64 \cdot 10^5$ Па.

Пример 4. Найти среднюю кинетическую энергию $\langle \varepsilon_n \rangle$ (вращательного движения одной молекулы кислорода при температуре $T = 350$ К, а также кинетическую энергию E_k вращательного движения всех молекул кислорода массой $m = 4$ г.

Решение. На каждую степень свободы молекулы газа приходится одинаковая средняя энергия $\langle \varepsilon_n \rangle = \frac{1}{2} kT$, где k – постоянная Больцмана;

T – термодинамическая температура газа. Так как вращательному движению двухатомной молекулы (молекула кислорода – двухатомная) соответствуют две степени свободы, то средняя энергия вращательного движения молекулы кислорода

$$\langle \varepsilon_n \rangle = 2 \cdot \frac{1}{2} kT . \quad (1)$$

Кинетическая энергия вращательного движения всех молекул газа

$$E_k = \langle \varepsilon_n \rangle N . \quad (2)$$

Число всех молекул газа:

$$N = N_A \nu , \quad (3)$$

где N_A – постоянная Авогадро; ν – количество вещества.

Если учесть, что количество вещества $\nu = \frac{m}{M}$, где m – масса газа; M – молярная масса газа, то формула (3) примет вид:

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

Подставив выражение в формулу (2), получаем

$$E_k = N_A \frac{m}{M} \langle \varepsilon_n \rangle . \quad (4)$$

Произведем вычисления, учитывая, что для кислорода $M = 32 \cdot 10^{-3}$ кг/моль:

$$\begin{aligned} \langle \varepsilon_n \rangle &= kT = 1,38 \cdot 10^{-23} \cdot 350 \text{ Дж} = 4,83 \cdot 10^{-21} \text{ Дж} \\ E_k &= 6,02 \cdot 10^{23} \cdot (4 \cdot 10^{-3} / 32 \cdot 10^{-3}) \cdot 4,83 \cdot 10^{-21} = 364 \text{ Дж} . \end{aligned}$$

Пример 5. Вычислить удельные теплоемкости при постоянном объеме c_v и при постоянном давлении c_p неона и водорода, принимая эти газы за идеальные.

Решение. Удельные теплоемкости идеальных газов выражаются формулами:

$$c_v = \frac{i}{2} \cdot \frac{R}{M} \quad c_p = \frac{i+2}{2} \cdot \frac{R}{M} ,$$

где i – число степеней свободы молекулы газа; M – молярная масса. Для неона (одноатомный газ) $i=3$ и $M=20 \cdot 10^{-3}$ кг/моль.

Произведем вычисления:

$$c_v = (3/2) \cdot (8,31/20 \cdot 10^{-3}) \text{ Дж/(кг} \cdot \text{К)} = 6,24 \cdot 10^2 \text{ Дж/(кг} \cdot \text{К)};$$

$$c_p = (5/2) \cdot (8,31/20 \cdot 10^{-3}) \text{ Дж/(кг} \cdot \text{К)} = 1,04 \cdot 10^3 \text{ Дж/(кг} \cdot \text{К)}.$$

Для водорода (двухатомный газ) $i=5$ и $M=2 \cdot 10^{-3}$ кг/моль.

Тогда

$$c_v = (5/2) \cdot (8,31/2 \cdot 10^{-3}) \text{ Дж/(кг} \cdot \text{К)} = 1,04 \cdot 10^4 \text{ Дж/(кг} \cdot \text{К)};$$

$$c_p = (7/2) \cdot (8,31/2 \cdot 10^{-3}) \text{ Дж/(кг} \cdot \text{К)} = 1,46 \cdot 10^4 \text{ Дж/(кг} \cdot \text{К)}.$$

Пример 6. Рассчитать среднюю длину свободного пробега λ молекул азота при давлении 10^5 Па и температуре 17°C . Как изменится λ в результате двухкратного увеличения объема газа? Эффективный диаметр молекул азота $\sigma = 3 \cdot 10^{-10}$ м.

Решение. Средняя длина свободного пробега рассчитывается по формуле

$$\lambda = \frac{1}{\sqrt{2} \pi \sigma^2 n} . \quad (1)$$

Концентрацию молекул можно определить из уравнения Менделеева-Клапейрона:

$$p = nkT, \quad n = p/(kT) \quad (2)$$

Подставляя формулу (2) в (1), получим:

$$\lambda = \frac{kT}{\sqrt{2}\pi\sigma^2 p}.$$

Подставив численные значения получим $\lambda = 10^{-7}$ м. При двухкратном увеличении объема концентрация уменьшится вдвое. Следовательно согласно формуле (1) средняя длина свободного пробега λ увеличится вдвое.

Пример 7. Кислород массой $m = 2$ кг занимает объем $V_1 = 1$ м³ и находится под давлением $p_1 = 0,2$ МПа. Газ был нагрет сначала при постоянном давлении до объема $V_2 = 3$ м³, а затем при постоянном объеме до давления $p_3 = 0,5$ МПа. Найти изменение внутренней энергии газа ΔU , совершенную им работу A и теплоту Q , переданную газу.

Решение. Изменение внутренней энергии газа:

$$\Delta U = c_v m \Delta T = i \cdot \frac{m}{M} \cdot \frac{R}{2} \Delta T,$$

где i – число степеней свободы молекул газа (для двухатомных молекул кислорода $i = 5$); $\Delta T = T_3 - T_1$ – разность температур газа в конечном (третьем) и начальном состояниях.

Начальную и конечную температуру газа найдем из уравнения Менделеева-Клапейрона $pV = \frac{m}{M} RT$, откуда $T = \frac{pVM}{mR}$.

Работа расширения газа при постоянном давлении выражается формулой:

$$A_1 = \frac{m_1}{M} \cdot R \Delta T$$

Работа газа, нагреваемого при постоянном объеме, равна нулю:
 $A_2 = 0$

Следовательно, полная работа, совершаемая газом $A = A_1 + A_2 = A_1$.

Согласно первому началу термодинамики теплота, переданная газу, равна сумме изменения внутренней энергии и работы $Q = \Delta U + A$.

Произведем вычисления, учтя, что для кислорода $M = 20 \cdot 10^{-3}$ кг/моль.

$$T_1 = (2 \cdot 10^5 \cdot 1 \cdot 32 \cdot 10^{-3}) / (2 \cdot 8,31) \text{ К} = 385 \text{ К};$$

$$T_2 = (2 \cdot 10^5 \cdot 3 \cdot 32 \cdot 10^{-3}) / (2 \cdot 8,31) \text{ К} = 1155 \text{ К};$$

$$T_3 = (5 \cdot 10^5 \cdot 3 \cdot 32 \cdot 10^{-3}) / (2 \cdot 8,31) \text{ К} = 2887 \text{ К};$$

$$A = A_1 = [8,31 \cdot 2 \cdot (1155 - 385)] / 32 \cdot 10^{-3} \text{ Дж} = 0,4 \cdot 10^6 \text{ Дж} = 0,4 \text{ МДж};$$

$$\Delta U = (5/2) \cdot [8,31 \cdot 2 \cdot (2887 - 385)] / 32 \cdot 10^{-3};$$

$$Q = (3,24 + 0,4) \text{ МДж} = 3,64 \text{ МДж}.$$

Пример 8. Тепловая машина работает по обратимому циклу Карно. Температура теплоотдатчика $T_1 = 500 \text{ К}$. Определить термический КПД цикла и температуру T_2 теплоприемника тепловой машины, если за счет каждого килоджоуля теплоты, полученной от теплоотдатчика, машина совершает работу $A = 350 \text{ Дж}$.

Решение. Термический КПД тепловой машины показывает, какая доля теплоты, полученной от теплоотдатчика, превращается в механическую работу. Термический КПД выражается формулой:

$$\eta = \frac{A}{Q_1},$$

где Q_1 – теплота, полученная от теплоотдатчика; A – работа, совершаемая рабочим телом тепловой машины.

Зная КПД цикла, можно по формуле $\eta = \frac{T_1 - T_2}{T_1}$ определить температуру охладителя T_2 :

$$T_2 = \frac{T_1}{1 - \eta}.$$

Произведем вычисления:

$$\eta = 350/1000 = 0,35, \quad T_2 = 500/(1 - 0,35) \text{ К} = 325 \text{ К}.$$

Пример 9. Найти изменение энтропии при превращении 10 г льда при -20°C в пар при 100°C .

Решение. Общее изменение энтропии в данном случае складывается из ее изменения в отдельных процессах:

1) при нагревании массы льда m от температуры T_1 до температуры T_2 :

$$\Delta S_1 = m C_1 \ln \frac{T_2}{T_1}, \text{ где } C_1 \text{ – удельная теплоемкость льда;}$$

2) при плавлении массы льда m при температуре T_2 :

$$\Delta S_2 = \frac{m \lambda}{T_2}, \text{ где } \lambda \text{ – удельная теплота плавления льда;}$$

3) при нагревании массы воды m от температуры T_2 до температуры T_3 :

$$\Delta S_3 = mC_2 \ln \frac{T_3}{T_2}, \text{ где } C_2 \text{ – удельная теплоемкость воды;}$$

4) при испарении массы воды m при температуре T_3 :

$$\Delta S_4 = \frac{mr}{T_3}, \text{ где } r \text{ – удельная теплота парообразования.}$$

Общее изменение энтропии:

$$\begin{aligned} \Delta S &= \Delta S_1 + \Delta S_2 + \Delta S_3 + \Delta S_4 = mC_1 \ln \frac{T_2}{T_1} + \frac{m\lambda}{T_2} + mC_2 \ln \frac{T_3}{T_2} + \frac{mr}{T_3} = \\ &= m \left(C_1 \ln \frac{T_2}{T_1} + \frac{\lambda}{T_2} + C_2 \ln \frac{T_3}{T_2} + \frac{r}{T_3} \right) \end{aligned}$$

Подставляя данные из условия получаем $\Delta S = 88 \text{ Дж/К}$.

Пример 10. Найти добавочное давление внутри мыльного пузыря диаметром $d = 10$ см. Какую работу нужно совершить, чтобы выдуть этот пузырь?

Решение. Пленка мыльного пузыря имеет две сферические поверхности: внешнюю и внутреннюю. Обе поверхности оказывают давление на воздух, заключенный внутри пузыря. Так как толщина пленки чрезвычайно мала, то диаметры обеих поверхностей практически одинаковы. Поэтому добавочное давление:

$$p = 2 \cdot \frac{2\alpha}{r},$$

где r – радиус пузыря. Так как $r = d/2$, то

$$p = 8\alpha / d$$

Работа, которую нужно совершить, чтобы, растягивая пленку, увеличить ее поверхность на ΔS , выражается формулой:

$$A = \alpha \cdot \Delta S \text{ или } A = \alpha \cdot (S - S_0)$$

В данном случае S – общая площадь двух поверхностей пленки мыльного пузыря, S_0 – общая площадь поверхностей плоской пленки, затягивающей отверстие трубки до выдувания пузыря. Пренебрегая S_0 , получаем:

$$A = \alpha \cdot S = 2\pi d^2 \alpha.$$

Произведем вычисления:

$$p = 8 \cdot 40 \cdot 10^{-3} / 0,1 \text{ Па} = 3,2 \text{ Па};$$

$$A = 2 \cdot 3,14 \cdot (0,1)^2 \cdot 40 \cdot 10^{-3} \text{ Дж} = 2,5 \cdot 10^{-3} \text{ Дж}.$$

401. Определить количество вещества и число молекул кислорода массой $m = 0,5$ кг. Молярная масса кислорода равна $32 \cdot 10^{-3}$ кг/моль.

402. Сколько атомов содержится в ртути: 1) количеством вещества $\nu = 0,2$ моль; 2) массой $m = 1$ г? Молярная масса ртути равна $201 \cdot 10^{-3}$ кг/моль.

403. Вода при температуре $t = 4^\circ\text{C}$ занимает объем $V = 1 \text{ см}^3$. Определить количество вещества и число молекул воды.

404. Найти молярную массу и массу одной молекулы поваренной соли.

405. Определить массу одной молекулы углекислого газа.

406. Определить концентрацию молекул кислорода, находящегося в сосуде вместимостью 2л. Количество вещества кислорода равно 0,2 моль.

407. Определить количество вещества водорода, заполняющегося сосудом объемом $V = 3$ л, если концентрация молекул газа в сосуде $n = 2 \cdot 10^{18} \text{ м}^{-3}$

408. В баллоне вместимостью 3л содержится кислород массой 10 г. Определить концентрацию молекул газа.

409. Определить относительную молекулярную массу: 1) воды, 2) углекислого газа; 3) поваренной соли.

410. Определить количество вещества и число молекул азота массой $m = 0,2$ кг.

411. Плотность некоторого газа при температуре 10°C и давлении $2 \cdot 10^5 \text{ Н/м}^2$ равна $0,34 \text{ кг/м}^3$. Чему равна масса одного киломоля этого газа?

412. В баллоне находится газ при температуре $T_1 = 400 \text{ К}$. До какой температуры T_2 надо нагреть газ, чтобы его давление увеличилось в 1,5 раза?

413. Баллон вместимостью 20 л заполнен азотом при температуре 400 К. Когда часть газа израсходовали, давление в баллоне понизилось на 200 кПа. Определить массу израсходованного газа. Процесс считать изотермическим.

414. В баллоне вместимостью 15 л находится аргон под давлением 600 кПа и при температуре 300 К. Когда из баллона было взято некоторое количество газа, давление в баллоне понизилось до 400 кПа, а температура установилась равной 260 К. Определить массу аргона, взятого из баллона.

415. Два сосуда одинакового объема содержат кислород. В одном сосуде давление $p_1=2$ МПа и температура $T_1 = 800$ К, в другом $p_2 = 2,5$ МПа, $T_2 = 200$ К. Сосуды соединили трубкой и охладили в них кислород до температуры $T = 200$ К. Определить установившееся в сосудах давление.

416. Вычислить плотность азота, находящегося в баллоне под давлением 2 МПа и имеющего температуру 400 К.

417. Определить относительную молекулярную массу газа, если при температуре 154 К и давлении 2,8 МПа он имеет плотность $6,1$ кг/м³.

418. Найти плотность азота при температуре 400 К и давлении 2 МПа.

419. В сосуде вместимостью 40л находится кислород при температуре 300 К. Когда часть газа израсходовали, давление в баллоне понизилось на 100 кПа. Определить массу израсходованного кислорода. Процесс считать изотермическим.

420. Определить плотность водяного пара, находящегося под давлением 2,5 кПа и имеющего температуру 250 К.

421. Определить внутреннюю энергию водорода, а также среднюю кинетическую энергию молекулы этого газа при температуре 300 К, если количество вещества этого газа равно 0,5 моль.

422. Определить суммарную кинетическую энергию поступательного движения всех молекул газа, находящегося в сосуде вместимостью 3 л под давлением 540 кПа.

423. Количество вещества гелия 1,5 моль, температура равна 120 К. Определить суммарную кинетическую энергию поступательного движения всех молекул этого газа.

424. Молярная внутренняя энергия некоторого двухатомного газа равна 6,02 кДж/моль. Определить среднюю кинетическую энергию вращательного движения одной молекулы этого газа. Газ считать идеальным.

425. Определить среднюю кинетическую энергию одной молекулы водяного пара при температуре 500 К.

426. Определить среднюю квадратичную скорость молекулы газа, заключенного в сосуд вместимостью 2 л под давлением 200 кПа. Масса газа равна 0,3 г.

427. Водород в количестве 0,5 моль находится при температуре 300 К. Найти среднюю кинетическую энергию вращательного движения одной молекулы, а также суммарную кинетическую энергию всех молекул этого газа.

428. При какой температуре средняя кинетическая энергия поступательного движения молекулы газа равна $4,14 \cdot 10^{-21}$ Дж?

429. Чему равна энергия вращательного движения молекул, содержащихся в 1 кг азота при температуре 7 С ?

430. Определить среднюю кинетическую энергию одной молекулы углекислого газа при температуре 500 К.

431. Определить молярную массу двухатомного газа и его удельные теплоемкости, если известно, что разность удельных теплоемкостей $c_p - c_v$ этого газа равна 260 Дж/(кг·К).

432. Найти удельные c_p и c_v , а также молярные C_p и C_v теплоемкости углекислого газа.

433. Определить показатель адиабаты идеального газа, который при температуре 350 К и давлении 0,4 МПа занимает объем 300л и имеет теплоемкость $C_v = 857$ Дж/К.

434. Определить удельные теплоемкости газообразного оксида углерода СО.

435. Определить относительную молекулярную массу и молярную массу газа, если разность его удельных теплоемкостей $c_p - c_v = 2,08$ кДж/(кг·К)

436. Определить молярные теплоемкости газа, если его удельные теплоемкости $c_v = 10,4$ кДж/(кг·К) и $c_p = 14,6$ кДж/(кг·К).

437. Найти удельные c_p и c_v , а также молярные C_p и C_v теплоемкости азота и гелия.

438. Вычислить удельные теплоемкости газа, зная, что его молярная масса $M = 4 \cdot 10^{-3}$ кг/моль и отношение теплоемкостей $C_p/C_v = 1,67$.

439. Чему равны удельные теплоемкости некоторого двухатомного газа, если плотность этого газа при нормальных условиях равна $1,43$ кг/м³ ?

440. Найти удельные c_p и c_v , а также молярные C_p и C_v теплоемкости кислорода.

441. Найти среднее число столкновений за 1 с и длину свободного пробега молекулы газа, если газ находится под давлением 2 кПа при температуре 200 К.

442. Определить среднюю длину свободного пробега молекулы азота в сосуде вместимостью 5 л. Масса газа равна 0,5 г.

443. Водород находится под давлением 20 мкПа и имеет температуру 300 К. Определить среднюю длину свободного пробега молекулы такого газа.

444. При нормальных условиях длина свободного пробега молекулы водорода равна 0,160 мкм. Определить диаметр молекулы водорода.

445. Найти среднюю длину свободного пробега атомов гелия в условиях, когда плотность гелия $2,1 \cdot 10^{-2}$ кг/м³.

446. Кислород находится под давлением 133 кПа при температуре 200 К. Вычислить среднее число столкновений молекулы кислорода при этих условиях за время 1с.

447. При каком давлении средняя длина свободного пробега молекул азота равна 1 м, если температура газа 10°C ?

448. В сосуде вместимостью 5 л находится водород массой 0,5 г. Определить среднюю длину свободного пробега в этом сосуде.

449. Средняя длина свободного пробега молекулы водорода при некоторых условиях равна 2 мм. Найти плотность водорода при этих условиях.

450. В сферической колбе объемом 1 л находится азот. При какой плотности азота средняя длина свободного пробега молекул азота больше размеров сосуда?

451. Определить количество теплоты, которое надо сообщить кислороду объемом 50л при его изохорном нагревании, чтобы давление газа повысилось на 0,5 МПа.

452. При изотермическом расширении азота при температуре 280 К объем его увеличился в два раза. Определить: 1) совершенную при расширении газа работу; 2) изменение внутренней энергии; 3) количество теплоты, полученное газом. Масса азота равна 0,2 кг.

453. При адиабатном сжатии давление воздуха было увеличено от 50 кПа до 0,5 МПа. Затем при неизменном объеме температура воздуха была понижена до первоначальной. Определить давление газа в конце процесса.

454. Кислород массой 200 г занимает объем 100 л и находится под давлением 200 кПа. При нагревании газ расширяется при постоянном давлении до объема 300л, а затем его давление возросло до 500 кПа при неизменном объеме. Найти изменение внутренней энергии газа, совершенную газом работу и теплоту, переданную газу.

455. Объем водорода при изотермическом расширении при температуре 300 К увеличился в 3 раза. Определить работу, совершенную газом и теплоту, полученную при этом. Масса водорода равна 200 г.

456. Азот массой 0,1 кг был изобарно нагрет от температуры 200 К до температуры 400 К. Определить работу, совершенную газом, полученную им теплоту и изменение внутренней энергии азота.

457. Во сколько раз увеличится объем водорода, содержащий количество вещества 0,4 моль при изотермическом расширении, если при этом газ получит количество теплоты 800 Дж? Температура водорода 300 К.

458. Какая работа совершается при изотермическом расширении водорода массой 5 г, взятого при температуре 290 К, если объем газа увеличивается в три раза?

459. В результате изотермического расширения (при температуре 300 К) 531 г азота давление газа уменьшается от $2 \cdot 10^6$ Па до $2 \cdot 10^5$ Па. Определить работу, совершаемую газом при расширении и количество полученного газом тепла .

460. Определить работу, которую совершает азот, если ему при постоянном давлении сообщать количество теплоты 21 кДж. Найти также изменение внутренней энергии газа.

461. Идеальный газ совершает цикл Карно при температурах теплоприемника $T_2 = 290$ К и теплоотдатчика $T_1 = 400$ К. Во сколько раз увеличится коэффициент полезного действия цикла, если температура теплоотдатчика возрастет до $T_1 = 600$ К?

462. Идеальный газ совершает цикл Карно. Температура теплоотдатчика в четыре раза больше температуры теплоприемника. Какую долю количества теплоты, полученного на один цикл от теплоотдатчика Q_2/Q_1 , газ отдаст теплоприемнику?

463. Определить работу изотермического сжатия газа, совершающего цикл Карно, КПД которого $\eta = 0,4$, если работа изотермического расширения равна 8 Дж.

464. Газ, совершающий цикл Карно, отдал теплоприемнику теплоту $Q_2 = 14$ кДж. Определить температуру T_1 теплоотдатчика, если при температуре теплоприемника $T_2 = 280$ К работа цикла $A = 6$ кДж.

465. Газ, являясь рабочим веществом в цикле Карно, получил от теплоотдатчика теплоту 4,38 кДж и совершил работу 2,4 кДж. Определить температуру теплоотдатчика, если температура теплоприемника 273 К.

466. Газ, совершающий цикл Карно, отдал теплоприемнику 67% теплоты, полученной от теплоотдатчика. Определить температуру теплоприемника, если температура теплоотдатчика 430 К.

467. Во сколько раз увеличится коэффициент полезного действия цикла Карно при повышении температуры теплоотдатчика от 380 К до 560 К? Температура теплоприемника равна 280 К.

468. Идеальная тепловая машина работает по циклу Карно. Температура теплоотдатчика 500 К, температура теплоприемника 250 К. Определить термический КПД цикла, а также работу рабочего вещества при изотермическом расширении, если при изотермическом сжатии совершена работа $A = 70$ Дж.

469. Газ, совершающий цикл Карно, получает теплоту 84 кДж. Определить работу газа, если температура теплоотдатчика в три раза выше температуры теплоприемника.

470. В цикле Карно газ получил от теплоотдатчика теплоту 500 Дж и совершил работу 100 Дж. Температура теплоотдатчика 400 К. Определить температуру теплоприемника.

471. Найти изменение энтропии при плавлении 1 кг льда, находящегося при температуре 0°C .

472. 640 г расплавленного свинца при температуре плавления вылили на лед при 0°C . Найти изменение энтропии при этом процессе.

473. Найти изменение энтропии при переходе 8 г кислорода от объема в 10 л при температуре 80°C к объему 40 л при температуре 300°C .

474. Найти изменение энтропии при переходе 6 г водорода от объема в 20 л под давлением $1,5 \cdot 10^5$ Па к объему 60 л под давлением 10^5 Па.

475. 6,6 г водорода расширяются изобарически до удвоения объема. Найти изменение энтропии при этом расширении.

476. 10 г кислорода нагреваются от $t_1 = 50^{\circ}\text{C}$ до $t_2 = 150^{\circ}\text{C}$. Найти изменение энтропии, если нагревание происходит: 1) изохорически; 2) изобарически.

477. До какой температуры нужно довести кислород массой 4 кг, находящийся при температуре 227°C , не меняя его объема, чтобы уменьшить энтропию кислорода на 1,31 кДж/кг?

478. При нагревании аргона массой 8 г его абсолютная температура увеличилась в два раза. Определить приращение энтропии при а) изохорном и б) изобарном нагревании.

479. При нагревании 1 к/моля двухатомного газа его абсолютная температура увеличивается в 1,5 раза. Найти изменение энтропии, если нагревание происходит: 1) изохорически; 2) изобарически.

480. Гелий в количестве 1 моль, изобарно расширяясь, увеличил свой объем в 4 раза. Найти приращение энтропии.

481. Найти массу воды, вошедшей в стеклянную трубку с диаметром канала 0,8 мм, опущенную в воду на малую глубину. Считать смачивание полным. Коэффициент поверхностного натяжения воды 72 мН/м.

482. Какую работу надо совершить при выдувании мыльного пузыря, чтобы увеличить его объем от 8 см^3 до 16 см^3 ? Считать процесс изотермическим. Коэффициент поверхностного натяжения мыльной пены 40 мН/м.

483. Какая энергия выделится при слиянии двух капель ртути диаметром 0,8 мм и 1,2 мм в одну каплю? Коэффициент поверхностного натяжения ртути 500 мН/м.

484. Определить давление внутри воздушного пузырька диаметром 4 мм, находящегося в воде у самой ее поверхности. Считать атмосферное давление нормальным. Коэффициент поверхностного натяжения воды 72 мН/м.

485. Какую работу против сил поверхностного натяжения надо совершить, чтобы разбить сферическую каплю ртути радиусом 3 мм на две одинаковые капли? Коэффициент поверхностного натяжения ртути 500 мН/м.

486. Глицерин поднялся в капиллярной трубке диаметром канала 1 мм на высоту 20 мм. Определить поверхностное натяжение глицерина. Считать смачивание полным.

487. На какую высоту поднимется спирт в капилляре, внутренний диаметр которого равен 1 мм? Смачивание считать полным. Коэффициент поверхностного натяжения спирта 22 мН/м.

488. На сколько давление воздуха внутри мыльного пузыря больше нормального атмосферного давления, если диаметр пузыря равен 5 мм? Коэффициент поверхностного натяжения мыльной пены 40 мН/м.

489. Воздушный пузырек диаметром 2,2 мкм находится в воде у самой ее поверхности. Определить плотность воздуха в пузырьке, если воздух над поверхностью воды находится при нормальных условиях. Коэффициент поверхностного натяжения воды 72 мН/м.

490. Давление воздуха внутри мыльного пузыря на 1 мм.рт.ст. больше атмосферного. Чему равен диаметр пузыря? Коэффициент поверхностного натяжения мыльной пены 40 мН/м.

ФИЗИКА

Часть II
Раздел II

МОЛЕКУЛЯРНАЯ ФИЗИКА. ТЕРМОДИНАМИКА

Методические указания к решению задач
и контрольные задания по физике для студентов- заочников
всех направлений подготовки

Составители: Жихарева Н.А., Сучкова Г.Г.