

МИНИСТЕРСТВО ТРАНСПОРТА И КОММУНИКАЦИЙ
РЕСПУБЛИКИ БЕЛАРУСЬ

УЧРЕЖДЕНИЕ ОБРАЗОВАНИЯ
«БЕЛОРУССКИЙ ГОСУДАРСТВЕННЫЙ УНИВЕРСИТЕТ ТРАНСПОРТА»

Кафедра физики и химии

Н. А. АХРАМЕНКО, И. И. ПРОНЕВИЧ, К. П. ШИЛЯЕВА

МОЛЕКУЛЯРНАЯ ФИЗИКА И ТЕРМОДИНАМИКА.

ЗАДАЧИ ДЛЯ САМОСТОЯТЕЛЬНОЙ РАБОТЫ

*Одобрено методической комиссией строительного факультета
в качестве учебно-методического пособия*

Гомель 2019

УДК 531/534 (075.8)
ББК 22.3
А95

Рецензент – канд. физ.-мат. наук, доцент кафедры «Теоретическая физика»
ГГУ им. Ф. Скорины *Е. А. Дей*

Ахраменко, Н. А.

А95 Молекулярная физика и термодинамика. Задачи для самостоятельной работы : учеб.-метод. пособие / Н. А. Ахраменко, И. И. Проневич, К. П. Шиялева ; М-во трансп. и коммуникаций Респ. Беларусь, Белорус. гос. ун-т трансп. – Гомель : БелГУТ, 2019. – 62 с.
ISBN 978-985-554-846-2

Приведены общие методические указания, вопросы для изучения теоретического материала по разделам программы, основная и дополнительная литература, сведения из теории, примеры решения задач, задачи для контрольных работ и справочные таблицы по разделу «Молекулярная физика и термодинамика» программы курса физики.

Предназначено для методического обеспечения самостоятельной работы по физике студентов инженерно-технических специальностей.

УДК 531/534 (075.8)
ББК 22.3

ISBN 978-985-554-846-2

© Ахраменко Н. А., Проневич И. И.,
Шиялева К. П., 2019
© Оформление. БелГУТ, 2019

ОБЩИЕ УКАЗАНИЯ

Одним из основных условий успешного освоения курса физики является систематическое и самостоятельное решение задач, которое помогает понять физический смысл явлений, закрепить законы и формулы, выработать навыки практического применения теоретических знаний.

Процесс изучения курса физики студентом состоит из следующих основных этапов: прослушивание курса лекций, самостоятельное изучение физики по учебной литературе, решение задач, выполнение контрольных и лабораторных работ, сдача зачетов и экзаменов.

Курс физики следует изучать систематически в течение всего учебного процесса. Освоение материала в сжатые сроки перед зачетом или экзаменом не дает глубоких и прочных знаний. Студент не должен ограничиваться только запоминанием физических формул. Он должен осмыслить их и уметь самостоятельно вывести.

Изучение курса физики сопровождается выполнением контрольных работ, которые предусматривают наличие значительного количества задач по всем разделам курса. В связи с этим принята следующая нумерация: задачи раздела «Механика» нумеруются 1.1, 1.2 и т. д.; задачи раздела «Молекулярная физика и термодинамика» – 2.1, 2.2 и т. д. Таким же образом осуществляется нумерация задач и для других разделов. Варианты задач контрольных работ выдаются преподавателем в начале каждого учебного семестра.

К выполнению контрольных работ студент приступает только после изучения материала, соответствующего данному разделу программы. При этом необходимо пользоваться учебными пособиями и конспектами лекций, ответить на вопросы для самоконтроля и внимательно ознакомиться с примерами решения задач, предназначенных для самостоятельного решения.

Решение задач включает в себя следующие этапы:

1 Выбор основных законов и формул, которые описывают рассматриваемые процессы и явления, повторение их формулировок и физического смысла буквенных обозначений.

2 Вывод формул, которые являются частным случаем, не выражают физические законы или не дают определения физическим величинам.

3 Построение схематического чертежа (рисунка), поясняющего рассматриваемые процессы.

4 Получение в общем (буквенном) виде конечных расчетных формул (т. е. формул, при подстановке в которые исходных данных задачи получаются искомые величины).

5 Проверка размерности конечных формул.

6 Подстановка в окончательные формулы, которые получены в результате решения задачи в общем виде, числовых значений, выраженных в единицах одной системы (СИ), расчет искомых величин. При этом следует руководствоваться правилами приближенных вычислений и, при необходимости, использовать степенное представление чисел.

7 Оценка физической правдоподобности полученных результатов.

8 Запись в ответ значений и единиц искомых величин в СИ.

Общие правила оформления контрольных работ по физике:

1 Каждая контрольная работа выполняется в отдельной тетради. На обложке обязательно следует указать номер и вариант контрольной работы, номера задач, фамилию, имя, отчество, группу и факультет, дату сдачи контрольной работы. В каждой контрольной работе должны быть решены все задачи.

2 Решение каждой задачи должно начинаться с новой страницы. Следует указывать номер задачи (в соответствии с пособием), без сокращений записать ее полное условие, далее привести краткое условие. Для замечаний преподавателя необходимо оставить поля.

3 Решение задачи необходимо представить в общем виде и довести его до конечных расчетных формул. Вычисление промежуточных величин и дальнейшая подстановка полученных чисел допускается только в случае их многократного использования в задаче.

4 Решение должно сопровождаться краткими, но исчерпывающими пояснениями, которые включают в себя конкретные однозначные

объяснения использованных буквенных обозначений. Например, вместо « v_1 – скорость» следует писать « v_1 – мгновенная скорость первого тела до удара относительно системы отсчета, связанной с Землей» и т. п. В ходе решения задачи нельзя изменять обозначения и индексы для величин, приведенных в кратком условии (при этом их смысл можно не пояснять). Следует приводить физические (опирающиеся на законы и условия их выполнения) обоснования использованных уравнений. Например, «так как рассматриваемая система тел является замкнутой, на основании закона сохранения импульса можно записать уравнение...» и т. п.

5 Полученные расчетные формулы обязательно следует проверить, т. е. в каждую из них вместо значений физических величин подставить их единицы в СИ и убедиться, что получающаяся по этой формуле единица соответствует искомой физической величине (см. примеры решения задач). При этом нельзя пользоваться таблицами, выражающими именованные единицы (1 Вт, 1 Гн и т. п.) через основные, а необходимо проводить преобразования единиц с помощью формул и определяющих уравнений для физических величин.

6 Вычисления необходимо проводить в СИ. При этом следует пользоваться правилами приближенных вычислений. Точность полученных результатов не должна превышать точности исходных данных, в том числе и табличных (как правило, достаточно двух-трех значащих цифр). Следует показывать, какие числа были подставлены в расчетные формулы. В конце задачи необходимо записать ответ(ы), при этом для больших (>1000) или малых ($<0,001$) чисел следует применять степенную форму записи или множители и приставки для образования десятичных кратных и дольных единиц. Например, $1500 \text{ м} = 1,5 \text{ км}$; $0,000015 \text{ с} = 15 \text{ мкс}$.

7 Выполненные работы должны быть в указанный срок представлены на рецензирование. Если прорецензированная работа не зачтена, то в той же тетради нужно исправить ошибки, выполнить все требования преподавателя и в кратчайший срок сдать работу на повторное рецензирование. Работу над ошибками следует выполнять на оставшейся после первоначального решения части листа (при этом должно быть понятно, где начинаются исправления), можно выполнять в конце тетради или подклеить дополнительный лист.

Исправления внутри первоначального текста решения задачи не допускаются!

8 Студент допускается к зачетной или экзаменационной сессии только при условии выполнения всех контрольных работ, предусмотренных в учебном плане.

В случае невыполнения перечисленных требований контрольные работы не рецензируются!

1 ВОПРОСЫ ДЛЯ ИЗУЧЕНИЯ ТЕОРЕТИЧЕСКОГО МАТЕРИАЛА ПО РАЗДЕЛАМ ПРОГРАММЫ

Термодинамические системы. Идеальный газ. Молекулярно-кинетический и термодинамический методы. Тепловое движение молекул. Взаимодействие молекул. Состояние системы. Параметры системы. Равновесные и неравновесные состояния и процессы. Уравнение состояния идеального газа. Опытные газовые законы (изотермический, изохорный, изобарный). Работа, совершаемая газом при изменении объема.

Физические основы молекулярно-кинетической теории. Молекулярно-кинетическая модель идеального газа. Энергия поступательного движения молекулы и ее связь с температурой. Число степеней свободы молекулы. Закон равномерного распределения энергии по степеням свободы. Внутренняя энергия и теплоемкость идеального газа. Распределение молекул газа по скоростям. Распределение Максвелла. Характеристические скорости молекул газа (наиболее вероятная, средняя арифметическая, средняя квадратичная). Идеальный газ в поле сил тяжести. Распределение Больцмана. Столкновение между молекулами. Эффективный диаметр молекулы. Средняя длина свободного пробега.

Явления переноса. Тепловое движение и связанный с ними перенос массы, импульса и энергии. Диффузия, вязкость и теплопроводность в газах. Экспериментальные законы диффузии, вязкости и теплопроводности. Молекулярно-кинетический расчет коэффициентов переноса.

Основы термодинамики. Метод термодинамики. Первое начало термодинамики и его применение к изопроцессам. Второе начало термодинамики. Круговые процессы. Тепловые двигатели. Цикл Карно.

Энтропия. Приведенная теплота и понятие энтропии. Изменение энтропии при необратимых процессах. Статистический смысл второго начала термодинамики. Флуктуация параметров состояния. Тепловая теорема Нернста.

Реальные газы. Отступление от законов идеального газа. Влияние собственного объема и взаимодействия молекул. Уравнение Ван-дер-Ваальса и его анализ. Изотермы Ван-дер-Ваальса. Критическое состояние. Характеристика однофазных и двухфазных состояний в координатах P - V . Внутренняя энергия реального газа.

Жидкости. Ближний порядок в жидкости. Характер теплового движения молекул жидкости. Радиус молекулярного действия. Поверхностный слой жидкости. Поверхностное натяжение. Явление смачивания. Краевой угол. Капиллярные явления.

Твердые тела. Дальний порядок в твердых телах. Характер теплового движения молекул в твердых телах. Кристаллические и аморфные тела. Тепловое расширение и теплоемкость твердых тел. Закон Дюлонга и Пти. Понятие фазы. Кристаллизация и плавление. Испарение и конденсация. Теплота фазового перехода. Диаграмма состояния. Тройная точка.

2 РЕКОМЕНДУЕМАЯ ЛИТЕРАТУРА

Основная

1 **Савельев, И. В.** Курс общей физики : учеб. пособие для студентов вузов. В 3 т. / И. В. Савельев. – 3-е изд., испр. – М. : Наука., 1987. – Т. 1: Механика. Молекулярная физика. – 416 с.

2 **Детлаф, А. А.** Курс физики : учеб. пособие для вузов / А. А. Детлаф, Б. М. Яворский. – М. : Высш. шк., 1989. – 608 с.

3 **Трофимова, Т. И.** Курс физики : учеб. пособие для вузов / Т. И. Трофимова. – 17-е изд., стер. – М. : Издат. центр «Академия», 2008. – 560 с.

4 **Трофимова, Т. И.** Курс физики. Задачи и решения : учеб. пособие для учрежд. высш. проф. образования / Т. И. Трофимова, А. В. Фирсов. – 4-е изд., испр. – М. : Издат. центр «Академия», 2011. – 592 с.

5 **Чертов, А. Г.** Задачник по физике : учеб. пособие для вузов / А. Г. Чертов, А. А. Воробьев. – 5-е изд., перераб. и доп. – М. : Высш. шк., 1988. – 526 с.

Дополнительная

1 **Волькенштейн, В. С.** Сборник задач по общему курсу физики / В. С. Волькенштейн. – 11-е изд., перераб. – М. : Наука, 1985. – 381 с.

2 **Савельев, И. В.** Сборник задач и вопросов по общей физике : учеб. пособие / И. В. Савельев. – 2-е изд., перераб. – М. : Наука, 1988. – 288 с.

3 **Чертов, А. Г.** Физические величины: терминология, определения, обозначения, размерности, единицы / А. Г. Чертов. – М. : Высш. шк., 1990. – 334 с.

4 **Иродов, И. Е.** Задачи по общей физике : учеб. пособие / И. Е. Иродов. – 2-е изд., перераб. – М. : Наука. Гл. ред. физ.-мат. лит., 1988. – 416 с.

5 **Фирганг, Е. В.** Руководство к решению задач по курсу общей физики : учеб. пособие для студ. вузов / Е. В. Фирганг. – М. : Высш. шк., 1978. – 351 с.

3 ОСНОВНЫЕ ЗАКОНЫ И ФОРМУЛЫ

Молекулярно-кинетическая теория идеальных газов

Количество однородного вещества (в молях)

$$\nu = \frac{N}{N_A} \quad \text{или} \quad \nu = \frac{m}{\mu},$$

где N – число молекул; N_A – постоянная Авогадро; m – масса; μ – молярная масса вещества.

Если система представляет собой смесь нескольких газов, то количество вещества системы

$$\nu = \nu_1 + \nu_2 + \dots + \nu_n = \frac{N_1}{N_A} + \frac{N_2}{N_A} + \dots + \frac{N_n}{N_A} = \frac{m_1}{\mu_1} + \frac{m_2}{\mu_2} + \dots + \frac{m_n}{\mu_n},$$

где ν_i , N_i , m_i , μ_i – соответственно количество вещества, число молекул, масса, молярная масса i -й компоненты смеси.

Уравнение состояния идеального газа (уравнение Менделеева – Клапейрона)

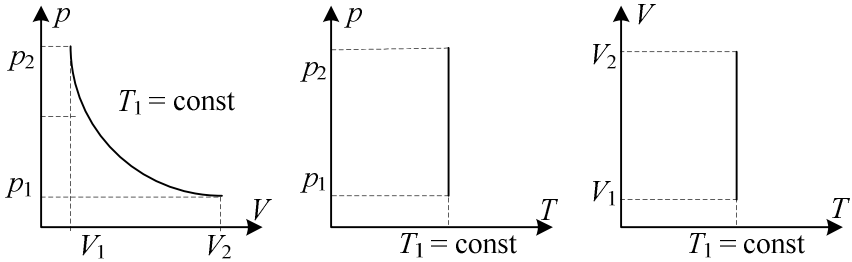
$$pV = \frac{m}{\mu} RT = \nu RT,$$

где p – давление; V – объем; m – масса; μ – молярная масса газа; R – универсальная газовая постоянная; ν – количество вещества; T – термодинамическая температура.

Опытные газовые законы, являющиеся частными случаями уравнения состояния для изопроцессов:

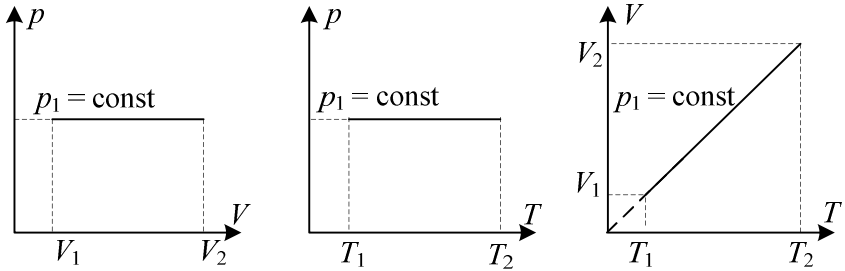
а) закон Бойля – Мариотта (изотермический процесс – $T = \text{const}$, $m = \text{const}$):

$$pV = \text{const}, \text{ или для двух состояний газа } p_1V_1 = p_2V_2;$$



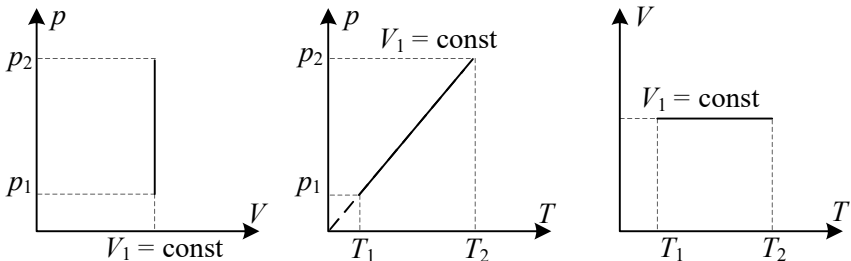
б) закон Гей-Люссака (изобарный процесс – $p = \text{const}$, $m = \text{const}$):

$$\frac{V}{T} = \text{const} \text{ или } \frac{V_1}{T_1} = \frac{V_2}{T_2};$$



в) закон Шарля (изохорный процесс – $V = \text{const}$, $m = \text{const}$):

$$\frac{p}{T} = \text{const} \text{ или } \frac{p_1}{T_1} = \frac{p_2}{T_2};$$



г) объединенный газовый закон ($m = \text{const}$):

$$\frac{pV}{T} = \text{const} \quad \text{или} \quad \frac{p_1 V_1}{T_1} = \frac{p_2 V_2}{T_2},$$

где p_1, V_1, T_1 – давление, объем и температура газа в начальном состоянии; p_2, V_2, T_2 – те же величины в конечном состоянии.

Закон Дальтона, определяющий давление смеси, состоящей из n идеальных газов,

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

где p_i – парциальное давление i -й компоненты смеси. Парциальным называется давление, которое производил бы этот газ, если бы в сосуде, занятом смесью, находился только он один.

Молярная масса смеси n газов

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

где m_i и ν_i – масса и количество вещества i -го компонента смеси.

Концентрация молекул

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

где N – число молекул в системе; V – объем системы; ρ – плотность вещества; N_A – число Авогадро. Формула справедлива для любого состояния вещества.

Зависимость давления газа от концентрации молекул и температуры

$$p = nkT,$$

где k – постоянная Больцмана.

Основное уравнение молекулярно-кинетической теории идеальных газов

$$p = \frac{1}{3} n m_0 \langle v_{\text{кв}} \rangle^2 = \frac{2}{3} n \langle \varepsilon \rangle \quad \text{или} \quad pV = \frac{1}{3} m \langle v_{\text{кв}} \rangle^2 = \frac{2}{3} E,$$

где n – концентрация молекул; m_0 – масса одной молекулы; $\langle v_{\text{кв}} \rangle^2$ – средняя квадратичная скорость молекул; $\langle \varepsilon \rangle$ – средняя кинетическая энергия поступательного движения молекул; m – масса газа в объеме V ; E – суммарная кинетическая энергия поступательного движения всех молекул.

Закон Максвелла распределения молекул идеального газа по скоростям

$$f(v) = \frac{dN(v)}{Ndv} = 4\pi \left(\frac{m_0}{2\pi kT} \right)^{\frac{3}{2}} v^2 \exp\left(-\frac{m_0 v^2}{2kT} \right),$$

где $f(v)$ – функция распределения молекул по скоростям, определяющая долю числа молекул, скорости которых лежат в интервале от v до $v + dv$.

Число молекул, относительные скорости которых заключены в пределах от u до $u + du$,

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

где $u = v/v_b$ – относительная скорость, равная отношению скорости молекул v к наиболее вероятной скорости v_b ; $f(u)$ – функция распределения по относительным скоростям.

Распределение молекул по энергиям. Число молекул, энергии которых заключены в интервале от ε до $\varepsilon + d\varepsilon$,

$$dN(\varepsilon) = Nf(\varepsilon)d\varepsilon = \frac{2}{\sqrt{\pi}} N \exp\left(-\frac{\varepsilon}{kT} \right) \varepsilon^{\frac{1}{2}} (kT)^{\frac{3}{2}} d\varepsilon,$$

где $f(\varepsilon)$ – функция распределения по энергиям.

Скорость молекул:

$$\text{наиболее вероятная} - v_b = \sqrt{\frac{2RT}{\mu}} = \sqrt{\frac{2kT}{m_0}};$$

$$\text{средняя квадратичная} - \langle v_{\text{кв}} \rangle = \sqrt{\frac{3RT}{\mu}} = \sqrt{\frac{3kT}{m_0}};$$

$$\text{средняя арифметическая} - \langle v \rangle = \sqrt{\frac{8RT}{\pi\mu}} = \sqrt{\frac{8kT}{\pi m_0}},$$

где m_0 – масса молекулы.

Средняя кинетическая энергия поступательного движения молекулы

$$\langle \varepsilon \rangle = \frac{3}{2} kT.$$

Средняя полная кинетическая энергия молекулы

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

где i – число степеней свободы молекулы. Для одноатомной молекулы $i = 3$, для двухатомной – $i = 5$, для многоатомной – $i = 6$.

Барометрическая формула:

$$p_h = p_0 \exp\left[-\frac{\mu g(h-h_0)}{RT}\right],$$

где p_h и p_0 – давление газа на высоте h и h_0 .

Распределение Больцмана во внешнем потенциальном поле:

$$n = n_0 \exp\left(-\frac{U}{kT}\right),$$

где n – концентрация частиц; n_0 – концентрация частиц в точках, где потенциальная энергия частиц $U = 0$.

Среднее число соударений, испытываемых молекулой газа за 1 с,

$$\langle z \rangle = \sqrt{2} \pi d^2 n \langle v \rangle,$$

где d – эффективный диаметр молекулы; n – концентрация молекул; $\langle v \rangle$ – средняя арифметическая скорость молекулы.

Средняя длина свободного пробега молекул газа

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

Импульс, переносимый молекулами из одного слоя газа в другой через элемент поверхности площадью ΔS за время dt ,

$$dp = \eta \frac{dv}{dz} \Delta S dt,$$

где η – динамическая вязкость газа; dv/dz – поперечный градиент скорости течения его слоев.

Динамическая вязкость

$$\eta = \frac{1}{3} \rho \langle v \rangle \langle l \rangle,$$

где ρ – плотность газа (жидкости).

Закон Ньютона для силы внутреннего трения (вязкости) между слоями площадью ΔS :

$$F = -\eta \frac{dv}{dz} \Delta S.$$

Закон Фурье для теплопроводности:

$$\Delta Q = -\lambda \frac{dT}{dx} S \Delta t,$$

где ΔQ – теплота, прошедшая посредством теплопроводности через площадку S за время Δt ; dT/dx – градиент температуры; λ – теплопроводность.

Для газов

$$\lambda = \frac{1}{3} c_V \rho \langle v \rangle \langle l \rangle,$$

c_V – удельная теплоемкость газа при постоянном объеме; ρ – плотность газа; $\langle v \rangle$ и $\langle l \rangle$ – средняя арифметическая скорость и средняя длина свободного пробега молекул.

Закон Фика для диффузии:

$$\Delta m = -D \frac{d\rho}{dx} S \Delta t,$$

где Δm – масса вещества, переносимая в результате диффузии через поверхность площадью S за время Δt ; $d\rho/dx$ – градиент плотности; D – коэффициент диффузии.

Для газов

$$D = \frac{1}{3} \langle v \rangle \langle l \rangle.$$

Основы термодинамики

Молярная теплоемкость газа при постоянном объеме и постоянном давлении соответственно

$$C_V = \frac{i}{2} R, \quad C_p = \frac{i+2}{2} R,$$

где i – число степеней свободы; R – универсальная газовая постоянная.

Связь между удельной (c) и молярной (C) теплоемкостями:

$$C = c\mu,$$

где μ – молярная масса.

Уравнение Майера:

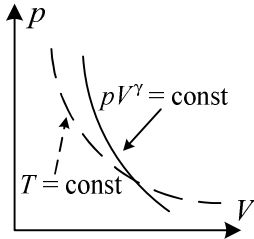
$$C_p - C_V = R.$$

Внутренняя энергия идеального газа

$$U = \frac{m}{\mu} C_V T.$$

Изменение внутренней энергии идеального газа

$$\Delta U = \frac{m}{\mu} C_V \Delta T.$$



Уравнение адиабатного процесса (уравнение Пуассона):

$$pV^\gamma = \text{const}, TV^{\gamma-1} = \text{const}, T^\gamma p^{1-\gamma} = \text{const},$$

где γ – показатель адиабаты,

$$\gamma = \frac{C_p}{C_V} = \frac{i+2}{i}.$$

Уравнение политропы

$$pV^n = \text{const},$$

где $n = (C - C_p) / (C - C_V)$ – показатель политропы.

Работа, совершаемая газом при изменении его объема, в общем случае вычисляется по формуле

$$A = \int_{V_1}^{V_2} p dV,$$

где V_1 и V_2 – начальный и конечный объемы газа.

Работа при изобарном процессе ($p = \text{const}$)

$$A = p (V_2 - V_1),$$

при изотермическом ($T = \text{const}$) –

$$A = \frac{m}{\mu} RT \ln \frac{V_2}{V_1},$$

при адиабатном ($\Delta Q = 0$) –

$$A = \frac{m}{\mu} C_V (T_1 - T_2) = \frac{RT_1}{\gamma - 1} \frac{m}{\mu} \left[1 - \left(\frac{V_1}{V_2} \right)^{\gamma-1} \right] = \frac{p_1 V_1}{\gamma - 1} \left[1 - \left(\frac{V_1}{V_2} \right)^{\gamma-1} \right] = \frac{p_1 V_1}{\gamma - 1} \left[1 - \left(\frac{p_2}{p_1} \right)^{\frac{\gamma-1}{\gamma}} \right],$$

при политропном ($C = \text{const}$) –

$$A = \frac{m}{\mu} \frac{RT_1}{n-1} \left(1 - \frac{T_2}{T_1} \right),$$

где $T_1, T_2, V_1, V_2, p_1, p_2$ – соответственно начальные и конечные температура, объем и давление газа.

Первое начало термодинамики

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

где Q – количество теплоты, сообщенное газу; ΔU – изменение его внутренней энергии; A – работа, совершенная газом против внешних сил.

Первое начало термодинамики при изобарном процессе

$$Q = \Delta U + A = \frac{m}{\mu} C_V \Delta T + \frac{m}{\mu} R \Delta T = \frac{m}{\mu} C_p \Delta T,$$

при изохорном ($A = 0$) –

$$Q = \Delta U = \frac{m}{\mu} C_V \Delta T,$$

при изотермическом ($\Delta U = 0$) –

$$Q = A = \frac{m}{\mu} RT \ln \frac{V_2}{V_1},$$

при адиабатном ($\Delta Q = 0$) –

$$A = -\Delta U = -\frac{m}{\mu} C_V \Delta T.$$

Термический коэффициент полезного действия для кругового процесса (цикла)

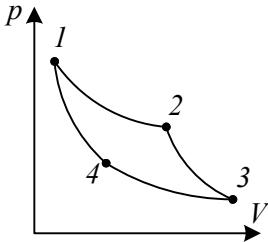
$$\eta = \frac{A}{Q_1} = \frac{Q_1 - Q_2}{Q_1},$$

где Q_1 – количество теплоты, полученное системой; Q_2 – количество теплоты, отданное системой; A – работа, совершаемая за цикл.

КПД цикла Карно

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

где T_1 – температура нагревателя; T_2 – температура холодильника.



1–2 $T_1 = \text{const}$, изотермическое расширение;

2–3 адиабатное расширение;

3–4 $T_2 = \text{const}$, изотермическое сжатие;

4–1 адиабатное сжатие.

Холодильный коэффициент машины, работающей по обратному циклу Карно,

$$\varepsilon = \frac{Q_{\text{отв}}}{A} = \frac{T_2}{T_1 - T_2},$$

где $Q_{\text{отв}}$ – количество теплоты, отведенное из холодильной камеры; A – совершенная работа; T_2 – температура более холодного тела (холодильной камеры); T_1 – температура более горячего тела (окружающей среды).

Изменение энтропии при равновесном переходе системы из состояния 1 в состояние 2

$$\Delta S = S_2 - S_1 = \int_1^2 \frac{dQ}{T}.$$

Изменение энтропии идеального газа

$$\Delta S = \frac{m}{\mu} \left(C_V \ln \frac{T_2}{T_1} + R \ln \frac{V_2}{V_1} \right).$$

Уравнение Ван-дер-Ваальса

$$\left(p + \frac{m^2 a}{\mu^2 V^2} \right) \left(V - \frac{m}{\mu} b \right) = \frac{m}{\mu} RT,$$

где p – давление; m – масса; μ – молярная масса; a и b – постоянные Ван-дер-Ваальса; V – объем; T – термодинамическая температура.

Связь критических параметров – объема, давления и температуры газа – с постоянными Ван-дер-Ваальса:

$$V_{\text{кр}} = 3b \frac{m}{\mu}; \quad p_{\text{кр}} = \frac{a}{27b^2}; \quad T_{\text{кр}} = \frac{8a}{27Rb}.$$

Внутренняя энергия реального газа

$$U = \nu \left(C_V T - \frac{\nu a}{V} \right).$$

Коэффициент поверхностного натяжения

$$\alpha = F/l,$$

где F – сила поверхностного натяжения, действующая на контур длиной l , ограничивающий поверхность жидкости.

При изотермическом увеличении площади поверхности пленки жидкости на ΔS совершается работа

$$A = \alpha \Delta S.$$

Добавочное давление Δp , вызванное кривизной поверхности жидкости, выражается формулой Лапласа

$$\Delta p = \alpha \left(\frac{1}{R_1} + \frac{1}{R_2} \right),$$

где R_1 и R_2 – радиусы кривизны двух взаимно перпендикулярных сечений поверхности жидкости.

В случае сферической поверхности ($R_1 = R_2 = R$)

$$\Delta p = \frac{2\alpha}{R}.$$

Высота поднятия жидкости в капиллярной трубке

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

где θ – краевой угол; ρ – плотность жидкости; g – ускорение свободного падения; r – радиус трубки.

Высота поднятия жидкости в зазоре между двумя близкими и параллельными плоскостями, находящимися на расстоянии d ,

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

Закон Дюлонга и Пти: молярная теплоемкость C химически простых твердых тел

$$C = 3R,$$

где R – универсальная газовая постоянная.

При нагревании тела от 0 до t °C его длина (в первом приближении) изменяется от l_0 до l по закону

$$l = l_0 (1 + \alpha_l t),$$

где α_l – коэффициент линейного расширения.

При нагревании тела от 0 до t °C его объем изменяется от V_0 до V по закону

$$V = V_0 (1 + \alpha_V t),$$

где α_V – коэффициент объемного расширения ($\alpha_V \approx 3\alpha_l$).

4 ПРИМЕРЫ РЕШЕНИЯ И ОФОРМЛЕНИЯ ЗАДАЧ

Пример 1. Найти молярную массу смеси кислорода массой $m_1 = 25$ г и азота массой $m_2 = 75$ г.

| Д а н о: | Решение |
|--|--|
| $m_1 = 25$ г $m_2 = 75$ г <hr style="border: 0.5px solid black;"/> $\mu_{\text{см}} - ?$ | Молярная масса смеси есть отношение массы смеси $m_{\text{см}}$ к количеству вещества смеси, т. е. $\mu_{\text{см}} = m_{\text{см}} / \nu_{\text{см}}. \quad (1)$ |

Масса смеси равна сумме масс компонентов смеси:

$$m_{\text{см}} = m_1 + m_2,$$

количество вещества смеси

$$\nu_{\text{см}} = \nu_1 + \nu_2 = m_1 / \mu_1 + m_2 / \mu_2.$$

Подставив в формулу (1) выражения для $m_{\text{см}}$ и $\nu_{\text{см}}$, получим

$$\mu_{\text{см}} = \frac{m_1 + m_2}{\frac{m_1}{\mu_1} + \frac{m_2}{\mu_2}}.$$

$$\mu_{\text{см}} = \frac{25 + 75}{\frac{25}{32} + \frac{75}{28}} = 30 \text{ г/моль} = 30 \cdot 10^{-3} \text{ кг/моль}.$$

Размерности искоемых величин очевидны.

Ответ: $\mu_{\text{см}} = 30 \cdot 10^{-3}$ кг/моль.

Пример 2. В баллоне вместимостью $V = 10$ 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.

| Д а н о: | Решение |
|---|---|
| $m = 10$ г $V = 10$ л $p_1 = 1$ МПа $T_1 = 300$ К $T_2 = 290$ К <hr style="border: 0.5px solid black;"/> $p_2 - ?$ | Для решения задачи воспользуемся уравнением Менделеева – Клапейрона, применив его к конечному состоянию газа: $p_2 V = \frac{m_2}{\mu} R T_2,$ |

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

Выразим искомое давление:

$$p_2 = \frac{m_2 RT_2}{\mu V}. \quad (1)$$

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

$$m_2 = m_1 - m. \quad (2)$$

Масса m_1 гелия также находится из уравнения Менделеева – Клапейрона для начального состояния гелия

$$m_1 = \frac{\mu p_1 V}{RT_1}. \quad (3)$$

Подставив выражения для масс (2) и (3) в (1), найдем

$$p_2 = \left(\frac{\mu p_1 V}{RT_1} - m \right) \frac{RT_2}{\mu V} = \frac{T_2}{T_1} p_1 - \frac{m}{\mu} \frac{RT_2}{V}.$$

Проверим, дает ли полученная формула единицу давления. Для этого в ее правую часть вместо символов величин подставляем их единицы. В правой части формулы два слагаемых. Первое из них дает единицу давления, т. к. первый сомножитель (T_2 / T_1) – безразмерный, а второй – давление. Проверим второе слагаемое:

$$\frac{[m][R][T]}{[\mu][V]} = \frac{1 \text{ кг} \cdot 1 \text{ Дж} / (\text{моль} \cdot \text{К}) \cdot 1 \text{ К}}{1 (\text{кг} / \text{моль}) \cdot 1 \text{ м}^3} = \frac{1 \text{ Дж}}{1 \text{ м}^3} = \frac{1 \text{ Н} \cdot \text{м}}{1 \text{ м}^3} = \frac{1 \text{ Н}}{1 \text{ м}^2} = 1 \text{ Па}.$$

Производим вычисления, учитывая, что $\mu = 4 \cdot 10^{-3}$ кг/моль.

$$p_2 = \frac{290}{300} 10^6 - \frac{10 \cdot 10^{-3}}{4 \cdot 10^{-3}} \frac{8,31 \cdot 290}{10 \cdot 10^{-3}} = 0,364 \text{ МПа}.$$

Ответ: $p_2 = 0,364$ МПа.

Пример 3. Найти среднюю кинетическую энергию движения одной молекулы кислорода при температуре $T = 350$ К, а также кинетическую энергию движения всех молекул кислорода массой $m = 4$ кг.

Д а н о:
 $m = 4$ кг
 $T = 350$ К

 $\langle \varepsilon \rangle = ?$
 $E_k = ?$

Решение

На каждую степень свободы молекулы газа приходится одинаковая средняя энергия

$$\langle \varepsilon_i \rangle = \frac{1}{2} kT,$$

где k – постоянная Больцмана, T – термодинамическая температура газа.

Поступательному движению двухатомной молекулы кислорода соответствуют три степени свободы, вращательному – две. Тогда средняя кинетическая энергия движения молекулы

$$\langle \varepsilon \rangle = \frac{5}{2} kT. \quad (1)$$

Кинетическая энергия движения всех молекул газа

$$E_k = N \langle \varepsilon \rangle \quad (2)$$

Число всех молекул газа

$$N = \nu N_A = N_A \frac{m}{\mu}. \quad (3)$$

Подставив выражение N в формулу (2), получаем

$$E_k = \frac{5}{2} \frac{m k N_A T}{\mu} = \frac{5m}{2\mu} RT. \quad (4)$$

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

$$\langle \varepsilon \rangle = \frac{5}{2} 1,38 \cdot 10^{-23} \cdot 350 = 1,21 \cdot 10^{-20} \text{ Дж};$$

$$E_k = \frac{5 \cdot 4}{2 \cdot 32 \cdot 10^{-3}} \cdot 8,31 \cdot 350 = 910 \text{ Дж}.$$

Ответ: $\langle \varepsilon \rangle = 1,21 \cdot 10^{-20}$ Дж; $E_k = 910$ Дж.

Пример 4. Используя функцию распределения молекул идеального газа по относительным скоростям, определить число молекул, скорости которых меньше $0,002$ наиболее вероятной скорости, если в объеме газа содержится $N = 1,67 \cdot 10^{24}$ молекул.

| | |
|---|---|
| <p>Д а н о:</p> $\frac{\begin{matrix} v_{\max} = 0,002 v_B \\ N = 1,67 \cdot 10^{24} \end{matrix}}{\Delta N - ?}$ | <p>Решение</p> <p>Число $dN(u)$ молекул, относительные скорости которых заключены в пределах от u до $u + du$,</p> $dN(u) = N f(u) du = \frac{4}{\sqrt{\pi}} N u^2 \exp(-u^2) du,$ |
|---|---|

где N – число молекул в объеме газа.

По условию задач $v_{\max} = 0,002 v_B$, значит $u_{\max} = v_{\max} / v_B = 0,002$. Так как $u \ll 1$, то $\exp(-u^2) \approx 1 - u^2$. Пренебрегая u^2 , которое много меньше единицы, выражение для $dN(u)$ можно записать в виде

$$dN(u) = \frac{4N}{\sqrt{\pi}} u^2 du.$$

Интегрируя данное выражение по u в пределах от 0 до u_{\max} , получим

$$\Delta N = \frac{4N}{\sqrt{\pi}} \int_0^{u_{\max}} u^2 du = \frac{4Nu_{\max}^3}{3\sqrt{\pi}}.$$

$$\Delta N = \frac{4 \cdot 1,67 \cdot 10^{24} \cdot (0,002)^3}{3\sqrt{3,14}} = 10^{16}.$$

Ответ: $\Delta N = 10^{16}$ молекул.

Пример 5. Вычислить удельные теплоемкости при постоянном объеме и постоянном давлении неона и водорода, принимая эти газы за идеальные. Рассчитать также удельные теплоемкости смеси указанных газов, если массовые доли неона и водорода составляют 80 и 20 % соответственно.

Д а н о:

$$\mu_1 = 20 \cdot 10^{-3} \text{ кг/моль}$$

$$\mu_2 = 2 \cdot 10^{-3} \text{ кг/моль}$$

$$\omega_1 = 0,8$$

$$\omega_2 = 0,2$$

$$c_{V1} - ? \quad c_{V2} - ?$$

$$c_{p1} - ? \quad c_{p2} - ?$$

$$c_V - ? \quad c_p - ?$$

Решение

Удельные теплоемкости идеальных газов определяются по формулам

$$c_V = \frac{i R}{2 \mu}; \quad c_p = \frac{i + 2 R}{2 \mu}.$$

Для неона (одноатомный газ) число степеней свободы $i = 3$, поэтому

$$c_{V1} = \frac{3}{2} \cdot \frac{8,31}{20 \cdot 10^{-3}} = 624 \frac{\text{Дж}}{\text{кг} \cdot \text{К}};$$

$$c_{p1} = \frac{5}{2} \cdot \frac{8,31}{20 \cdot 10^{-3}} = 1040 \frac{\text{Дж}}{\text{кг} \cdot \text{К}}.$$

Для водорода (двухатомный газ) $i = 5$

$$c_{V2} = \frac{5}{2} \cdot \frac{8,31}{2 \cdot 10^{-3}} = 1,04 \cdot 10^4 \frac{\text{Дж}}{\text{кг} \cdot \text{К}};$$

$$c_{p1} = \frac{7}{2} \cdot \frac{8,31}{2 \cdot 10^{-3}} = 1,46 \cdot 10^4 \frac{\text{Дж}}{\text{кг} \cdot \text{К}}.$$

Удельную теплоемкость смеси при постоянном объеме c_V найдем следующим образом. Теплоту, необходимую для нагревания смеси на ΔT , выразим двумя способами:

$$Q = c_V(m_1 + m_2) \Delta T, \quad (1)$$

$$Q = (c_{V1}m_1 + c_{V2}m_2)\Delta T. \quad (2)$$

Приравняв правые части (1) и (2) и разделив обе части полученного равенства на ΔT , получим

$$c_V(m_1 + m_2) = c_{V1}m_1 + c_{V2}m_2.$$

$$\text{Отсюда } c_V = c_{V1} \frac{m_1}{m_1 + m_2} + c_{V2} \frac{m_2}{m_1 + m_2} \text{ или } c_V = c_{V1}\omega_1 + c_{V2}\omega_2,$$

где $\omega_1 = m_1 / (m_1 + m_2)$ и $\omega_2 = m_2 / (m_1 + m_2)$.

Рассуждая таким же образом, получим формулу для вычисления удельной теплоемкости смеси при постоянном давлении

$$c_p = c_{p1}\omega_1 + c_{p2}\omega_2.$$

Произведем вычисления:

$$c_V = (6,24 \cdot 10^2 \cdot 0,8 + 1,04 \cdot 10^4 \cdot 0,2) = 2580 \text{ Дж}/(\text{кг}\cdot\text{К});$$

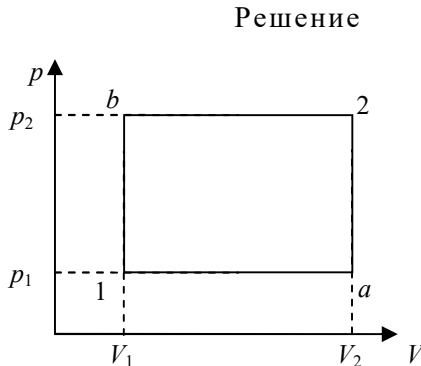
$$c_p = (1,04 \cdot 10^2 \cdot 0,8 + 1,46 \cdot 10^4 \cdot 0,2) = 3752 \text{ Дж}/(\text{кг}\cdot\text{К}).$$

Ответ: $c_{V1} = 624 \text{ Дж}/(\text{кг}\cdot\text{К})$, $c_{p1} = 1040 \text{ Дж}/(\text{кг}\cdot\text{К})$, $c_{V2} = 1,04 \cdot 10^4 \text{ Дж}/(\text{кг}\cdot\text{К})$, $c_{p2} = 1,46 \cdot 10^4 \text{ Дж}/(\text{кг}\cdot\text{К})$, $c_V = 2580 \text{ Дж}/(\text{кг}\cdot\text{К})$; $c_p = 3752 \text{ Дж}/(\text{кг}\cdot\text{К})$.

Пример 6. Некоторая масса кислорода при давлении $p_1 = 10^5 \text{ Па}$ занимает объем $V_1 = 10 \text{ л}$. Газ был нагрет сначала при постоянном давлении до объема $V_2 = 30 \text{ л}$, а затем при постоянном объеме до давления $p_2 = 0,5 \text{ МПа}$. Найти изменение внутренней энергии газа ΔU_{1a2} , совершенную им работу A_{1a2} и количество поглощенной газом теплоты Q_{1a2} . Произвести аналогичные расчеты в случае обратного следования процессов: сначала по изохоре, потом по изобаре (кривая $1b2$). Сравнить результаты расчетов в обоих случаях.

Д а н о:

| |
|------------------------------------|
| $p_1 = 10^5 \text{ Па}$ |
| $V_1 = 10 \text{ л}$ |
| $V_2 = 30 \text{ л}$ |
| $p_2 = 0,5 \text{ МПа}$ |
| $\Delta U_{1a2} - ?$ $A_{1a2} - ?$ |
| $Q_{1a2} - ?$ |
| $\Delta U_{1b2} - ?$ $A_{1b2} - ?$ |
| $Q_{1b2} - ?$ |



Физическую систему составляет идеальный газ – кислород. Внутренняя энергия является функцией состояния системы. Поэтому изменение внутренней энергии при переходе из одного состояния в другое всегда равно разности значений внутренней энергии в этих состояниях и не зависит от совокупности процессов, приведших к такому переходу системы:

$$\Delta U_{1a2} = \frac{m}{\mu} \frac{i}{2} R (T_2 - T_1) = \frac{i}{2} (p_2 V_2 - p_1 V_1).$$

Здесь температура газа в начальном и конечном состояниях была выражена из уравнения Менделеева – Клапейрона.

Работа, совершенная газом в рассматриваемом случае,

$$A_{1a2} = A_{1a} + A_{a2}.$$

При изобарном процессе $A_{1a} = p_1(V_2 - V_1)$, при изохорном $A_{a2} = 0$. С учетом этого

$$A_{1a2} = p_1(V_2 - V_1).$$

В соответствии с первым законом термодинамики

$$Q_{1a2} = \Delta U_{1a2} + A_{1a2} = \frac{i}{2} (p_2 V_2 - p_1 V_1) + p_1 (V_2 - V_1).$$

Подставив числовые значения, получим

$$\Delta U_{1a2} = 14 \cdot 10^3 \text{ Дж}; \quad A_{1a2} = 2 \cdot 10^3 \text{ Дж}; \quad Q_{1a2} = 16 \cdot 10^3 \text{ Дж}.$$

Во втором случае переход из состояния 1 в состояние 2 идет через промежуточное состояние b . Искомые величины могут быть найдены следующим образом:

$$A_{1b2} = p_2(V_2 - V_1);$$

$$\Delta U_{1b2} = \frac{m}{\mu} \frac{i}{2} R (T_2 - T_1) = \frac{i}{2} (p_2 V_2 - p_1 V_1);$$

$$Q_{1b2} = \frac{i}{2} (p_2 V_2 - p_1 V_1) + p_2 (V_2 - V_1).$$

Подставив численные значения, получим

$$\Delta U_{1b2} = 14 \cdot 10^3 \text{ Дж}; \quad A_{1b2} = 10 \cdot 10^3 \text{ Дж}; \quad Q_{1b2} = 24 \cdot 10^3 \text{ Дж}.$$

Сравнивая результаты в первом и втором случаях, замечаем, что

$$\Delta U_{1a2} = \Delta U_{1b2}; \quad A_{1b2} > A_{1a2}; \quad Q_{1b2} > Q_{1a2}.$$

Ответ: $\Delta U_{1a2} = 14 \cdot 10^3 \text{ Дж}; \quad A_{1a2} = 2 \cdot 10^3 \text{ Дж}; \quad Q_{1a2} = 16 \cdot 10^3 \text{ Дж};$
 $\Delta U_{1b2} = 14 \cdot 10^3 \text{ Дж}; \quad A_{1b2} = 10 \cdot 10^3 \text{ Дж}; \quad Q_{1b2} = 24 \cdot 10^3 \text{ Дж}.$

Пример 7. Идеальный газ совершающий цикл, состоящий из изобарного, адиабатного и изотермического процессов. При изобарном процессе температура газа изменяется от $T_1 = 400$ К до $T_2 = 800$ К. Определить термический КПД цикла.

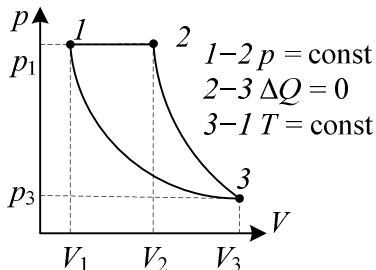
Д а н о:

$$T_1 = 400 \text{ К}$$

$$T_2 = 800 \text{ К}$$

$$\eta - ?$$

Решение



Термический коэффициент полезного действия для кругового процесса (цикла)

$$\eta = \frac{Q_1 - Q_2}{Q_1}, \quad (1)$$

где Q_1 – количество теплоты, полученное системой; Q_2 – количество теплоты, отданное системой. Для данного цикла система получает тепло при изобарном процессе и отдает тепло при изотермическом процессе, т. е. $Q_1 = Q_{12}$, а $Q_2 = Q_{31}$.

Воспользуемся первым началом термодинамики для изобарного и изотермического процессов

$$Q_{12} = \nu C_p \Delta T = \nu \frac{i+2}{2} R (T_2 - T_1), \quad (2)$$

$$Q_{31} = \nu R T_1 \ln \frac{V_3}{V_1}. \quad (3)$$

Запишем уравнения Пуассона для адиабатного процесса и закон Гей-Люссака для изобарного процесса

$$T_2 V_2^{\gamma-1} = T_3 V_3^{\gamma-1}, \quad \frac{V_2}{V_1} = \frac{T_2}{T_1}.$$

Используя эти соотношения и тождество $T_1 = T_3$, найдем связь между объемами в состоянии 1 и в состоянии 3

$$V_1 = \frac{T_1}{T_2} V_2, \quad V_2 = \left(\frac{T_3}{T_2} \right)^{\frac{1}{\gamma-1}} V_3,$$

$$V_1 = \frac{T_1}{T_2} \left(\frac{T_1}{T_2} \right)^{\frac{1}{\gamma-1}} V_3 = \left(\frac{T_1}{T_2} \right)^{\frac{\gamma}{\gamma-1}} V_3. \quad (4)$$

Подставим выражение (4) в формулу (3)

$$Q_{31} = \nu RT_1 \ln \left(\frac{T_2}{T_1} \right)^{\frac{\gamma}{\gamma-1}} = \nu RT_1 \frac{\gamma}{\gamma-1} \ln \frac{T_2}{T_1}. \quad (5)$$

Показатель адиабаты $\gamma = \frac{i+2}{i}$, тогда выражение (5) примет вид

$$Q_{31} = \nu RT_1 \frac{i+2}{2} \ln \frac{T_2}{T_1}. \quad (6)$$

Подставляя (6) и (2) в (1), получим выражение для КПД

$$\eta = \frac{\nu \frac{i+2}{2} R(T_2 - T_1) - \nu \frac{i+2}{2} RT_1 \ln \frac{T_2}{T_1}}{\nu \frac{i+2}{2} R(T_2 - T_1)} = \frac{(T_2 - T_1) - T_1 \ln \frac{T_2}{T_1}}{T_2 - T_1}.$$

Вычисляя, находим:

$$\eta = \frac{800 - 400 - 400 \ln \frac{800}{400}}{800 - 400} = 0,31.$$

Ответ: $\eta = 0,31$.

Пример 8. Идеальный газ, совершающий цикл Карно, произвел работу $A = 600$ Дж. Температура T_1 нагревателя равна 500 К, температура холодильника $T_2 = 300$ К. Определить термический КПД цикла и количество теплоты, отданное холодильнику за один цикл.

Д а н о:

$$A = 600 \text{ Дж}$$

$$T_1 = 500 \text{ К}$$

$$T_2 = 300 \text{ К}$$

$$\eta = ?$$

$$Q_2 = ?$$

Решение

Термический КПД цикла Карно

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

Количество теплоты, отданное холодильнику,

$$Q_2 = Q_1 - A,$$

где $Q_1 = A / \eta$ – количество теплоты, полученной от нагревателя.

Подставляя выражение для Q_1 в формулу для Q_2 , получим

$$Q_2 = A \left(\frac{1}{\eta} - 1 \right) = A \left(\frac{T_1}{T_1 - T_2} - 1 \right) = A \frac{T_2}{T_1 - T_2}.$$

Вычисляя, находим:

$$\eta = \frac{500 - 300}{500} = 0,4; \quad Q_2 = 600 \frac{300}{500 - 300} = 900 \text{ Дж.}$$

Ответ: $\eta = 0,4; Q_2 = 900 \text{ Дж.}$

Пример 9. Определить изменение энтропии ΔS при изотермическом расширении азота массой 10 г, если давление газа уменьшается от 100 кПа до 50 кПа.

| | |
|--|---|
| <p style="text-align: center; margin: 0;">Д а н о:</p> <p>$m = 10 \text{ г}$</p> <p>$p_1 = 100 \text{ кПа}$</p> <p>$p_2 = 50 \text{ кПа}$</p> <hr style="border: 0.5px solid black;"/> <p>$\Delta S = ?$</p> | <p style="text-align: center; margin: 0;">Решение</p> <p style="margin: 0;">Изменение энтропии, учитывая, что процесс изотермический,</p> $\Delta S = \int_1^2 \frac{dQ}{T} = \frac{Q}{T}. \quad (1)$ |
|--|---|

Согласно первому закону термодинамики количество теплоты, полученное газом, $Q = \Delta U + A$. Для изотермического процесса $\Delta U = 0$, поэтому $Q = A$. Работа газа в изотермическом процессе

$$A = \frac{m}{\mu} RT \ln \frac{V_2}{V_1} = \frac{m}{\mu} RT \ln \frac{p_1}{p_2}.$$

Подставив выражение для работы в формулу (1), найдем искомое изменение энтропии:

$$\Delta S = \frac{m}{\mu} R \ln \frac{p_1}{p_2}.$$

Вычисляя, получаем

$$\Delta S = \frac{0,01}{0,028} 8,31 \cdot \ln \frac{10^5}{0,5 \cdot 10^5} = 2,06 \frac{\text{Дж}}{\text{К}}.$$

Ответ: $\Delta S = 2,06 \text{ Дж/К.}$

Пример 10. Найти постоянные a и b Ван-дер-Ваальса для одного моля хлора, если известно, что критическая температура хлора $T_{кр} = 417$ К, а критическое давление $p_{кр} = 7,6$ МПа. Определить внутреннюю энергию газа, если при температуре $T = 273$ К он занимает объем $V = 2$ л.

Д а н о:

$$\begin{array}{l} T_{кр} = 417 \text{ К} \\ p_{кр} = 7,6 \text{ МПа} \\ T = 273 \text{ К} \\ V = 2 \text{ л} \end{array}$$

$$a - ?$$

$$b - ?$$

$$U - ?$$

Решение

Физическую систему составляет один моль реального газа, уравнение состояния которого можно записать в виде

$$\left(p + \frac{a}{V_{\mu}^2} \right) (V_{\mu} - b) = RT,$$

где a и b – постоянные Ван-дер-Ваальса; V_{μ} –

объем одного моля газа $V_{\mu} = \frac{V}{\mu}$.

Критические параметры определяются через постоянные a и b следующим образом:

$$p_{кр} = a / (27 b^2); \quad T_{кр} = 8a / (27Rb); \quad V_{кр} = 3b.$$

Выражая a и b через критическую температуру и критическое давление, находим

$$a = \frac{27R^2T_{кр}^2}{64p_{кр}}; \quad b = \frac{RT_{кр}}{8p_{кр}}.$$

Внутренняя энергия реального газа для 1 моля вещества

$$U = \frac{i}{2}RT - \frac{a}{V_{\mu}} = \frac{i}{2}RT - \frac{27R^2T_{кр}^2\mu}{64p_{кр}V},$$

где $i = 5$ – число степеней свободы; T – температура газа.

Подставляя числовые значения, получаем:

$$a = \frac{27 \cdot 8,31^2 \cdot 417^2}{64 \cdot 7,6 \cdot 10^6} = 0,667 \frac{\text{Н} \cdot \text{м}^4}{\text{моль}}; \quad b = \frac{8,31 \cdot 417}{8 \cdot 7,6 \cdot 10^6} = 5,69 \cdot 10^{-5} \frac{\text{м}^3}{\text{моль}};$$

$$U = \frac{5}{2} \cdot 8,31 \cdot 417 - \frac{27 \cdot 8,31^2 \cdot 417^2 \cdot 71 \cdot 10^{-3}}{64 \cdot 7,6 \cdot 10^6 \cdot 2 \cdot 10^{-3}} = 5,34 \cdot 10^3 \text{ Дж.}$$

Ответ: $a = 0,667 \text{ Н} \cdot \text{м}^4/\text{моль}$; $b = 5,69 \cdot 10^{-5} \text{ м}^3/\text{моль}$; $U = 5,34 \text{ кДж}$.

Пример 11. Найти добавочное давление Δp внутри мыльного пузыря диаметром $d = 10$ см. Какую работу нужно совершить, чтобы выдуть этот пузырь?

Д а н о:

$$d = 10 \text{ см}$$

$$\Delta p - ?$$

$$A - ?$$

Решение

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

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

где R – радиус пузыря.

$$\text{Так как } R = \frac{d}{2}, \text{ то } \Delta p = \frac{8\alpha}{d}.$$

Работа, которую нужно совершить, чтобы, растягивая пленку при постоянной температуре, увеличить площадь ее поверхности на ΔS , выражается формулой

$$A = \alpha \Delta S = \alpha (S - S_0).$$

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

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

Произведя вычисления, получим

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

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

Ответ: $\Delta p = 3,2$ Па; $A = 2,5 \cdot 10^{-3}$ Дж.

5 ЗАДАЧИ

2.1 Баллон объемом $V = 16$ л содержит углекислый газ под давлением $p = 1,6$ МПа и температуре $T = 330$ К. Определить массу m газа.

2.2 Каков может быть наименьший объем баллона V , вмещающего $m = 9$ кг кислорода, если его стенки при температуре $t = 30$ °С выдерживают давление $p = 1,8 \cdot 10^6$ Па.

2.3 Баллон объемом $V = 16$ л содержит углекислый газ. Давление p газа равно 1,5 МПа, а температура $T = 320$ К. Определить массу газа в баллоне.

2.4 Вычислить плотность ρ азота, находящегося в баллоне под давлением $p = 2,5$ МПа и имеющего температуру $T = 450$ К.

2.5 В баллоне находится газ при температуре $T_1 = 460$ К. До какой температуры T_2 надо нагреть газ, чтобы его давление увеличилось в 1,4 раза?

2.6 Найти массу m воздуха, заполняющего аудиторию высотой $h = 4$ м и площадью пола $S = 220$ м². Давление воздуха $p = 0,1$ МПа, температура помещения $t = 21$ °С.

2.7 Определить плотность ρ водяного пара, находящегося под давлением $p = 2,4$ кПа и имеющего температуру $T = 350$ К.

2.8 Какой объем V занимает 1,2 кмоль идеального газа при давлении $p = 1,2$ МПа и температуре $T = 430$ К?

2.9 Определить количество вещества ν идеального газа, занимающего объем $V = 30$ л при температуре $T = 320$ К и давлении $p = 750$ мм рт. ст.

2.10 Как и во сколько раз отличается вес воздуха, заполняющего помещение при температурах $t_1 = 15$ °С и $t_2 = 35$ °С? Давление одинаково.

2.11 Давление p_1 воздуха внутри плотно закрытого пробкой сосуда при температуре $t_1 = 11$ °С равно 0,11 МПа. При нагревании сосуда пробка вылетела. Определить, до какой температуры t_2 нагрет сосуд, если известно, что пробка вылетает при давлении воздуха в сосуде $p_2 = 0,14$ МПа.

2.12 При нагревании идеального газа на $\Delta T = 4$ К при постоянном давлении его объем увеличился на $1/200$ первоначального объема. Найти первоначальную температуру T газа.

2.13 В цилиндр длиной $l = 21$ м, заполненный воздухом при нормальном атмосферном давлении p_0 , начали медленно вдвигать поршень площадью $S = 220$ см². Определить силу F , которая будет действовать на поршень, если его остановить на расстоянии $l_1 = 12$ см от дна цилиндра.

2.14 Два сосуда одинакового объема содержат кислород. В одном сосуде давление $p_1 = 220$ кПа и температура $T_1 = 850$ К, в другом – $p_2 = 280$ кПа, а $T_2 = 210$ К. Сосуды соединили и охладили находящийся в них кислород до $T = 170$ К. Определить установившееся в сосудах давление p .

2.15 В баллоне вместимостью $V = 19$ л находится аргон под давлением $p_1 = 620$ кПа и при температуре $T_1 = 315$ К. Когда из баллона было взято некоторое количество газа, давление в баллоне понизилось до $p_2 = 450$ кПа, а температура установилась $T_2 = 280$ К. Определить массу m аргона, взятого из баллона.

2.16 Кислород массой 15 г находится под давлением $p_1 = 280$ кПа при температуре $t_1 = 11$ °С. После расширения вследствие нагревания при постоянном давлении кислород занял объем $V_2 = 11$ л. Найти: объем газа V_1 до расширения; температуру T_2 газа после расширения; плотность ρ_1 газа до расширения; плотность ρ_2 газа после расширения.

2.17 В сосуде вместимостью $V = 45$ л находится кислород при температуре $T = 315$ К. Когда часть газа израсходовали, давление в баллоне понизилось на 120 кПа. Определить массу m израсходованного кислорода. Процесс считать изотермическим.

2.18 Определить молярную массу газа, если при температуре $T = 231$ К и давлении $p = 4,2$ МПа он имеет плотность $\rho = 6,1$ кг/м³.

2.19 Ручной поршневой насос захватывает из атмосферы при каждом качании $V_1 = 65$ см³ воздуха. Сколько качаний нужно сделать насосом для того, чтобы давление p в камере велосипедной шины объемом $V = 2,5$ дм³ повысилось на 0,18 МПа? Давление атмосферного воздуха $p_0 = 0,1$ МПа. Нагревом воздуха в процессе сжатия пренебречь.

2.20 Открытая стеклянная колба вместимостью $V = 0,5$ дм³, содержащая воздух, нагрета до $t_1 = 147$ °С. Какой объем воды войдет в колбу при остывании ее до $t_2 = 33$ °С, если после нагревания ее горлышко опустили в воду.

2.21 В сосуде объемом $V = 35$ л содержится идеальный газ при температуре $T = 280$ К. После того, как часть газа была выпущена наружу, давление в сосуде понизилось на $\Delta p = 0,9$ атм (без изменения температуры). Определить массу m выпущенного газа. Плотность данного газа при нормальных условиях $\rho = 1,4$ г/л.

2.22 Азот массой $m = 7$ г, находящийся в закрытом сосуде объемом $V = 5$ л при температуре $t_1 = 21$ °С, нагревается до температуры $t_2 = 45$ °С. Определить давление газа до и после нагревания.

2.23 Плотность некоторого газа при температуре $t = 38$ °С и давлении $p = 220$ кПа равна $\rho = 0,34$ кг/м³. Чему равна масса двух киломолей этого газа?

2.24 В запаянном сосуде находится вода, занимающая объем, равный половине объема сосуда. Вычислить давление и плотность водяных паров при температуре $t = 420$ °С, зная, что при этой температуре вся вода превращается в пар.

2.25 В закрытом сосуде вместимостью $V = 1,2$ м³ находятся вода массой $m = 1,5$ кг и кислород массой $m_2 = 2,4$ кг. Найти давление p в сосуде при температуре $t = 550$ °С, зная, что при этой температуре вся вода превращается в пар.

2.26 Баллон вместимостью $V = 7$ л содержит смесь гелия и водорода при давлении $p = 700$ кПа. Масса m смеси равна 5 г, массовая доля гелия ω_1 равна 0,7. Определить температуру T смеси.

2.27 Газовая смесь, состоящая из кислорода и азота, находится в баллоне под давлением $p = 1,6$ МПа. Считая, что масса кислорода составляет 30 % от массы смеси, определить парциальные давления p_1 и p_2 отдельных газов.

2.28 Найти плотность ρ газовой смеси, состоящей по массе из одной части водорода и семи частей кислорода, при давлении $p = 120$ кПа и температуре $T = 320$ К.

2.29 В 10 кг сухого воздуха содержится $m_1 = 2,32$ кг кислорода и $m_2 = 7,68$ кг азота (массами других газов пренебрегаем). Определить молярную массу воздуха.

2.30 В сосуде объемом $V = 0,4$ м³ при температуре $T = 290$ К содержится смесь газов: азота массой $m_1 = 4$ г и кислорода массой $m_2 = 18$ г. Определить давление p смеси газов.

2.31 В сосуде находится смесь из $m_1 = 12$ г углекислого газа и $m_2 = 14$ г азота. Найти плотность этой смеси при температуре $t = 28$ °С и давлении $p = 1,3 \cdot 10^5$ Н/м².

2.32 В сосуде объемом $V = 0,03$ м³ при температуре $T = 280$ К содержится смесь газов: азота массой $m_1 = 12$ г и водорода массой $m_2 = 2$ г. Определить давление p смеси газов.

2.33 Какой объем занимает смесь азота массой $m_1 = 0,4$ кг и гелия массой $m_2 = 0,7$ кг при нормальных условиях?

2.34 В баллонах объемами $V_1 = 22$ л и $V_2 = 48$ л содержатся идеальные газы. Давление в первом баллоне $p_1 = 2,5$ МПа, во втором – $p_2 = 1,6$ МПа. Определить общее и парциальные давления газов после соединения баллонов, если температура газов осталась прежней.

2.35 Сосуд объемом $V = 26$ л содержит смесь водорода и гелия при температуре $t = 18$ °С и давлении $p = 0,2$ МПа. Масса смеси $m = 6$ г. Определить отношение массы водорода к массе гелия в данной смеси.

2.36 В вертикальном закрытом с обоих торцов цилиндре находится массивный поршень, по обе стороны которого – по одному молю воздуха. При $T_1 = 305$ К отношение верхнего объема к нижнему $k_1 = 4$. При какой температуре T_2 это отношение станет $k_2 = 3$?

2.37 Углекислый газ (CO_2) массой $m_1 = 8$ г и закись азота (N_2O) массой $m_2 = 6$ г заполняют сосуд объемом $V = 3 \cdot 10^{-3}$ м³. Каково общее давление в сосуде при температуре $t = 108$ °С?

2.38 Считая, что в воздухе содержится $\omega_1 = 23,6$ части кислорода и $\omega_2 = 76,4$ части азота, найти плотность воздуха при давлении $p = 95$ кПа и температуре $t = 16$ °С. Найти парциальные давления кислорода и азота при этих условиях.

2.39 В сосуде объемом $V = 0,6$ л находится $m = 1,2$ г паробразного йода. При температуре $t = 1050$ °С давление p в сосуде оказалось равным 96 кПа. Определить степень диссоциации молекул йода I_2 на атомы I при этих условиях. Масса одного моля I_2 равна 254 г/моль.

2.40 В сосуде находится углекислый газ. При некоторой температуре степень диссоциации молекул углекислого газа на кислород и окись углерода равна 30 %. Во сколько раз давление в сосуде при этих условиях будет больше того давления, которое имело бы место, если бы молекулы углекислого газа не были диссоциированы?

2.41 Колба вместимостью $V = 0,7$ л содержит газ при нормальных условиях. Определить число N молекул газа, находящихся в колбе.

2.42 Определить количество вещества ν и число N молекул азота массой $m = 0,7$ кг.

2.43 В баллоне вместимостью $V = 6$ л находится кислород массой $m = 5$ г. Определить количество вещества ν и концентрацию n его молекул.

2.44 Какое количество N молекул содержится в $m = 6$ г водяного пара?

2.45 Определить среднее значение $\langle \epsilon \rangle$ полной кинетической энергии одной молекулы гелия, кислорода и водяного пара при температуре $T = 550$ К.

2.46 При какой температуре T молекулы азота имеют такую же среднюю квадратичную скорость $\langle v_{\text{кв}} \rangle$, как молекулы водорода при температуре $T_1 = 140$ К?

2.47 Взвешенные в воздухе мельчайшие пылинки движутся так же, как и очень крупные молекулы. Определить среднюю квадратичную скорость $\langle v_{\text{кв}} \rangle$ пылинки массой $m = 3 \cdot 10^{-10}$ г, если температура воздуха $T = 305$ К.

2.48 В азоте взвешены мельчайшие пылинки, которые движутся так, как если бы они были очень крупными молекулами. Масса каждой пылинки $m = 4 \cdot 10^{-10}$ г. Газ находится при температуре $T = 450$ К. Определить средние квадратичные скорости $\langle v_{\text{кв}} \rangle$ и средние кинетические энергии $\langle \epsilon \rangle$ поступательного движения молекулы азота и пылинки.

2.49 Определить наиболее вероятную скорость v_v молекул водорода при температуре $T = 490$ К.

2.50 Сколько степеней свободы i имеет молекула, обладающая при температуре $7,1$ °С средней кинетической энергией теплового движения $\langle \epsilon \rangle = 9,7 \cdot 10^{-21}$ Дж?

2.51 Одна треть молекул азота массой $m = 14$ г распалась на атомы. Определить полное число N частиц, находящихся в колбе.

2.52 В сосуде вместимостью $V = 8$ л при нормальных условиях находится кислород. Определить количество вещества ν и массу m кислорода, а также концентрацию n его молекул в сосуде.

2.53 Определить количество вещества ν водорода, заполняющего сосуд объемом $V = 6$ л, если концентрация молекул газа в сосуде $n = 3 \cdot 10^8 \text{ м}^{-3}$.

2.54 Определить: сколько молекул N содержится в $V = 3 \text{ мм}^3$ воды; какова масса m одной молекулы воды; диаметр d молекулы воды, считая, что молекулы имеют вид шариков, соприкасающихся друг с другом.

2.55 Сколько молекул будет находиться в $V = 5 \text{ см}^3$ сосуда при температуре $t = 14 \text{ }^\circ\text{C}$, если сосуд откачали до $p = 10^{-11}$ мм рт. ст.

2.56 Определить, какую часть объема V , в котором находится газ при нормальных условиях, занимают молекулы. Диаметр d молекулы считать равным $1,1 \cdot 10^{-10}$ м.

2.57 Плотность ρ водорода при нормальных условиях составляет $0,09 \text{ кг/м}^3$. Определить массы атома и молекулы водорода.

2.58 Масса m_0 пылинки равна $3 \cdot 10^{-8}$ г. Как и во сколько раз она отличается от массы молекулы m воздуха? Молярная масса μ воздуха составляет 29 г/моль .

2.59 Определить массу m молекулы пропана C_3H_8 и его плотность ρ при нормальных условиях.

2.60 Молекула азота летит со скоростью $v = 490 \text{ м/с}$. Найти импульс этой молекулы.

2.61 В сосуде вместимостью $V = 5$ л находится водород массой $m = 2$ г. Какое количество N молекул находится в объеме $V = 4 \text{ см}^3$ этого сосуда?

2.62 В колбе вместимостью $V = 260 \text{ см}^3$ находится газ при температуре $T = 280 \text{ К}$ и давлении $p = 60 \text{ кПа}$. Определить количество вещества ν газа и число N его молекул.

2.63 Определить концентрацию n молекул кислорода, находящегося в сосуде вместимостью $V = 3$ л. Количество вещества ν кислорода равно $0,5$ моль.

2.64 Сколько молекул газа N находится в баллоне вместимостью $V = 33$ л при температуре $T = 310 \text{ К}$ и давлении $p = 2 \text{ МПа}$?

2.65 В колбе вместимостью $V = 120 \text{ см}^3$ содержится некоторый газ при температуре $T = 303 \text{ К}$. Как и насколько изменится давление p газа в колбе, если вследствие утечки газа из колбы вышло $\Delta N = 3 \cdot 10^{19}$ молекул?

2.66 Молекула кислорода, летящая со скоростью $v = 560$ м/с, ударяется нормально о стенку сосуда и упруго отскакивает от нее без потери скорости. Определить импульс силы, полученный стенкой сосуда за время удара.

2.67 Плотность некоторого газа $\rho = 0,07$ кг/м³, средняя квадратичная скорость $\langle v_{\text{кв}} \rangle$ молекул этого газ равна 500 м/с. Вычислить давление p , которое газ оказывает на стенки сосуда.

2.68 В сосуде находится смесь кислорода и водорода. Масса смеси $m = 4$ г. Массовая доля ω_1 кислорода составляет 0,6. Определить количество N молекул смеси, N_1 и N_2 каждого газа в отдельности.

2.69 Определить среднее расстояние $\langle b \rangle$ между центрами молекул водяного пара при нормальных условиях и сравнить его с диаметром d самих молекул ($d = 0,31$ нм).

2.70 Давление p газа равно 3 мПа, концентрация n его молекул составляет 10^{11} см⁻³. Определить: температуру T газа; среднюю кинетическую энергию $\langle \varepsilon_{\text{п}} \rangle$ поступательного движения молекул газа.

2.71 Определить кинетическую энергию $\langle \varepsilon_i \rangle$, приходящуюся в среднем на одну степень свободы i молекулы азота при температуре $T = 300$ К, а также среднюю кинетическую энергию $\langle \varepsilon_{\text{п}} \rangle$ поступательного движения, среднюю кинетическую энергию $\langle \varepsilon_{\text{в}} \rangle$ вращательного движения и среднее значение полной кинетической энергии $\langle \varepsilon \rangle$ одной молекулы.

2.72 Чему равна энергия E теплового движения всех молекул, содержащихся в $m = 25$ г азота при температуре $t = 17$ °С? Какая часть этой энергии приходится на энергию поступательного движения и какая – на энергию вращательного движения?

2.73 Двухатомный газ массой $m = 1,5$ кг находится под давлением $p = 9 \cdot 10^4$ Па и имеет плотность $\rho = 5$ кг/м³. Найти энергию E теплового движения всех молекул газа при этих условиях.

2.74 Определить среднюю квадратичную скорость $\langle v_{\text{кв}} \rangle$ молекулы газа, заключенного в сосуд вместимостью $V = 5$ л под давлением $p = 220$ кПа. Масса газа $m = 0,4$ г.

2.75 Смесь гелия и аргона находится при температуре $T = 2$ К. Определить среднюю квадратичную скорость $\langle v_{\text{кв}} \rangle$ и среднюю кинетическую энергию $\langle \varepsilon \rangle$ атомов гелия и аргона.

2.76 Плотность водорода ρ_1 и метана ρ_2 при некоторых одинаковых условиях соответственно равна $0,09 \text{ кг/м}^3$ и $0,72 \text{ кг/м}^3$. Вычислить молярную массу метана μ_2 .

2.77 Молекула азота, летящая со скоростью $v = 480 \text{ м/с}$, упруго ударяется о стенку сосуда. Угол α между направлением скорости молекулы и нормалью к стенке сосуда составляет 30° . Найти импульс силы, полученный стенкой сосуда за время удара.

2.78 Рассматривая молекулы жидкости как шарики, соприкасающиеся друг с другом, оценить порядок размера диаметра молекулы сероуглерода CS_2 . При тех же предположениях оценить порядок размера диаметра атомов ртути. Плотности жидкостей считать известными.

2.79 Определить число молекул ртути N , содержащихся в воздухе объемом $V = 3 \text{ м}^3$ в помещении, зараженном ртутью, при температуре $t = 20^\circ \text{C}$, если давление p насыщенного пара ртути при этой температуре равно $0,13 \text{ Па}$.

2.80 Сосуд с газом из одноатомных молекул движется со скоростью $v = 25 \text{ м/с}$. Молярная масса газа $\mu = 4 \text{ г/моль}$. Вычислить повышение температуры газа после внезапной остановки сосуда.

2.81 В атмосфере находятся частицы пыли массой $m = 8 \cdot 10^{-22} \text{ кг}$. Найти, во сколько раз отличаются их концентрации на высотах $h_1 = 4 \text{ м}$ и $h_2 = 45 \text{ м}$. Воздух находится при нормальных условиях.

2.82 На какой высоте h давление p воздуха составляет 85% от давления p_0 на уровне моря. Температуру t считать постоянной и равной 0°C .

2.83 Каково давление p воздуха в шахте на глубине $h = 1,5 \text{ км}$, если считать что температура T по всей глубине постоянна и равна 290 К , а ускорение свободного падения g не зависит от высоты? Давление p_0 у поверхности земли равно 10^5 Па .

2.84 На какой глубине шахты плотность ρ_1 газа на 5% больше плотности ρ_0 его на уровне моря? Температуру T считать постоянной и равной 287 К . Задачу решить для воздуха, кислорода и азота.

2.85 Какая часть молекул азота, находящегося при температуре $T = 450 \text{ К}$, имеет скорости, лежащие в интервале от v_b до $v_b + \Delta v$, где $\Delta v = 1 \text{ м/с}$?

2.86 Какая часть молекул кислорода при $t = 15\text{ }^\circ\text{C}$ обладает скоростями от $v = 110\text{ м/с}$ до $v + \Delta v = 111\text{ м/с}$?

2.87 Какая часть молекул азота при температуре $170\text{ }^\circ\text{C}$ обладает скоростями от $v = 348\text{ м/с}$ до $v + \Delta v = 350\text{ м/с}$?

2.88 Какая часть молекул водорода при температуре $t = 7\text{ }^\circ\text{C}$ обладает скоростями от $v = 2100\text{ м/с}$ до $v + \Delta v = 2110\text{ м/с}$?

2.89 Найти относительное число молекул $\Delta N/N$ гелия, скорости которых лежат в интервале от $v = 1990$ до $v + \Delta v = 2000\text{ м/с}$ при температуре $T = 400\text{ К}$.

2.90 Определить относительное число молекул идеального газа, скорости которых заключены в пределах от $v = 0\text{ м/с}$ до $v = 0,03v_{\text{в}}$.

2.91 Пылинки, взвешенные в воздухе, имеют массу $m = 2 \cdot 10^{-18}\text{ г}$. Во сколько раз уменьшится их концентрация n при увеличении высоты на $\Delta h = 20\text{ м}$? Температура воздуха $T = 305\text{ К}$.

2.92 Насколько уменьшится атмосферное давление $p = 100\text{ кПа}$ при подъеме на высоту $h = 150\text{ м}$ над поверхностью Земли? Считать, что температура воздуха $T = 300\text{ К}$ не изменяется с высотой.

2.93 Барометр в кабине летящего вертолета показывает давление $p = 90\text{ кПа}$. На какой высоте h летит вертолет, если на взлетной площадке барометр показывал давление $p_0 = 100\text{ кПа}$? Считать, что температура T воздуха равна 295 К и не меняется с высотой.

2.94 На какой высоте h концентрация n_1 молекул газа составляет 60 % от концентрации n_0 на уровне моря. Температуру считать постоянной и равной $11\text{ }^\circ\text{C}$? Задачу решить для воздуха, водорода и кислорода.

2.95 Пассажирский самолет совершает полеты на высоте $h = 8200\text{ м}$. Чтобы не снабжать пассажиров кислородными масками, в кабинах при помощи компрессора поддерживается постоянное давление, соответствующее высоте $h_2 = 2600\text{ м}$. Найти разность давлений внутри и снаружи кабины. Среднюю температуру наружного воздуха считать равной $T = 273\text{ К}$.

2.96 По данным предыдущей задачи определить, во сколько раз плотность ρ_1 воздуха в кабине больше плотности ρ_2 воздуха вне ее, если температура наружного воздуха $T_1 = -18\text{ }^\circ\text{C}$, а температура внутри кабины $T_2 = 22\text{ }^\circ\text{C}$.

2.97 На какой высоте плотность ρ_1 газа составляет 50 % от плотности ρ_0 его на уровне моря? Температуру T считать постоянной и равной 280 К. Задачу решить для воздуха, водорода и азота.

2.98 Найти изменение высоты Δh , соответствующее изменению давления на $\Delta p = 120$ Па: 1) вблизи поверхности земли, где температура $T_1 = 295$ К и давление $p_1 = 100$ кПа; 2) на некоторой высоте, где температура $T_2 = 245$ К и давление $p_2 = 40$ кПа.

2.99 При подъеме вертолета на высоту h барометр, находящийся в его кабине, изменил свое показание на $\Delta p = 15$ кПа. На какой высоте летит самолет, если на летной площадке барометр показывал $p_0 = 0,1$ МПа? Температура воздуха постоянна и равна 22 °С.

2.100 Каковы давление p и число n молекул в единице объема воздуха на высоте $h = 3$ км над уровнем моря. Давление на уровне моря $p_0 = 102$ кПа, а температура $t = 19$ °С. Изменением температуры с высотой пренебречь.

2.101 Барометр в кабине летящего самолета все время показывает одинаковое давление $p = 81$ кПа, поэтому летчик считает высоту неизменной. Однако температура воздуха изменилась на $\Delta T = 2$ К. Какую ошибку Δh в определении высоты допускает летчик? Считать, что температура не зависит от высоты и что у поверхности земли давление $p_0 = 100$ кПа.

2.102 Сколько весит $V = 2$ м³ воздуха: 1) у поверхности земли; 2) на высоте $h = 6$ км от поверхности земли? Давление у поверхности земли $p_0 = 10^5$ Па. Температура $t = 10$ °С и не меняется с высотой.

2.103 Масса m каждой из пылинок, взвешенных в воздухе, равна 10^{-18} г. Отношение концентрации n_1 пылинок на высоте $h_1 = 0,1$ м к концентрации n_2 их у поверхности земли равно 0,787. Температура воздуха $T = 300$ К. Вычислить по этим данным число Авогадро N_A .

2.104 Идеальный газ с молярной массой μ находится в высоком вертикальном цилиндрическом сосуде, площадь основания которого S и высота h . Температура газа T , его давление на нижнее основание p_0 . Считая, что температура и ускорение свободного падения g не зависят от высоты, определить массу m газа в сосуде.

2.105 Азот находится при нормальных условиях и занимает объем $V = 2$ см³. Определить число N молекул в этом объеме, обладающих скоростями меньше 2 м/с.

2.106 Определить отношение числа N_1 молекул водорода, скорости которых лежат в интервале от $v_1 = 2$ км/с до $v + \Delta v = 2,02$ км/с, к числу N_2 молекул, скорости которых лежат в интервале от $v_2 = 1$ км/с до $v_2 + \Delta v = 1,02$ км/с, если температура водорода $t = 7$ °С.

2.107 Какая часть молекул кислорода обладает скоростями, отличающимися от наиболее вероятной v_b не более чем на 8 м/с, при температуре $T = 350$ К?

2.108 Определить долю молекул идеального газа, энергии которых отличаются от средней энергии $\langle \epsilon_{\text{п}} \rangle$ поступательного движения молекул при той же температуре не более чем на 2 %.

2.109 Определить долю молекул идеального газа, энергия которых заключена в пределах от $\epsilon_1 = 0$ Дж до $\epsilon_2 = 0,02 kT$.

2.110 Найти долю молекул идеального газа, кинетические энергии которых отличаются от наиболее вероятного значения ϵ_b энергии не более чем на 1,5 %.

2.111 Число молекул, энергия которых заключена в пределах от нуля до некоторого значения ϵ , составляет 0,1 % от общего числа молекул. Определить величину ϵ в долях kT .

2.112 В сосуде находится кислород массой $m = 8$ г при температуре $T = 1500$ К. Какое число N молекул кислорода имеет энергию $\langle \epsilon_{\text{п}} \rangle$ поступательного движения, превышающую значение $6,66 \cdot 10^{-20}$ Дж?

2.113 Во сколько раз число молекул, скорости которых лежат в интервале от v_b до $v_b + \Delta v$, больше числа молекул, скорости которых лежат в интервале от $\langle v_{\text{кв}} \rangle$ до $\langle v_{\text{кв}} \rangle + \Delta v$?

2.114 При какой температуре 50 % всех молекул имеет среднюю энергию поступательного движения, превышающую $1,6 \cdot 10^{-19}$ Дж?

2.115 Как и во сколько раз изменится значение максимума функции распределения молекул идеального газа по энергиям $f(\epsilon)$, если температура T увеличится в два раза? Решение пояснить графиком.

2.116 Одинаковые частицы массой $m = 3 \cdot 10^{-12}$ г каждая распределены в однородном гравитационном поле напряженностью $G = 0,2$ мкН/кг. Определить отношение n_1 / n_2 концентраций частиц, находящихся на эквипотенциальных уровнях, отстоящих друг от друга на $\Delta z = 11$ м. Температура T во всех слоях считается одинаковой и равной 295 К.

2.117 Определить силу F , действующую на частицу, находящуюся во внешнем однородном поле силы тяжести, если отношение n_1 / n_2 концентраций частиц на двух уровнях, отстоящих друг от друга на $\Delta z = 2$ м, равно 4. Температуру T считать везде одинаковой и равной 297 К.

2.118 Ротор центрифуги вращается с угловой скоростью ω . Используя функцию распределения Больцмана, установить зависимость n частиц массой m , находящихся в роторе центрифуги, как функцию расстояния r от оси вращения.

2.119 Ротор центрифуги, заполненный радоном, вращается с частотой $n = 60$ с⁻¹. Радиус ротора $r = 0,7$ м. Определить давление p газа на стенки ротора, если в его центре давление p_0 равно нормальному атмосферному. Температуру T по всему объему считать одинаковой и равной 295 К.

2.120 Газ находится в очень высоком цилиндрическом сосуде при температуре T . Считая гравитационное поле однородным, определить среднее значение потенциальной энергии молекул газа. Как зависит эта величина от того, состоит ли газ из одного сорта молекул или из нескольких сортов?

2.121 Найти среднюю длину $\langle l \rangle$ свободного пробега молекул азота при давлении $p = 0,2$ Па и температуре $T = 160$ К.

2.122 Баллон вместимостью $V = 10$ л содержит кислород массой $m = 3$ г. Определить среднюю длину $\langle l \rangle$ свободного пробега молекул кислорода.

2.123 Найти среднюю продолжительность свободного пробега $\langle \tau \rangle$ молекул водорода при температуре $T = 300$ К и давлении $p = 120$ Па.

2.124 Найти среднее число $\langle z \rangle$ столкновений, испытываемых в течение $t = 1$ с молекулой азота при нормальных условиях.

2.125 Средняя длина $\langle l \rangle$ свободного пробега атомов гелия при 0 °С равна 180 нм. Вычислить коэффициент диффузии D гелия.

2.126 Найти массу m азота, прошедшего вследствие диффузии через площадку $S = 120$ см² за $\tau = 12$ с, если градиент плотности в направлении, перпендикулярном к площадке, равен 1,27 кг/м⁴. Температура азота $t = 27$ °С, средняя длина свободного пробега молекул азота $\langle l \rangle = 10^{-5}$ см.

2.127 Коэффициент диффузии кислорода $D = 0,19 \text{ см}^2/\text{с}$ при температуре $t = 0 \text{ }^\circ\text{C}$. Вычислить среднюю длину $\langle l \rangle$ свободного пробега молекул кислорода.

2.128 Вычислить коэффициент диффузии D водорода при нормальных условиях, если средняя длина свободного пробега молекул $\langle l \rangle = 160 \text{ нм}$.

2.129 Вычислить динамическую вязкость η водорода при нормальных условиях.

2.130 Найти диаметр d молекулы кислорода, если известен коэффициент внутреннего трения η при $0 \text{ }^\circ\text{C}$ (см. приложение А).

2.131 Найти коэффициент теплопроводности λ водорода, если известен коэффициент внутреннего трения η (см. приложение А).

2.132 Определить плотность ρ аргона, если средняя длина свободного пробега $\langle l \rangle$ молекул равна 3 см .

2.133 Найти среднее число $\langle z \rangle$ столкновений в 1 секунду молекул углекислого газа при температуре $t = 100 \text{ }^\circ\text{C}$, если средняя длина свободного пробега при этих условиях $\langle l \rangle = 8,7 \cdot 10^{-2} \text{ см}$.

2.134 Найти среднюю длину свободного пробега $\langle l \rangle$ атомов гелия в условиях, когда плотность гелия $\rho = 2,4 \cdot 10^{-2} \text{ кг/м}^3$.

2.135 В сосуде вместимостью $V = 6 \text{ л}$ находится водород массой $m = 0,6 \text{ г}$. Определить среднюю длину свободного пробега $\langle l \rangle$ молекул водорода в этом сосуде.

2.136 В сферической колбе вместимостью $V = 4 \text{ л}$, содержащей азот, создан вакуум с давлением $p = 80 \text{ мкПа}$. Температура азота $T = 255 \text{ К}$. Можно ли считать вакуум в колбе высоким, если таким считается вакуум, в котором длина свободного пробега молекул $\langle l \rangle$ много больше линейных размеров сосуда.

2.137 В сосуде объемом $V_1 = 2 \text{ дм}^3$ находится кислород при температуре $t = 12 \text{ }^\circ\text{C}$ и давлении $p = 0,3 \text{ МПа}$. Определить число $\langle z \rangle$ столкновений молекул кислорода в этом сосуде за время $\tau = 1 \text{ с}$.

2.138 При каком давлении средняя длина свободного пробега молекул углекислого газа $\langle l \rangle = 1,1 \text{ м}$, если его температура $T = 315 \text{ К}$?

2.139 Можно ли считать вакуум с давлением $p = 100 \text{ мкПа}$ высоким, если он создан в колбе диаметром $d = 25 \text{ см}$, содержащей кислород при температуре $T = 290 \text{ К}$. Высокий вакуум – это вакуум, в котором длина свободного пробега молекул $\langle l \rangle$ много больше линейных размеров сосуда.

2.140 Найти коэффициент диффузии D азота: 1) при нормальных условиях; 2) при давлении $p = 110$ Па и температуре $T = 300$ К.

2.141 Определить, как и во сколько раз отличается коэффициент диффузии D_1 газообразного кислорода от коэффициента диффузии D_2 газообразного водорода, если оба газа находятся при одинаковых условиях.

2.142 При каком давлении p отношение коэффициента внутреннего трения η некоторого газа к коэффициенту его диффузии D составляет $0,3$ г/л, а средняя квадратичная скорость его молекул $\langle v_{\text{кв}} \rangle = 632$ м/с?

2.143 Определить коэффициент диффузии D и коэффициент внутреннего трения η воздуха при давлении $p = 0,1$ МПа и температуре $T = 285$ К. Эффективный диаметр молекул воздуха $d = 0,3$ нм.

2.144 Коэффициенты диффузии D и внутреннего трения η водорода при некоторых условиях $D = 1,42$ см²/с и $\eta = 8,5$ мкПа·с. Определить число N молекул водорода в $V = 3$ м³ при этих условиях.

2.145 Вычислить коэффициент внутреннего трения η азота при нормальных условиях, если коэффициент диффузии D для него при этих условиях составляет $8,9 \cdot 10^{-2}$ м²/с.

2.146 Найти среднюю длину свободного пробега молекул азота при давлении 10^5 Па, если известна его динамическая вязкость.

2.147 Считая известной динамическую вязкость гелия при нормальных условиях, определить эффективный диаметр его атомов.

2.148 Вычислить коэффициент теплопроводности λ гелия при нормальных условиях.

2.149 В сосуде объемом $V = 2$ л находится $N = 4 \cdot 10^{22}$ молекул двухатомного газа. Коэффициент теплопроводности этого газа $\lambda = 0,013$ Вт/(м·К). Найти коэффициент диффузии D газа при этих условиях.

2.150 Коэффициент диффузии углекислого газа при нормальных условиях $D = 10$ мм²/с. Определить коэффициент внутреннего трения η углекислого газа при этих условиях.

2.151. Найти коэффициент теплопроводности λ воздуха при температуре $t = 15$ °С, если известен эффективный диаметр d молекулы воздуха (см. приложение А).

2.152 Углекислый газ и кислород находятся при одинаковых температуре и давлении. Определить для этих газов отношение: 1) коэффициентов диффузии; 2) коэффициентов внутреннего трения; 3) коэффициентов теплопроводности. Эффективные диаметры молекул газов считать одинаковыми.

2.153 Коэффициент теплопроводности гелия в 8,7 раза больше, чем у аргона (при нормальных условиях). Вычислить отношение эффективных диаметров атомов аргона и гелия.

2.154 Пространство между двумя большими параллельными пластинами, расстояние между которыми $d = 5$ мм, заполнено гелием. Температура T_1 одной пластины поддерживается равной 295 К, другой $T_2 = 315$ К. Вычислить плотность теплового потока $|q|$. Расчеты выполнить для $p_1 = 0,1$ МПа и $p_2 = 1,5$ МПа.

2.155 Как и во сколько раз изменится число столкновений $\langle z \rangle$ в 1 секунду молекул двухатомного газа, если объем V газа адиабатически увеличить в 2 раза?

2.156 Найти число N всех соударений, которые происходят в течение времени $t = 3$ с между всеми молекулами азота, занимающего при нормальных условиях объем $V_1 = 3$ мм³.

2.157 В газоразрядной трубке находится неон при температуре $T = 300$ К и давлении $p = 1$ Па. Найти число N атомов неона, ударяющихся за время $\Delta t = 5$ с о катод, имеющий форму диска площадью $S = 1,2$ см².

2.158 Определить зависимость коэффициента диффузии D от температуры T при изобарическом и изохорическом процессах.

2.159 Определить зависимость коэффициента диффузии D от давления p при изотермическом и изохорическом процессах.

2.160 Два сосуда A и B соединены трубкой диаметром $d = 1,1$ см и длиной $l = 1,9$ см. Трубка снабжена краном. При закрытом кране давление воздуха в сосуде A равно p_1 ; сосуд B откачан до давления $p_2 \ll p_1$. Определить, какое количество воздуха продиффундирует из сосуда A в сосуд B в первые две секунды после открытия крана. Температуру воздуха в обоих сосудах считать $t = 18$ °С.

2.161 Определить для азота отношение удельной теплоемкости при постоянном давлении c_p к удельной теплоемкости при постоянном объеме c_V .

2.162 Вычислить удельную теплоемкость при постоянном давлении c_p для хлористого водорода.

2.163 Трехатомный газ под давлением $p = 240$ кПа и температуре $t = 20$ °С занимает объем $V = 10$ л. Найти молярную теплоемкость газа C_V при постоянном объеме.

2.164 Вычислить удельные теплоемкости c_p и c_V гелия и водорода.

2.165 Азот массой $m = 7$ кг, нагретый на $T = 160$ К, сохранил неизменным объем V . Найти количество теплоты Q , сообщенное газу, изменение внутренней энергии ΔU и совершенную газом работу A .

2.166 Азот нагревался при постоянном давлении, причем ему было сообщено количество теплоты $Q = 25$ кДж. Определить работу A , которую совершил при этом газ, и изменение ΔU его внутренней энергии.

2.167 Объем V водорода при изотермическом расширении при температуре $T = 350$ К увеличился в 4 раза. Определить работу A , совершенную газом, и теплоту Q , полученную газом при этом процессе. Масса m водорода равна 200 г.

2.168 На нагревание кислорода массой $m = 160$ г на $t = 12$ °С было затрачено количество теплоты $Q = 1,76$ кДж. Как протекал процесс: при постоянном объеме или постоянном давлении?

2.169 При изотермическом расширении $\nu = 1$ моль азота, имевшего температуру $T = 305$ К, газу было передано количество теплоты $Q = 3$ кДж. Во сколько раз увеличился объем газа?

2.170 Какое количество теплоты Q выделится, если азот массой $m = 10$ г, взятый под давлением $p_1 = 0,2$ МПа, изотермически сжать при температуре $T = 290$ К до давления $p_2 = 2$ МПа?

2.171 Разность удельных теплоемкостей $c_p - c_V$ некоторого двухатомного газа равна 260 Дж/(кг·К). Определить молярную массу μ газа и его удельные теплоемкости c_p и c_V .

2.172 Найти удельные теплоемкости c_p и c_V смеси газов, содержащей кислород массой $m_1 = 15$ г и азот массой $m_2 = 30$ г.

2.173 Чему равны удельные теплоемкости c_p и c_V некоторого двухатомного газа, если плотность ρ этого газа при нормальных условиях составляет 1,43 кг/м³?

2.174 Найти показатель адиабаты γ для смеси газов, содержащей гелий массой $m_1 = 16$ г и водород – массой $m_2 = 6$ г.

2.175 Для некоторого двухатомного газа удельная теплоемкость при постоянном давлении $c_p = 1,4 \cdot 10^3$ Дж/(кг·К). Чему равна масса одного моля этого газа?

2.176 Найти показатель адиабаты γ смеси водорода и аргона, если массовые доли обоих газов в смеси одинаковы $\omega_1 = \omega_2 = 0,5$.

2.177 Смесь газов состоит из неона и азота, взятых при одинаковых условиях и одинаковых объемах. Определить показатель адиабаты γ этой смеси.

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

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

2.180 Одноатомный газ при нормальных условиях занимает объем $V = 5$ л. Вычислить молярную теплоемкость этого газа при постоянном объеме C_v .

2.181 Найти показатель адиабаты γ газовой смеси, состоящей из кислорода ($\nu_1 = 2$ моль) и углекислого газа ($\nu_2 = 4$ моль).

2.182 При адиабатическом сжатии кислорода массой $m = 1,2$ кг совершена работа $A = 120$ кДж. Определить конечную температуру T_2 газа, если начальная температура кислорода $T_1 = 310$ К.

2.183 При адиабатическом сжатии кислорода массой $m = 24$ г его внутренняя энергия увеличилась на $\Delta U = 9$ кДж. Температура при этом повысилась до $T_2 = 980$ К. Найти повышение температуры ΔT и конечное давление газа p_2 , если начальное давление $p_1 = 210$ кПа.

2.184 Определить количество теплоты Q , которое надо сообщить кислороду объемом $V = 57$ л при его изохорном нагревании, чтобы давление газа повысилось на $\Delta p = 0,6$ МПа.

2.185 Водяной пар расширяется при постоянном давлении. Определить работу A расширения, если пару передано количество теплоты $Q = 6$ кДж.

2.186 Кислород в количестве $\nu = 1$ кмоль, находящийся при нормальных условиях, расширяется адиабатически от объема V_1 до объема $V_2 = 6V_1$. Найти изменение внутренней энергии газа ΔU и работу A , совершенную им при расширении.

2.187 Закрытый баллон вместимостью $V = 0,9 \text{ м}^3$ заполнен азотом под давлением $p_1 = 2,4 \cdot 10^3 \text{ Па}$ при температуре $T_1 = 295 \text{ К}$. Газу сообщили количество теплоты $Q = 4,7 \cdot 10^3 \text{ кДж}$. Определить температуру T_2 и давление p_2 газа в конце процесса.

2.188 Азот массой $m = 210 \text{ г}$ нагревают при постоянном давлении от температуры $t_1 = 25 \text{ }^\circ\text{C}$ до $t_2 = 270 \text{ }^\circ\text{C}$. Какое количество теплоты Q поглощается при этом? Каков прирост внутренней энергии ΔU газа? Какая работа A совершается газом?

2.189 Водород занимает объем $V_1 = 10 \text{ м}^3$. Газ изохорно нагрели от давления $p_1 = 0,2 \text{ МПа}$ до давления $p_2 = 0,5 \text{ МПа}$. Определить изменение внутренней энергии ΔU газа, работу A , совершенную газом, и количество теплоты Q , сообщенное газу.

2.190 Водород массой $m = 12 \text{ г}$ нагрели на $\Delta T = 220 \text{ К}$, причем газу было передано количество теплоты $Q = 48 \text{ кДж}$. Найти изменение внутренней энергии ΔU водорода и совершенную им работу A .

2.191 Двухатомный газ, находящийся при температуре $t_1 = 20 \text{ }^\circ\text{C}$, изотермически сжимают так, что его объем V_1 уменьшается в 3 раза. Затем газ расширяют адиабатически до начального давления p_1 . Найти температуру T_2 в конце адиабатического расширения.

2.192 Вычислить молярную массу μ газа, если при его изобарическом нагревании на $\Delta t_1 = 10 \text{ }^\circ\text{C}$ требуется на $\Delta Q = 1,48 \text{ кДж}$ теплоты больше, чем при изохорическом нагревании. Масса газа $m = 500 \text{ г}$.

2.193 Объем водорода при нормальных условиях $V_1 = 130 \text{ м}^3$. Найти изменение ΔU внутренней энергии при его адиабатическом расширении до $V_2 = 160 \text{ м}^3$.

2.194 Углекислый газ, находившийся под давлением $p_1 = 120 \text{ кПа}$ при температуре $T_1 = 295 \text{ К}$, был адиабатически сжат до давления $p_2 = 230 \text{ кПа}$. Какова температура T_2 газа после сжатия?

2.195 Вычислить удельные теплоемкости при постоянном объеме c_V и постоянном давлении c_p смеси неона и водорода, если массовые доли неона и водорода составляют соответственно $\omega_1 = 70 \text{ \%}$ и $\omega_2 = 30 \text{ \%}$.

2.196 При политропном процессе давление и объем определенной массы кислорода меняются от $p_1 = 0,4 \text{ МПа}$ и $V_1 = 1 \text{ л}$ до $p_2 = 0,1 \text{ МПа}$ и $V_2 = 2 \text{ л}$. Температура в начале процесса $T_1 = 500 \text{ К}$. Определить: 1) какое количество тепла получил кислород от окру-

жающей среды; 2) как и насколько изменилась внутренняя энергия газа.

2.197 Газовая смесь состоит из азота массой $m_1 = 6$ кг и водяного пара массой $m_2 = 2$ кг. Принимая эти газы за идеальные, определить удельные теплоемкости c_p и c_v газовой смеси.

2.198 Отношение удельных теплоемкостей c_p и c_v смеси нескольких киломолей азота и $v_2 = 6$ киломолей аммиака равно 1,33. Определить число v_1 киломолей азота в смеси.

2.199 Степень диссоциации газообразного водорода $\alpha = 0,7$. Вычислить удельные теплоемкости такого частично диссоциированного водорода при постоянном давлении c_p и постоянном объеме c_v .

2.200 Определить показатель адиабаты γ частично диссоциированного азота, степень диссоциации которого $\alpha = 0,3$.

2.201 Идеальная тепловая машина работает по циклу Карно. Определить КПД цикла, если известно, что за один цикл была произведена работа A , равная 300 Дж, и холодильнику было передано $Q_2 = 120$ Дж теплоты.

2.202 Газ, совершающий цикл Карно, получает от нагревателя теплоту $Q_1 = 15$ кДж. Определить температуру теплоотдатчика T_1 , если при температуре теплоприемника $T_2 = 275$ К работа цикла составляет $A = 7$ кДж.

2.203 Газ, совершающий цикл Карно, получает от нагревателя теплоту $Q_1 = 99$ кДж. Определить работу газа A , если температура теплоотдатчика T_1 в четыре раза выше температуры T_2 теплоприемника.

2.204 Идеальный газ совершает цикл Карно. Температура нагревателя T_1 в пять раз выше температуры T_2 охладителя. Нагреватель передал газу количество теплоты $Q_1 = 49$ кДж. Какую работу A совершил газ?

2.205 Найти изменение энтропии ΔS при изобарном расширении кислорода массой $m = 5$ г от объема $V_1 = 4$ л до $V_2 = 12$ л.

2.206 Углекислый газ массой $m = 10,5$ г расширяется изобарно до удвоения объема. Найти изменение энтропии ΔS .

2.207 Найти изменение энтропии ΔS при изобарном расширении $m = 10$ г аргона от объема $V_1 = 12$ л до объема $V_2 = 30$ л.

2.208 Азот массой $m = 16,5$ г изотермически расширяется от объема $V_1 = 3$ л до объема $V_2 = 9$ л. Найти прирост энтропии ΔS .

2.209 Гелий в количестве $\nu = 1$ кмоль, изобарно расширяясь, увеличил свой объем в 4 раза. Каково изменение энтропии ΔS при этом расширении?

2.210 В результате изохорного нагревания ксенона давление газа p увеличилось в три раза. Вычислить изменение энтропии газа ΔS , если масса ксенона $m = 4,9$ г

2.211 Идеальная тепловая машина, работающая по циклу Карно, получает за каждый цикл от нагревателя теплоту $Q_1 = 620$ кДж. Температура нагревателя $T_1 = 410$ К, температура холодильника $T_2 = 310$ К. Найти работу A , совершаемую машиной за один цикл, и количество тепла Q_2 , отдаваемого холодильнику.

2.212 Идеальная тепловая машина, работающая по циклу Карно, совершает за один цикл работу $A = 7,25 \cdot 10^4$ Дж. Температура нагревателя $t_1 = 120$ °С, температура холодильника $t_2 = 5$ °С. Определить: КПД η машины; количество теплоты Q_1 , получаемое машиной за один цикл от нагревателя; количество теплоты Q_2 , отдаваемое за один цикл холодильнику.

2.213 В цикле Карно газ получил от теплоотдатчика количество теплоты $Q_1 = 510$ Дж и совершил работу $A = 105$ Дж. Температура теплоотдатчика $T_1 = 420$ К. Определить температуру T_2 теплоприемника.

2.214 Идеальная тепловая машина работает по циклу Карно. Температура нагревателя $T_1 = 560$ К, холодильника – $T_2 = 260$ К. Определить термический КПД цикла; работу A_1 рабочего вещества при изотермическом расширении, если при изотермическом сжатии совершена работа $A_2 = 80$ Дж.

2.215 Во сколько раз увеличится коэффициент полезного действия η цикла Карно при повышении температуры теплоотдатчика от $T_1 = 350$ К до $T_1' = 570$ К? Температура теплоприемника $T_2 = 275$ К.

2.216 Определить работу A_2 изотермического сжатия газа, совершающего цикл Карно, КПД которого $\eta = 0,3$, если работа изотермического расширения $A_1 = 12$ Дж.

2.217 Идеальный газ совершает цикл Карно. Температура нагревателя $T_1 = 480$ К, температура охладителя $T_2 = 278$ К. При изотермическом расширении газ совершает работу $A_1 = 115$ Дж. Определить термический КПД цикла и количество теплоты Q_2 , которую газ отдает охладителю при изотермическом сжатии.

2.218 Идеальный газ, совершающий цикл Карно, получив от нагревателя количество теплоты $Q_1 = 4,8$ кДж, совершил работу $A = 680$ Дж. Найти термический КПД этого цикла. Во сколько раз температура T_1 нагревателя больше температуры T_2 охладителя?

2.219 У тепловой машины, работающей по циклу Карно, температура нагревателя в два раза больше температуры холодильника. За один цикл машина производит работу $A = 15$ кДж. Какая работа за цикл затрачивается на изотермическое сжатие?

2.220 Холодильная машина, работающая по обратному циклу Карно, совершает за один цикл работу $A = 39$ кДж, беря при этом тепло от тела с температурой -18 °С и передавая телу с температурой 30 °С. Найти: 1) КПД цикла; 2) количество теплоты, отнятого у холодного тела за один цикл; 3) количество теплоты, переданного горячему телу за один цикл.

2.221 Холодильная машина, работающая по обратному циклу Карно, должна поддерживать в своей камере температуру -10 °С при температуре окружающей среды 25 °С. Какую работу надо совершить над рабочим веществом машины, чтобы отвести от ее камеры количество теплоты $Q_2 = 150$ кДж?

2.222 Смешали воду массой $m_1 = 6$ кг при температуре $T_1 = 290$ К с водой массой $m_2 = 10$ кг при температуре $T_2 = 370$ К. Найти: температуру смеси T ; изменение энтропии ΔS , происшедшее при смешивании.

2.223 Найти изменение энтропии ΔS при превращении $m = 11$ г льда, взятого при $t_1 = -23$ °С, в пар при $t_2 = 100$ °С.

2.224 Кислород массой $m = 3$ кг увеличил свой объем в 5 раз, один раз изотермически, другой – адиабатно. Найти изменение энтропии ΔS в каждом из указанных случаев.

2.225 При нагревании двухатомного газа ($\nu = 2$ кмоль) его абсолютная температура T_1 увеличилась в 3 раза. Найти изменение энтропии ΔS , если нагревание происходит: 1) изохорно; 2) изобарно.

2.226 Кислород массой $m = 12$ г нагревается от температуры $t_1 = 55$ °С до температуры $t_2 = 160$ °С. Найти изменение энтропии ΔS , если нагревание происходит: 1) изохорно; 2) изобарно.

2.227 Водород массой $m = 160$ г был изобарно нагрет так, что его объем V_1 увеличился в 4 раза, затем водород был изохорно охлажден

так, что его давление p_1 уменьшилось в 4 раза. Найти изменение энтропии ΔS в ходе этих процессов.

2.228 Лед массой $m = 4$ кг, взятый при температуре $t_1 = 0$ °С, был превращен в воду той же температуры с помощью пара, имеющего температуру $t_2 = 100$ °С. Определить массу израсходованного пара. Каково изменение энтропии ΔS системы лед – пар?

2.229 Найти изменение энтропии ΔS при переходе кислорода массой $m = 8$ г от объема $V_1 = 12$ л при температуре $t_1 = 82$ °С к объему $V_2 = 44$ л при температуре $t_2 = 305$ °С.

2.230 Найти изменение энтропии ΔS при переходе $m = 6$ г водорода от объема $V_1 = 25$ л под давлением $p_1 = 1,6 \cdot 10^5$ Па к объему $V_2 = 70$ л под давлением $p_2 = 10^5$ Па.

2.231 Расплавленный свинец массой $m = 660$ г при температуре плавления вылили на лед, находящийся при температуре $t = 0$ °С. Найти изменение энтропии ΔS при этом процессе.

2.232 Найти изменение энтропии ΔS при превращении воды массой $m = 5$ г, взятой при температуре $t_1 = 1$ °С, в пар при $t_2 = 100$ °С.

2.233 Во сколько раз следует увеличить изотермически объем идеального газа в количестве $\nu = 1$ моль, чтобы его энтропия увеличилась на $\Delta S = 28$ Дж/К?

2.234 Гелий массой $m = 1,6$ г был адиабатно расширен в 5 раз и затем изобарно сжат до первоначального объема. Найти изменение энтропии ΔS в ходе этих процессов.

2.235. Изменение энтропии на участке между двумя адиабатами в цикле Карно $\Delta S = 950$ Дж/К. Разность температур между двумя изотермами $\Delta T = 95$ °С. Какое количество тепла превращается в работу в этом цикле?

2.236 Идеальная холодильная машина работает по обратному циклу Карно, переносящему теплоту от холодильника с водой при температуре $T_2 = 273$ К к кипятыльнику с водой при температуре $T_1 = 373$ К. Какое количество воды нужно заморозить в холодильнике, чтобы превратить в пар воду массой $m = 1,5$ кг в кипятыльнике.

2.237 Наименьший объем идеального газа, совершающего цикл Карно, $V_1 = 157$ л. Определить наибольший объем V_3 , если объем V_2 в конце изотермического расширения и объем V_1 в конце изотермического сжатия равны соответственно 603 и 191 л.

2.238 Водород совершает цикл Карно. Найти КПД цикла, если при адиабатическом расширении объем газа увеличивается в 4 раза.

2.239 Найти термический КПД цикла, состоящего из двух изохор и двух адиабат, если в пределах цикла объем идеального газа изменяется в $n = 11$ раз.

2.240 Кислород совершает цикл Карно. Найти КПД цикла, если при адиабатическом расширении давление уменьшается в 4 раза.

2.241 Найти критический объем $V_{кр}$ веществ: 1) кислорода массой $m_1 = 0,5$ г; 2) воды массой $m_2 = 1,2$ г.

2.242 Критическая температура аргона $T_{кр}$ и критическое давление $p_{кр}$ известны (см. приложение А). Вычислить по этим данным критический молярный объем $V_{кр}$ аргона.

2.243 Найти постоянные a и b в уравнении Ван-дер-Ваальса для азота, если известны критические температура $T_{кр}$ и критическое давление $p_{кр}$ (см. приложение А).

2.244 Определить коэффициент диффузии D для гелия при температуре $t = 18$ °С и давлении $p = 0,5$ МПа. Эффективный диаметр атома гелия вычислить, считая известными для гелия критическую температуру $T_{кр}$ и критическое давление $p_{кр}$.

2.245 Вычислить критические температуру $T_{кр}$ и давление $p_{кр}$: 1) кислорода; 2) азота; 3) воды.

2.246 Найти эффективный диаметр d молекулы кислорода, считая известными для кислорода критические температуру $T_{кр}$ и давление $p_{кр}$.

2.247 Найти работу A , совершаемую одним молем газа Ван-дер-Ваальса при его расширении от объема V_1 до объема V_2 при температуре T .

2.248 Кислород, содержащий количество вещества $\nu = 1$ моль, находится при температуре $T = 350$ К. Найти относительную погрешность ε в вычислении внутренней энергии газа, если газ рассматривается как идеальный. Расчеты выполнить для двух значений объема V_1 : 1) 1 л; 2) 0,1 л.

2.249 Определить внутреннюю энергию U углекислого газа массой $m = 0,12$ кг при нормальном давлении p_0 и температуре $T = 290$ К в двух случаях, когда газ рассматривается: 1) как идеальный; 2) как реальный.

2.250 Определить изменение внутренней энергии ΔU неона, содержащего количество вещества $\nu = 2$ моль, при изотермическом расширении его объема от $V_1 = 2$ л до объема $V_2 = 3$ л. Неон считать газом Ван-дер-Ваальса.

2.251 Определить давление p , которое будет производить кислород, рассматриваемый как реальный газ, содержащий количество вещества $\nu = 1$ моль, если он будет занимать объем $V = 0,5$ л при температуре $T = 320$ К. Сравнить полученный результат с давлением, вычисленным по уравнению Менделеева – Клапейрона.

2.252 Гелий массой $m = 2$ г занимает объем $V = 120$ см³ при давлении $p = 10^8$ Па. Найти температуру газа T , рассматривая его как: 1) идеальный; 2) реальный.

2.253 В сосуде вместимостью $V = 0,5$ л находится углекислый газ, содержащий количество вещества $\nu = 1$ моль при температуре $T = 310$ К. Определить давление газа: 1) по уравнению Менделеева – Клапейрона; 2) по уравнению Ван-дер-Ваальса.

2.254 Углекислый газ в количестве $\nu = 1$ кмоль находится при температуре $t = 95$ °С. Найти давление газа p , считая его: 1) реальным; 2) идеальным. Задачу решить для объемов: $V_1 = 1$ м³ и $V_2 = 0,03$ м³.

2.255 Давление кислорода $p = 9$ МПа, плотность $\rho = 120$ кг/м³. Найти температуру кислорода T , считая его реальным газом.

2.256 Определить давление водяного пара p массой $m = 1,6$ г при температуре $T = 370$ К и объеме: 1) $V_1 = 110$ л; 2) $V_2 = 11$ л; 3) $V_3 = 1$ л.

2.257 В закрытом сосуде объемом $V = 4$ м³ находится $\nu = 1$ кмоль углекислого газа при давлении $p = 2 \cdot 10^6$ Па. Пользуясь уравнением Ван-дер-Ваальса, найти, во сколько раз надо увеличить температуру газа, чтобы давление увеличилось втрое.

2.258 Какому давлению необходимо подвергнуть углекислый газ при температуре $T = 298$ К, чтобы его плотность составила $\rho = 480$ г/л. Расчет провести, используя уравнение Менделеева – Клапейрона и уравнение Ван-дер-Ваальса.

2.259 Один моль кислорода находится в объеме $V = 1,6$ л. Вычислить: 1) температуру кислорода, при которой погрешность в давлении, определяемом уравнением состояния идеального газа, составляет 8 % по сравнению с давлением, определяемым уравнением Ван-дер-Ваальса); 2) давление газа при этой температуре.

2.260 Один моль некоторого реального газа находится в сосуде объемом $V = 0,25$ л. При температуре $T_1 = 300$ К давление газа $p_1 = 9$ МПа, а при температуре $T_2 = 350$ К давление газа $p_2 = 11$ МПа. Найти постоянные Ван-дер-Ваальса для этого газа.

2.261 В баллоне вместимостью $V = 24$ дм³ находится азот массой $m = 0,9$ кг при температуре $t = 1$ °С. Определить давление газа на стенки баллона, внутреннее давление газа и собственный объем молекул.

2.262 В сосуде объемом $V = 11$ л при температуре $t = 26$ °С находится азот массой $m = 0,4$ кг. Определить: 1) какую часть давления газа составляет давление, обусловленное силами взаимодействия молекул; 2) какую часть объема сосуда составляет собственный объем молекул.

2.263 Трехатомный газ в количестве $\nu = 500$ моль адиабатно расширяется в пустоту от $V_1 = 0,5$ м³ до $V_2 = 0,5$ м³; температура газа при этом уменьшается на $\Delta t = 12,2$ °С. Найти из этих данных постоянную a , входящую в уравнение Ван-дер-Ваальса.

2.264 Найти наибольший объем V_{\max} , который может занимать вода, содержащая количество вещества $\nu = 2$ моль.

2.265 Определить плотность ρ гелия в критическом состоянии, считая известными для гелия критические температуру $T_{\text{кр}}$ и давление $p_{\text{кр}}$.

2.266 Вычислить плотность ρ водяных паров в критическом состоянии, считая известными для водяных паров критические температуру $T_{\text{кр}}$ и давление $p_{\text{кр}}$.

2.267 Найти наибольшее давление p_{\max} насыщающих водяных паров.

2.268 Во сколько раз концентрация $n_{\text{кр}}$ молекул азота в критическом состоянии больше концентрации n_0 молекул при нормальных условиях?

2.269 При какой температуре T находится окись азота, если ее объем V и давление p в 2 раза превышают соответствующие критические значения $V_{\text{кр}}$ и $p_{\text{кр}}$? Критическая температура $T_{\text{кр}}$ окиси азота составляет 180 К.

2.270 Газ, содержащий количество вещества $\nu = 1$ моль, находится при критической температуре и занимает объем V , в 2 раза пре-

вышающий критический объем $V_{кр}$. Во сколько раз давление p газа в этом состоянии меньше критического давления $p_{кр}$?

2.271 Газ находится в критическом состоянии. Во сколько раз возрастет давление p газа, если его температуру T изохорно увеличить в 3 раза.

2.272 Газ находится в критическом состоянии. Как и во сколько раз его давление p будет отличаться от критического $p_{кр}$ при одновременном увеличении температуры T и объема V газа в 2,5 раза?

2.273 Определить для газа Ван-дер-Ваальса разность молярных теплоемкостей $C_p - C_V$.

2.274 Объем углекислого газа массой $m = 0,3$ кг увеличился от $V_1 = 2 \cdot 10^3$ л до $V_2 = 2 \cdot 10^4$ л. Вычислить работу A внутренних сил взаимодействия молекул при этом расширении газа.

2.275 Какое количество теплоты надо сообщить ν молям газа Ван-дер-Ваальса, чтобы при расширении в пустоту от объема V_1 до объема V_2 его температура не изменилась?

2.276 Два теплоизолированных баллона соединены между собой трубкой с краном. В первом баллоне объемом $V_1 = 12$ л находится $\nu = 3$ моль углекислого газа. Второй баллон объемом $V_2 = 105$ л откачан до высокого вакуума. После открывания крана газ расширился. Определить изменение температуры углекислого газа, считая его газом Ван-дер-Ваальса.

2.277 Кислород в количестве $\nu = 1$ кмоль находится при температуре $t = 24$ °С и давлении $p = 2 \cdot 10^7$ Па. Найти объем V газа, считая, что кислород ведет себя как реальный газ.

2.278 Вычислить давление, обусловленное силами взаимодействия молекул, заключенных в двух киломолях газа, находящегося при нормальных условиях. Критическая температура и критическое давление этого газа равны соответственно $T_{кр} = 417$ К и $p_{кр} = 7,6$ МПа.

2.279 Криптон, содержащий количество вещества $\nu = 1$ моль, находится при температуре $T = 297$ К. Определить относительную погрешность $\varepsilon = \Delta p/p$, которая будет допущена при вычислении давления, если вместо уравнения Ван-дер-Ваальса воспользоваться уравнением Менделеева – Клапейрона. Вычисления выполнить для двух значений объема: 1) $V_1 = 1$ л; 2) $V_2 = 0,1$ л.

2.280 Баллон наполовину заполнили водой при комнатной температуре. Затем баллон герметически закупорили и нагрели до темпе-

ратуры $T = 645$ К. Определить давление p водяного пара в баллоне при этой температуре.

2.281 Найти массу m воды, вошедшей в стеклянную трубку с диаметром канала $d = 0,8$ мм, опущенную в воду на малую глубину. Смачивание считать полным.

2.282 В спирт на малую глубину опускают стеклянную трубку с диаметром канала $d = 0,5$ мм. Найти массу m спирта, вошедшего в трубку. Считать смачивание полным.

2.283 Какую работу A надо совершить при выдувании мыльного пузыря, чтобы увеличить его объем от $V_1 = 9$ см³ до $V_2 = 18$ см³. Процесс считать изотермическим.

2.284 Какую работу A против сил поверхностного натяжения надо совершить, чтобы выдуть мыльный пузырь диаметром $d = 6$ см?

2.285 В капиллярной трубке, радиус канала которой $r = 0,3$ мм, жидкость поднялась на $h = 4,25$ см. Определить плотность жидкости ρ , если ее поверхностное натяжение $\alpha = 0,071$ Н/м?

2.286 Глицерин поднялся в капиллярной трубке с радиусом канала $r = 0,5$ мм на высоту $h = 20$ мм. Определить поверхностное натяжение α глицерина.

2.287 На какую высоту h поднимется бензол в капилляре, внутренний диаметр d которого равен 1,5 мм?

2.288 Вычислить удельные теплоемкости кристаллов меди и кобальта по классической теории теплоемкости.

2.289 Определить изменение ΔU внутренней энергии кристалла никеля при нагревании его от $t_1 = 1$ °С до $t_2 = 226$ °С, вычислив его теплоемкость. Масса кристалла $m = 25$ г.

2.290 Пользуясь законом Дюлонга и Пти, вычислить удельную теплоемкость: 1) железа; 2) цинка; 3) никеля.

2.291 Пользуясь законом Дюлонга и Пти, найти, как и во сколько раз отличаются удельные теплоемкости платины и алюминия.

2.292 Пользуясь классической теорией, найти, как и во сколько раз отличаются удельные теплоемкости кристаллов кремния и германия.

2.293 Диаметр канала стеклянной трубки чашечного ртутного барометра $d = 6$ мм. Какую поправку Δp нужно вводить в отсчеты по этому барометру, чтобы получить верное значение атмосферного давления?

2.294 Воздушный пузырек диаметром $d = 4$ мкм находится в воде у самой ее поверхности. Определить плотность ρ воздуха в пузырьке, если воздух над поверхностью воды находится при нормальных условиях.

2.295 Пространство между двумя стеклянными параллельными пластинками с площадью поверхности $S = 110$ см² каждая, расположенными на расстоянии $l = 21$ мкм друг от друга, заполнено водой. Определить силу F , прижимающую пластинки друг к другу. Считать мениск вогнутым с диаметром d , равным расстоянию между пластинками.

2.296 Два стеклянных диска радиусом $R = 5$ см смочили водой и сложили вместе. Чтобы оторвать их друг от друга, нужно приложить перпендикулярно к плоскости дисков силу $F = 0,65$ кН. Считая смачивание полным, найти толщину слоя воды между дисками.

2.297 Две капли ртути радиусом $R = 1,3$ мм каждая слились в одну большую каплю. Какая энергия E выделится при этом слиянии? Процесс считать изотермическим.

2.298 В сосуд со ртутью опущен открытый капилляр, внутренний диаметр которого $d = 2,9$ мм. Разность уровней ртути в сосуде и капилляре $h = 3,7$ мм. Чему равен радиус кривизны R ртутного мениска в капилляре?

2.299 Во сколько раз плотность ρ_1 воздуха в пузырьке, находящемся на глубине $h = 5$ м под водой, больше плотности ρ_2 воздуха при атмосферном давлении и той же температуре? Радиус пузырька $r = 6 \cdot 10^{-4}$ мм.

2.300 Из вертикальной трубки внутренним радиусом $r = 1,6$ мм вытекают капли воды. Найти радиус R капли в момент отрыва. Считать каплю сферической, а шейку капли в момент отрыва равной внутреннему диаметру трубки.

2.301 Давление воздуха внутри мыльного пузыря на 1 мм рт. ст. больше атмосферного. Чему равен радиус пузыря?

2.302 Определить разность уровней ртути Δh в двух сообщающихся капиллярах с диаметром каналов $d_1 = 2$ мм и $d_2 = 4$ мм.

2.303 В широкий сосуд с водой опущен капилляр так, что верхний его конец находится выше уровня воды в сосуде на $h = 2,2$ см. Внутренний радиус капилляра $r = 0,5$ мм. Найти радиус R кривизны мениска в капилляре. Смачивание считать полным.

2.304 Масса 1000 капель спирта, вытекающего из капилляра, $m = 7,1$ г. Определить поверхностное натяжение спирта α , если диаметр шейки капли в момент отрыва равен 1 мм.

2.305 Трубка имеет диаметр $d_1 = 0,2$ см. На нижнем конце трубки повисла капля воды, имеющая в момент отрыва вид шарика. Вычислить диаметр d_2 этой капли.

2.306 Как и на сколько давление p воздуха внутри мыльного пузыря отличается от атмосферного давления p_0 , если диаметр пузыря $d = 5$ мм?

2.307 Разность уровней жидкости в коленах U-образной трубки равна $\Delta h = 2,3$ см. Радиусы r_1 и r_2 каналов в коленах трубки равны соответственно 1 и 0,2 мм. Плотность жидкости $\rho = 0,8$ г/см³. Определить поверхностное натяжение α жидкости.

2.308 Пользуясь законом Дюлонга и Пти, определить, из какого материала сделан металлический шарик массой $m = 10$ г, если известно, что для его нагревания от $t_1 = 11$ °С до $t_2 = 31$ °С требуется затратить $Q = 275$ Дж тепла.

2.309 Свинцовая пуля, летящая со скоростью $v = 430$ м/с, ударяется о стенку и входит в нее. Считая, что 12 % кинетической энергии пули идет на ее нагревание, найти, на сколько градусов нагрелась пуля. Удельную теплоемкость c свинца вычислить по классической теории теплоемкости.

2.310 Какие силы надо приложить к концам стального стержня с площадью поперечного сечения $S = 12$ см², чтобы не дать ему расширяться при нагревании от $t_1 = 5$ °С до $t_2 = 40$ °С?

2.311 К стальной проволоке диаметром $d = 2,1$ мм подвешен груз. Под его действием проволока получила такое же удлинение, как при нагревании на $\Delta t = 20$ °С. Вычислить массу m груза.

2.312 Медная проволока натянута при температуре $t_1 = 160$ °С между двумя прочными неподвижными стенками. При какой температуре t_2 , остывая, разорвется проволока? Считать, что закон Гука справедлив вплоть до разрыва проволоки.

2.313 Какую длину должны иметь при $t = 0$ °С стальной и медный стержни, чтобы при любой температуре стальной стержень был длиннее медного на $\Delta l = 5,5$ см.

2.314 При нагревании некоторого металла от $t_1 = 0$ °С до $t_2 = 500$ °С его плотность уменьшается в 1,027 раза. Найти для этого металла коэффициент линейного расширения α_l , считая его постоянным в данном интервале температур.

2.315 На нагревание медного бруска массой $m = 100$ г, находящегося при температуре $t = 0$ °С, затрачено $Q = 10$ кДж тепла. Во сколько раз при этом увеличился его объем? Удельную теплоемкость меди вычислить, пользуясь классической теорией теплоемкости.

2.316 Проволочное кольцо радиусом $R = 6$ см и массой $m = 6$ г приведено в соприкосновение с поверхностью мыльного раствора. Какую силу F надо приложить для отрыва кольца от поверхности раствора?

2.317 Спичка длиной $l = 5$ см плавает на поверхности воды, температура которой $t = 21$ °С. Если по одну сторону от спички капнули глицерин, спичка придет в движение. Определить силу F , действующую на спичку, и ее направление.

2.318 Ртуть массой $m = 3,3$ г помещена между параллельными стеклянными пластинками. Определить силу F , которую необходимо приложить, чтобы расплющить каплю до толщины $d = 0,15$ мм. Ртуть стекло не смачивает.

2.319 В дне сосуда со ртутью имеется круглое отверстие диаметром $d = 75$ мкм. Определить, при какой максимальной толщине h слоя ртути она еще не будет вытекать через это отверстие.

2.320 В сосуде с воздухом при давлении p_0 находится мыльный пузырек диаметром d . При изотермическом уменьшении давления воздуха в n раз диаметр пузырька увеличивается в k раз. Определить поверхностное натяжение α мыльной воды.

ПРИЛОЖЕНИЕ А

(справочное)

СПРАВОЧНЫЕ ТАБЛИЦЫ

1 Основные физические постоянные (округленные значения)

| Физическая постоянная | Обозначение | Значение |
|---|-------------|--|
| Нормальное ускорение свободного падения | g | 9,81 м/с ² |
| Гравитационная постоянная | G | $6,67 \cdot 10^{-11}$ м ³ /(кг·с ²) |
| Элементарный заряд | e | $1,6 \cdot 10^{-19}$ Кл |
| Скорость света в вакууме | c | $3,0 \cdot 10^8$ м/с |
| Постоянная Авогадро | N_A | $6,02 \cdot 10^{23}$ моль ⁻¹ |
| Универсальная газовая постоянная | R | 8,31 Дж / (моль·К) |
| Постоянная Больцмана | k | $1,38 \cdot 10^{-23}$ Дж / К |
| Атомная единица массы | а.е.м. | $1,660 \cdot 10^{-27}$ кг |

2 Плотность ρ некоторых веществ

| Вещество | $\rho, \times 10^3$ кг/м ³ | Вещество | $\rho, \times 10^3$ кг/м ³ | Вещество | $\rho, \times 10^3$ кг/м ³ |
|----------|--|----------|--|----------|--|
| Алюминий | 2,70 | Железо | 7,88 | Свинец | 11,30 |
| Барий | 3,50 | Литий | 0,53 | Серебро | 10,50 |
| Ванадий | 6,02 | Медь | 8,93 | Цезий | 1,90 |
| Висмут | 9,80 | Никель | 8,90 | Цинк | 7,15 |
| Вода | 1,00 | Керосин | 0,8 | Спирт | 0,8 |
| Глицерин | 1,26 | Ртуть | 13,6 | Эфир | 0,7 |

3 Эффективный диаметр молекул d , динамическая вязкость η и теплопроводность газов λ при нормальных условиях

| Вещество | d , нм | η , мкПа·с | λ , мВт/(м·К) |
|----------------|----------|-----------------|-----------------------|
| Азот | 0,38 | 16,6 | 24,3 |
| Аргон | 0,35 | 21,5 | 16,2 |
| Водород | 0,28 | 8,66 | 168 |
| Воздух | 0,27 | 17,2 | 24,1 |
| Гелий | 0,22 | 18,9 | 142 |
| Кислород | 0,36 | 19,8 | 24,4 |
| Пары воды | 0,30 | 8,32 | 15,8 |
| Углекислый газ | 0,47 | 13,67 | 23,2 |

4 Критические параметры и поправки a, b Ван-дер-Ваальса

| Газ | Критическая температура $T_{кр}$, К | Критическое давление $p_{кр}$, МПа | a , Н·м ⁴ /моль ² | b , 10 ⁻⁵ м ³ /моль |
|----------------|--------------------------------------|-------------------------------------|---|---|
| Азот | 126 | 3,39 | 0,135 | 3,86 |
| Аргон | 151 | 4,86 | 0,134 | 3,22 |
| Водяной пар | 647 | 22,1 | 0,545 | 3,04 |
| Гелий | 5 | 0,23 | 0,0036 | 2,34 |
| Кислород | 155 | 5,08 | 0,136 | 3,17 |
| Неон | 44,4 | 2,74 | 0,209 | 1,70 |
| Углекислый газ | 304 | 7,38 | 0,361 | 4,28 |
| Хлор | 417 | 7,71 | 0,650 | 5,62 |

5 Динамическая вязкость η и поверхностное натяжение α жидкостей при 20 °С

| Вещество | η , мПа·с | α , мН/м | Вещество | η , мПа·с | α , мН/м |
|----------|----------------|-----------------|--------------|----------------|-----------------|
| Бензол | 0,6 | 29 | Мыльная вода | | 40 |
| Вода | 1,00 | 73 | Ртуть | 1,58 | 500 |
| Глицерин | 1480 | 62 | Спирт | 1,19 | 22 |

6 Удельная теплоемкость c твердых и жидких веществ

| Вещество | c , Дж/(кг · К) | Вещество | c , Дж/(кг · К) |
|----------|-------------------|----------|-------------------|
| Алюминий | $8,96 \cdot 10^2$ | Спирт | $2,43 \cdot 10^3$ |
| Вода | $4,18 \cdot 10^3$ | Сталь | $4,69 \cdot 10^2$ |
| Глицерин | $2,43 \cdot 10^3$ | Серебро | $2,30 \cdot 10^2$ |
| Керосин | $2,14 \cdot 10^3$ | Медь | $3,85 \cdot 10^2$ |
| Лед | $2,09 \cdot 10^3$ | Свинец | $1,26 \cdot 10^2$ |
| Ртуть | $1,38 \cdot 10^2$ | Золото | $1,29 \cdot 10^2$ |

7 Температура плавления $T_{пл}$ и удельная теплота плавления L

| Вещество | $T_{пл}$, К | L , $\times 10^5$ Дж/кг | Вещество | $T_{пл}$, К | L , $\times 10^5$ Дж/кг |
|----------|--------------|---------------------------|----------|--------------|---------------------------|
| Алюминий | 933 | 4,0 | Серебро | 1253,6 | 0,88 |
| Лед | 273 | 3,34 | Медь | 1353 | 2,1 |
| Ртуть | 233,2 | 0,117 | Никель | 1726 | 3,0 |
| Сталь | 1573 | 0,873 | Свинец | 600 | 0,25 |

8 Температура кипения T_k и удельная теплота парообразования r

| Вещество | T_k , К | r , $\times 10^5$ Дж/кг | Вещество | T_k , К | r , $\times 10^5$ Дж/кг |
|----------|-----------|------------------------------|---------------------|-----------|------------------------------|
| Азот | 77,2 | 2,01 | Кислород | 90 | 2,14 |
| Вода | 373 | 22,6 | Ртуть | 629,7 | 2,88 |
| Водород | 20,3 | 4,61 | Спирт | 351,3 | 8,46 |
| Воздух | 80 | 2,09 | Углекис- лый газ | 194,5 | 5,95 |

9 Коэффициенты теплопроводности λ и линейного расширения α_l

| Вещество | λ , Вт/(м·К) | α_l , 1/К | Вещество | λ , Вт/(м·К) | α_l , 1/К |
|----------|-------------------------|---------------------|----------|-------------------------|---------------------|
| Сталь | 46,1 | $1,2 \cdot 10^{-5}$ | Латунь | 103 | $1,9 \cdot 10^{-5}$ |
| Алюминий | 201 | $2,3 \cdot 10^{-5}$ | Медь | 393 | $1,6 \cdot 10^{-5}$ |
| Лед | 2,51 | $5,1 \cdot 10^{-5}$ | Олово | 67 | $2,7 \cdot 10^{-5}$ |

10 Греческий алфавит

| Обозначения букв | | Названия букв | Обозначения букв | | Названия букв | Обозначения букв | | Названия букв |
|---------------------|---|---------------|---------------------|---|---------------|---------------------|---|---------------|
| Α | α | альфа | Ι | ι | йота | Ρ | ρ | ро |
| Β | β | бета | Κ | κ | каппа | Σ | σ | сигма |
| Γ | γ | гамма | Λ | λ | ламбда | Τ | τ | тау |
| Δ | δ | дельта | Μ | μ | мю | Υ | υ | ипсилон |
| Ε | ε | эпсилон | Ν | ν | ню | Φ | φ | фи |
| Ζ | ζ | дзета | Ξ | ξ | кси | Χ | χ | хи |
| Η | η | эта | Ο | ο | омикрон | Ψ | ψ | пси |
| Θ | θ | тета | Π | π | пи | Ω | ω | омега |

11 Множители и приставки для образования десятичных, кратных и дольных единиц и их наименования

| Обозначение | Наименование | Множитель | Обозначение | Наименование | Множитель |
|-------------|--------------|-----------|-------------|--------------|------------|
| Π | пэта | 10^{15} | д | деци | 10^{-1} |
| Τ | тера | 10^{12} | с | санتي | 10^{-2} |
| Γ | гига | 10^9 | м | милли | 10^{-3} |
| Μ | мега | 10^6 | мк | микро | 10^{-6} |
| κ | кило | 10^3 | н | нано | 10^{-9} |
| г | гекта | 10^2 | п | пико | 10^{-12} |
| да | дека | 10^1 | ф | фемто | 10^{-15} |

ОГЛАВЛЕНИЕ

| | |
|---|-----------|
| Общие указания | 3 |
| 1 Вопросы для изучения теоретического материала по разделам программы | 6 |
| 2 Рекомендуемая литература..... | 7 |
| 3 Основные законы и формулы..... | 8 |
| 4 Примеры решения и оформления задач..... | 18 |
| 5 Задачи..... | 29 |
| <i>Приложение А. Справочные таблицы.....</i> | <i>59</i> |