

Кафедра физики

И. И. ПРОНЕВИЧ, Р.Г. ПИНЧУК, В. Я. МАТЮШЕНКО

ФИЗИКА

Часть 2

МОЛЕКУЛЯРНАЯ ФИЗИКА И ТЕРМОДИНАМИКА

**Учебно-методическое пособие для студентов
инженерно-технических специальностей
безотрывной формы обучения**

Гомель 2008

МИНИСТЕРСТВО ОБРАЗОВАНИЯ РЕСПУБЛИКИ БЕЛАРУСЬ
УЧРЕЖДЕНИЕ ОБРАЗОВАНИЯ
“БЕЛОРУССКИЙ ГОСУДАРСТВЕННЫЙ УНИВЕРСИТЕТ ТРАНСПОРТА”

Кафедра физики

ФИЗИКА

Часть 2

МОЛЕКУЛЯРНАЯ ФИЗИКА И ТЕРМОДИНАМИКА

**Учебно-методическое пособие для студентов
инженерно-технических специальностей
безотрывной формы обучения**

Гомель 2008

МИНИСТЕРСТВО ОБРАЗОВАНИЯ РЕСПУБЛИКИ БЕЛАРУСЬ
УЧРЕЖДЕНИЕ ОБРАЗОВАНИЯ
“БЕЛОРУССКИЙ ГОСУДАРСТВЕННЫЙ УНИВЕРСИТЕТ ТРАНСПОРТА”

Кафедра физики

ФИЗИКА

Часть 2

МОЛЕКУЛЯРНАЯ ФИЗИКА И ТЕРМОДИНАМИКА

Учебно-методическое пособие для студентов
инженерно-технических специальностей
безотрывной формы обучения

Одобрено методической комиссией строительного факультета

Гомель 2009

УДК 53 (075.8)
ББК 22.3
П90

Рецензент – доктор техн. наук, профессор *О. В. Холодилов*
(УО “БелГУТ”)

Проневич И. И.

П81 Физика : учеб.-метод. пособие для студентов инж.-техн. специальностей безотрывной формы обучения: в 6 ч. Ч. 2. Молекулярная физика и термодинамика / И. И. Проневич, Р. Г. Пинчук, И.В. Приходько, В. Я. Матюшенко ; М-во образования Респ. Беларусь, Белорус. гос. ун-т трансп. – Гомель : БелГУТ, 2008. – с.

ISBN-978-985-468-334-8

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 безотрывной формы обучения.

УДК 53 (075.8)
ББК 22.3

ОБЩИЕ МЕТОДИЧЕСКИЕ УКАЗАНИЯ

Курс физики втузов делится на шесть разделов. В соответствии с этим учебный материал пособия разделен на три части, которые включают в себя по два раздела курса. Изучение каждого раздела сопровождается выполнением одной контрольной работы из восьми задач. Варианты задач контрольных работ выдаются преподавателем в конце соответствующей экзаменационной сессии.

Процесс изучения курса физики студентом безотрывной формы обучения состоит из следующих основных этапов: самостоятельное изучение физики по учебной литературе, решение задач, выполнение контрольных работ и их защита преподавателю, выполнение лабораторных работ, сдача зачетов и экзаменов.

САМОСТОЯТЕЛЬНАЯ РАБОТА ПО УЧЕБНОЙ ЛИТЕРАТУРЕ

Этот вид занятий является главным в учебной работе студента безотрывной формы обучения. При этом необходимо руководствоваться следующим:

1 Курс физики необходимо изучать систематически в течение всего учебного процесса. Изучение курса в сжатые сроки перед экзаменом не дает глубоких и прочных знаний.

2 Избрав какой-нибудь учебник в качестве основного, студент должен придерживаться его при изучении всего курса или, по крайней мере, целого раздела. Замена одного учебника другим в процессе изучения ведет к утрате логической связи между отдельными вопросами. Если же основное пособие не дает полного ответа на отдельные вопросы программы, необходимо обратиться и к другой учебной литературе.

3 Работа над учебником сопровождается составлением конспекта, в котором записываются формулировки законов и выражающие их формулы, определения физических величин и единиц их измерения, выполняется чертеж и решаются типовые задачи.

4 Изучая курс физики, студент встречается с большим количеством единиц измерения, которые объединяются в Международную систему единиц (СИ). Студент должен помнить, что без основательного знания системы единиц, без умения пользоваться ими при решении физических задач невозможно усвоить курс физики и тем более применять физические знания на практике.

Студент не должен ограничиваться только запоминанием физических формул. Он должен осмыслить их и уметь самостоятельно вывести.

РЕШЕНИЕ ЗАДАЧ

Необходимым условием успешного изучения курса общей физики является систематическое решение задач, которое помогает уяснить физический смысл явлений, закрепить в памяти студента формулы, выработать навыки практического применения теоретических знаний.

При решении задач необходимо:

1 Выбрать основные законы и формулы, которые используются при решении задачи, их формулировку, разъяснить буквенные обозначения, употребляемые при написании формул.

2 Сопровождать решение краткими исчерпывающими пояснениями.

3 Все величины, входящие в условие задачи, выразить в единицах СИ. Проверить размерность искомой величины, для этого подставить в правую часть полученной формулы вместо обозначений величин наименования их единиц и проверить, получается ли в результате единица искомой величины; верно полученная рабочая формула должна давать правильную размерность искомой величины.

4 В окончательную формулу, полученную в результате решения задачи в общем виде, подставить числовые значения, выраженные в единицах одной системы (СИ). Пренебрежение этим правилом приводит к неверному результату.

5 Произвести вычисления величин, подставленных в формулу, руководствуясь правилами приближенных вычислений, при необходимости – представлять результат в виде степенного числа. Записать в ответе числовое значение и размерность единицы измерения искомой величины в СИ.

6 Оценить правдоподобность полученного результата.

Физические задачи весьма разнообразны, и дать единую схему их решения невозможно. Однако, как правило, физические задачи следует решать в общем виде, т. е. в буквенных выражениях, не производя вычисления промежуточных величин. Числовые значения подставляются только в окончательную рабочую формулу, выражающую искомую величину. Умение решать задачи приобретается длительными и систематическими упражнениями.

ВЫПОЛНЕНИЕ КОНТРОЛЬНЫХ РАБОТ

Выполнение контрольных работ студентом и их рецензирование преследует две цели: во-первых, таким путем осуществляется контроль за самостоятельной работой студента; во-вторых, проверяется усвоение студентом соответствующего материала с целью оказать при необходимости ему помощь по вопросам, которые оказались слабо усвоены или не поняты студентом.

По каждому разделу курса общей физики студент-заочник приступает к выполнению контрольных работ только после изучения материала, соответствующего данному разделу программы, внимательного ознакомления с приемами решения задач, приведенных в данном пособии по каждому разделу курса.

При этом необходимо руководствоваться следующим :

1 Контрольные работы от первой до последней выполняются в обычной школьной тетради (каждая контрольная работа в отдельной тетради), только по условиям задач данного пособия. Замена какой-либо контрольной работы другой, взятой из аналогичного пособия, не допускается.

2 На лицевой стороне контрольной работы приводятся сведения по следующему образцу:

<p>Кафедра физики</p> <p>Контрольная работа № __ по физике (задачи № _____)</p> <p>студента __ курса (группа _____) Иванова Ивана Ивановича</p> <p>Учебный шифр № _____</p> <p><u>246028, г. Гомель, ул. им. Кожара, д. 27, кв. 15</u></p>
--

3 Выполнять контрольные работы следует чернилами или шариковой ручкой. Каждая следующая задача должна начинаться с новой страницы. Условие задачи переписывается полностью, без сокращений. Для замечаний рецензента на страницах тетради оставляются поля.

4 Все решаемые задачи сопровождаются краткими, но исчерпывающими пояснениями, раскрывающими физический смысл употребляемых формул, и с обязательным выполнением основных правил решения задач.

5 В конце каждой контрольной работы студент-заочник должен привести название учебника или учебного пособия, которым он пользовался, автора и год издания, чтобы рецензент в случае необходимости мог конкретно указать, что следует студенту изучить для завершения контрольной работы.

6 Получив прорецензированную работу, студент обязан устранить недостатки, указанные рецензентом.

7 Если при рецензировании контрольная работа не зачтена, студент обязан послать ее на повторное рецензирование, включив в нее дополнительные решения тех задач, в которых были допущены ошибки. Работа над ошибками выполняется в той же тетради (в конце контрольной работы).

8 Студент является на экзаменационную сессию, получает на кафедре прорецензированные работы и по расписанию деканата защищает их преподавателю. Студент должен быть готов при защите контрольной работы дать пояснения по существу решения входящих в нее задач. Зачтенные контрольные работы остаются у экзаменатора.

1 ВОПРОСЫ ДЛЯ ИЗУЧЕНИЯ ТЕОРЕТИЧЕСКОГО МАТЕРИАЛА ПО РАЗДЕЛАМ ПРОГРАММЫ

Введение. Кинематика материальной точки. Механическое движение. Система отсчета. Траектория. Перемещение и путь. Скорость и ускорение. Тангенциальное и нормальное ускорение. Движение материальной точки по окружности. Связь между линейными и угловыми характеристиками движения.

Динамика материальной точки и тела, движущегося поступательно. Первый закон Ньютона. Инерциальные системы отсчета. Сила, масса. Второй закон Ньютона. Третий закон Ньютона. Импульс. Закон сохранения импульса.

Силы в механике. Виды сил в механике. Силы упругости. Силы трения. Силы тяжести. Закон всемирного тяготения. Гравитационное поле и его характеристики. Понятие об неинерциальных системах отсчета.

Работа. Мощность. Консервативные и неконсервативные силы. Потенциальная энергия. Кинетическая энергия. Закон сохранения энергии в механике.

Динамика вращательного движения твердого тела. Модель абсолютно твердого тела. Поступательное и вращательное движения тела. Центр инерции (масс) твердого тела. Момент инерции. Момент импульса. Момент силы. Основной закон механики вращательного движения. Закон сохранения момента импульса. Кинетическая энергия вращательного движения тела.

Релятивистская механика. Преобразования Галилея. Механический принцип относительности. Границы применимости классической механики. Постулаты Эйнштейна. Принципы относительности Эйнштейна. Преобразования Лоренца. Следствия, вытекающие из преобразований Лоренца (одновременность событий, сокращение длин и промежутков времени, релятивистский закон сложения скоростей). Релятивистская масса и импульс. Основной закон релятивистской динамики. Понятие энергии в релятивистской механике (энергия покоя, кинетическая, полная). Взаимосвязь массы и энергии.

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. Гл. ред. физ.-мат. лит., 1987. – Т. 3 : Квантовая оптика. Атомная физика. Физика твердого тела. Физика атомного ядра и элементарных частиц – 320 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. – 4-е изд., перераб. и доп. – М. : Высш. шк., 1997. – 542 с.

4 **Трофимова, Т. И.** Сборник задач по курсу физики для вузов : учеб. пособие для вузов / Т. И. Трофимова. – 3-е изд. – М. : ОНИКС-21 век; Мир и Образование, 2005. – 383 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 **Ландсберг, Г. С.** Оптика : учеб. пособие для студ. физ. спец. вузов / Г. С. Ландсберг. – 5-е изд., перераб. и доп. – М. : Наука, 1976. – 926 с.

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

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

4 **Чертов, А. Г.** Физические величины: (Терминология, определения, обозначения, размерности, единицы) / А. Г. Чертов. – М. : Высш. шк., 1990. – 334 с.

5 **Сена, Л. И.** Единицы физических величин и их размерности : учеб. пособие для студ. вузов / Л. И. Сена. – 2-е изд., перераб. и доп. – М. : Наука, 1977. – 335 с.

6 **Яворский, Б. М.** Справочник по физике / Б. М. Яворский, А. А. Детлаф. – 3-е изд., испр. – М. : Наука. Гл. ред. физ.-мат. лит., 1990. – 624 с.

7 **Кухлинг, Х.** Справочник по физике : [пер с нем.] / Х. Кухлинг ; под ред. Е. М. Лейкина. – М. : Мир, 1982. – 520 с.

8 Сборник задач по физике / под общ. ред. М. С. Цедрика. – 2-е изд., перераб. – Мн. : Выш. шк., 1976. – 320 с.

9 Физика: задания к практическим занятиям / под ред. Ж. П. Лагутиной. – 2-е изд., перераб. и доп. – Мн. : Выш. шк., 1989. – 236 с.

10 **Новодворская, Е. М.** Методика проведения упражнений по физике во втузе / Е. М. Новодворская, Э. М. Дмитриева. – 3-е изд., перераб. и доп. – М. : Высш. шк., 1981. – 318 с.

11 **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.

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

13 **Козел, С. М.** Сборник задач по физике : учеб. пособие / С. М. Козел, Э. И. Рашба, С. А. Славатинский. – 2-е изд., перераб. и доп. – М. : Наука. Гл. ред. физ.-мат. лит., 1987. – 304 с.

3 СВЕДЕНИЯ ИЗ ТЕОРИИ

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 v_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 – $T = \text{const}$, $m = \text{const}$):

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

или для двух состояний газа:

$$p_1V_1 = p_2V_2;$$

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

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

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

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

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

$$\frac{pV}{T} = \text{const} \quad \text{или} \quad \frac{p_1V_1}{T_1} = \frac{p_2V_2}{T_2},$$

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

Закон Дальтона, определяющий давление смеси 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 только он один находился в сосуде, занятом смесью.

Молярная масса смеси n газов

$$\mu = \frac{m_1 + m_2 + \dots + m_n}{v_1 + v_2 + \dots + v_n},$$

где m_i и v_i – масса и количество вещества 1-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

$$p = \frac{1}{3} nm_0 \langle v_{\text{кв}} \rangle^2 = \frac{2}{3} n \langle \varepsilon \rangle \quad \text{или} \quad pV = \frac{1}{3} m \langle v_{\text{кв}} \rangle^2 = \frac{2}{3} E,$$

где n – концентрация молекул; m_0 – масса одной молекулы; m – масса газа в объёме V ; $\langle v_{\text{кв}} \rangle$ – средняя квадратичная скорость молекул; $\langle \varepsilon \rangle$ – средняя кинетическая энергия поступательного движения молекул; 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:

наиболее вероятная –
$$v_B = \sqrt{\frac{2RT}{\mu}} = \sqrt{\frac{2kT}{m_0}};$$

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

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.

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 $U = 0$. U – их потенциальная энергия.

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 теплопроводности Фурье

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

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 теплоёмкость газа при постоянном объёме; ρ – плотность газа; $\langle v \rangle$ и $\langle l \rangle$ – средняя арифметическая скорость и средняя длина свободного пробега молекул.

Закон диффузии Фика

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

где Δm – масса вещества, переносимая в результате диффузии через поверхность площадью S за время Δt ; dp/dx – градиент плотности; D – коэффициент диффузии; для газов

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

Основы термодинамики

Молярная теплоёмкость газа при постоянном объёме и постоянном давлении соответственно

$$C_{V\mu} = \frac{i}{2} R, \quad C_{p\mu} = \frac{i+2}{2} R,$$

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

Связь между удельной (c) и молярной (C_μ) теплоёмкостями

$$C_\mu = c\mu,$$

где μ – молярная масса.

Уравнение Майера

$$C_{p\mu} - C_{V\mu} = R.$$

Внутренняя энергия идеального газа

$$U = \frac{m}{\mu} C_{V\mu} T.$$

Уравнение адиабатного процесса (уравнение Пуассона)

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

где γ – показатель адиабаты,

$$\gamma = \frac{C_{p\mu}}{C_{V\mu}} = \frac{i+2}{i}.$$

Уравнение политропы

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

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

Работа, совершаемая газом при изменении его объёма, 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 изобарическом 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 ($Q = \text{const}$) –

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

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, объём и давление газа.

Первое начало термодинамики

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

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

Первое начало термодинамики при изобарическом процессе

$$Q = \Delta U + A = \frac{m}{\mu} C_{V\mu} \Delta T + \frac{m}{\mu} R \Delta T = \frac{m}{\mu} C_{p\mu} \Delta T,$$

при изохорном ($A = 0$) –

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

при изотермическом ($\Delta U = 0$) –

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

при адиабатическом ($Q = 0$) –

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

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.

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, отведённое из холодильной камеры; A – совершённая 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

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

Уравнение Ван-дер-Ваальса

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

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

$$U = \frac{m}{\mu} \left(C_{V\mu} T - \frac{a}{V\mu} \right).$$

Коэффициент поверхностного натяжения

$$\alpha = F / l,$$

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

При изотермическом увеличении площади поверхности плёнки 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

$$\Delta p = 2 \alpha / R.$$

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

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

где d – расстояние между плоскостями.

Уравнение Клапейрона-Клаузиуса

$$\frac{dT}{dp} = \frac{(v_1 - v_2)T}{q_{12}},$$

где v_1 и v_2 – удельные объёмы вещества в двух фазовых состояниях; T и p – температура и давление фазового перехода; q_{12} – удельная теплота фазового перехода вещества.

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

$$C_\mu = 3R,$$

где R – универсальная газовая постоянная.

Закон Неймана- Коппа: молярная теплоемкость C_μ химически сложных твердых тел(состоящих из различных атомов)

$$C_\mu = n \cdot 3R,$$

где n – общее число частиц в химической формуле соединения; R – универсальная газовая постоянная.

При нагревании тела от 0 °С до t °С 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 °С до t °С 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 ЗАДАЧ

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

Д а н о:

$$m_1 = 25 \text{ г}$$

$$m_2 = 75 \text{ г}$$

$$\mu_{\text{см}} = ?$$

Решение. 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

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

После вычислений найдем $\mu_{\text{см}} = 30 \cdot 10^{-3}$ 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:

$$V = 10 \text{ л}$$

$$p_1 = 1 \text{ МПа}$$

$$T_1 = 300 \text{ К}$$

$$T_2 = 290 \text{ К}$$

$$p_2 = ?$$

Решение. 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:

$$p_2 = m_2 R T_2 / (\mu V). \quad (1)$$

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

$$m_1 = \mu p_1 V / (RT_1). \quad (3)$$

Подставив выражения масс (2) и (3) в (1), найдём

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

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

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

Паскаль является единицей давления. Производим вычисления, учитывая, что $\mu = 4 \cdot 10^{-3} \text{ кг/моль}$. Получим $p_2 = 0,364 \text{ МПа}$.

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

Д а н о:
 $m = 4 \text{ кг}$
 $T = 350 \text{ К}$
 $\langle \varepsilon \rangle - ?$
 $E_{\text{к}} - ?$

Решение. На каждую степень свободы молекулы газа приходится одинаковая средняя энергия $\langle \varepsilon_i \rangle = 1 / 2 kT$, 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

$$\langle \varepsilon \rangle = 5 / 2 kT. \quad (1)$$

Кинетическая энергия движения всех молекул газа

$$E_{\text{к}} = N \langle \varepsilon \rangle. \quad (2)$$

Число всех молекул газа

$$N = \nu N_A = N_A m / \mu. \quad (3)$$

Подставив выражение N в формулу (2), получаем

$$E_k = 5kTN_A m / (2\mu) = 5RTm / (2\mu). \quad (4)$$

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

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

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

Д а н о:

$$\begin{array}{l} v_m = 0,002 v_B \\ N = 1,67 \cdot 10^{24} \\ \hline \Delta N - ? \end{array}$$

Решение. Число $dN(u)$ молекул, относительные скорости которых заключены в пределах от u до $u + du$,

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

где N – число молекул в объёме газа.

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

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

Проинтегрировав данное выражение по u в пределах от 0 до u_{\max} , найдём

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

Вычисляя, получаем $\Delta N = 10^{16}$ молекул.

Пример 5. Вычислить удельные теплоёмкости 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 кислорода составляют 80 и 20 % соответственно.

Д а н о:

$$\begin{aligned} \mu_1 &= 20 \cdot 10^{-3} \text{ кг/моль} \\ \mu_2 &= 2 \cdot 10^{-3} \text{ кг/моль.} \\ m_1 &= 2,5 \text{ кг} \\ m_2 &= 1,5 \text{ кг} \\ v_1 &= 6 \text{ м/с } v_2 = 2 \text{ м/с} \\ \hline c_{v1} - ? \quad c_{v2} - ? \\ c_{p1} - ? \quad c_{p2} - ? \\ c_v - ? \quad c_p - ? \end{aligned}$$

Решение. Удельные теплоёмкости 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 $i = 3$ и $\mu_1 = 20 \cdot 10^{-3}$ кг/моль. Поэтому

$$\begin{aligned} c_{v1} &= 3 \cdot 8,31 / (2 \cdot 20 \cdot 10^{-3}) = 624 \text{ Дж/(кг} \cdot \text{К)}, \\ c_{p1} &= 1040 \text{ Дж/(кг} \cdot \text{К)}. \end{aligned}$$

Для водорода (двухатомный газ) $i = 5$ и $\mu_2 = 2 \cdot 10^{-3}$ кг/моль.

$$c_{v2} = 1,04 \cdot 10^4 \text{ Дж/(кг} \cdot \text{К)}, \quad c_{p2} = 1,46 \cdot 10^4 \text{ Дж/(кг} \cdot \text{К)}.$$

Удельную теплоёмкость смеси при постоянном объеме c_v найдём следующим образом. Теплоту, необходимую для нагревания смеси на ΔT , выразим двумя способами:

$$Q = c_v (m_1 + m_2) \Delta T, \tag{1}$$

$$Q = (c_{v,1} m_1 + c_{v,2} m_2) \Delta T. \tag{2}$$

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

$$c_v (m_1 + m_2) = c_{v,1} m_1 + c_{v,2} m_2.$$

Отсюда $c_v = c_{v,1} \frac{m_1}{m_1 + m_2} + c_{v,2} \frac{m_2}{m_1 + m_2}$, или $c_v = c_{v,1} \omega_1 + c_{v,2} \omega_2$,

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

Рассуждая так же, получим формулу для вычисления удельной теплоёмкости смеси при постоянном давлении

$$c_p = c_{p,1}\omega_1 + c_{p,2}\omega_2.$$

Произведём вычисления:

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

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

Пример 6. Некоторая масса кислорода при давлении $p_1 = 10^5$ Па занимает объем $V_1 = 10$ л. Газ был нагрет сначала при постоянном давлении до объема $V_2 = 30$ л, а затем при постоянном объеме до давления $p_2 = 0,5$ МПа. Найти изменение внутренней энергии газа ΔU_{1a2} , совершенную им работу A_{1a2} и количество поглощенной газом теплоты Q_{1a2} . Произвести аналогичные расчёты в случае обратного следования процессов: сначала по изохоре, потом по изобаре (рисунок 1 кривая 1в2). Сравнить результаты расчётов в обоих случаях.

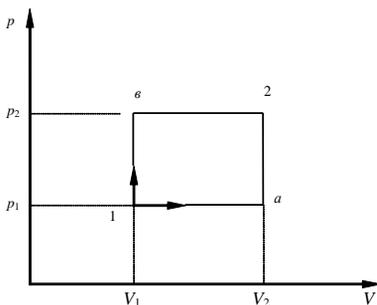


Рисунок 1

Д а н о:

$$p_1 = 10^5 \text{ Па}$$

$$V_1 = 10 \text{ л}$$

$$V_2 = 30 \text{ л}$$

$$p_2 = 0,5 \text{ МПа}$$

$$\Delta U_{1a2} - ? \quad A_{1a2} - ?$$

$$Q_{1a2} - ? \quad \Delta U_{1b2} - ?$$

$$A_{1b2} - ? \quad Q_{1b2} - ?$$

Решение. 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, совершённая 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 учётом этого

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

В соответствии с первым законом термодинамики

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

Подставив числовые значения, получим

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

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

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

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

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

Подставив численные значения, получим

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

Сравнивая результаты в первом и втором случаях, замечаем, что

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

Пример 7. Найти КПД четырёхтактного двигателя внутреннего сгорания. Считать, что смесь воздуха с парами топлива и воздуха с продуктами сгорания с достаточной точностью ведёт себя как

идеальный газ с показателем адиабаты γ . Схема реального цикла показана на рисунке 2, а идеального – на рисунке 3.

Д а н о: γ
 η - ?

Решение. В состоянии 1 в камере после сгорания сжатой смеси воздуха с топливом имеется газ под большим давлением p_1 . Объём газа V_1 . Начинается рабочий цикл. При расширении газа по адиабате 1-2 совершается положительная работа. В состоянии 2 (нижняя мёртвая точка) расширение достигает максимума и поршень находится в крайнем положении. Объём V_2 равен сумме объёмов камеры сгорания и цилиндра. После открытия выпускного клапана давление в цилиндре падает до близкого к атмосферному. В реальном цикле выпускной клапан начинает открываться раньше достижения поршнем нижней мёртвой точки 2, поэтому переход 2-3 не строго изохорный. На участке 3-4 происходит выталкивание оставшихся в цилиндре продуктов сгорания. В верхней мёртвой точке 4 закрывается выпускной клапан и открывается впускной. На участке 4-5 происходит засасывание воздушно-топливной смеси (для карбюраторных двигателей) или воздуха (для дизельных двигателей). В точке 5 закрывается всасывающий клапан и на участке 5-6 происходит сжатие рабочей смеси. Совершается отрицательная работа. В точке 6 смесь воспламеняется, и давление в камере сжатия возрастает до p_1 . В идеальном цикле считаем, что точки 5 и 3 совпадают, путь 3-4 совпадает с 4-5, и никакой работы в процессе 3-4-5 не совершается.

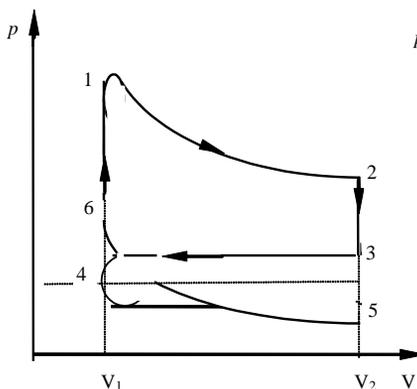


Рисунок 2

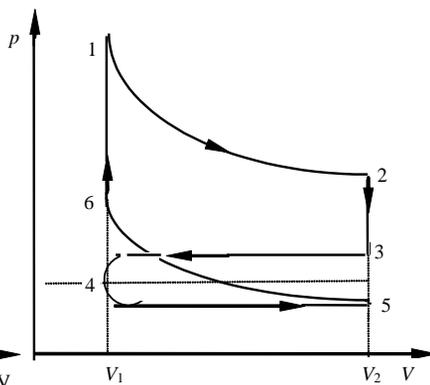


Рисунок 3

Работа в цикле в расчёте на моль вещества

$$A = A_{1-2} + A_{3-6} = \frac{p_1 V_1}{\gamma - 1} \left[1 - \left(\frac{V_1}{V_2} \right)^{\gamma - 1} \right] - \frac{p_6 V_1}{\gamma - 1} \left[1 - \left(\frac{V_1}{V_2} \right)^{\gamma - 1} \right] = \frac{R(T_1 - T_6)}{\gamma - 1} \left[1 - \left(\frac{V_1}{V_2} \right)^{\gamma - 1} \right],$$

где T_1 и T_6 – температуры газа в состояниях 1 и 6.

Так как $\gamma - 1 = (C_{pм} - C_{vм}) / C_{vм} = R / C_{vм}$, то

$$A = C_{vм} (T_1 - T_6) \left[1 - \left(\frac{V_1}{V_2} \right)^{\gamma - 1} \right].$$

Энергия, затрачиваемая на увеличение температуры моля газа от T_6 до T_1 ,

$$Q = C_{vм}(T_1 - T_6).$$

КПД цикла

$$\eta = \frac{A}{Q} = 1 - \left(\frac{V_1}{V_2} \right)^{\gamma - 1}.$$

Отношение V_2 / V_1 называется степенью сжатия. Чем больше степень сжатия, тем КПД выше. Вычисляемый по полученной формуле КПД оказывается завышенным приблизительно вдвое по сравнению с действительным КПД в реальных двигателях внутреннего сгорания. Источниками расхождения являются значительные отклонения условий, принятых для идеального цикла, от условий функционирования реального цикла.

Пример 8. Идеальный газ, совершающий цикл Карно, произвёл 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

$$\eta = (T_1 - T_2) / T_1.$$

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

$$Q_2 = A(1/\eta - 1).$$

Вычисляя, находим: 1) $\eta = 0,4$; 2) $Q_2 = 900$ Дж.

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

Д а н о:

$$m = 10 \text{ г}$$

$$p_1 = 100 \text{ кПа}$$

$$p_2 = 50 \text{ кПа}$$

$$\Delta S - ?$$

Решение. Изменение энтропии, учитывая, что процесс изотермический,

$$\Delta S = \int_1^2 \frac{dQ}{T} = \frac{Q}{T}. \quad (1)$$

Согласно 1-му 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), найдём искомое изменение энтропии:

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

Вычисляя, получаем $\Delta S = 2,06$ 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 $V_2 = 2$ л.

Д а н о:

$$T_{кр} = 417 \text{ К}$$

$$p_{кр} = 7,6 \text{ МПа}$$

$$T = 273 \text{ К}$$

$$V_2 = 2 \text{ л}$$

$$a - ?$$

$$b - ?$$

$$U - ?$$

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 – объём одного моля.

Критические параметры определяются через постоянные a и b следующим образом:

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

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

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

Внутренняя энергия реального газа

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

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

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

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

Д а н о:
 $d = 10 \text{ см}$
 $\Delta p - ?$
 $A - ?$

Решение. Плёнка мыльного пузыря имеет две сферические поверхности – внешнюю и внутреннюю. Обе поверхности оказывают давление на воздух, заключённый внутри пузыря. Так как толщина плёнки очень мала, то диаметры обеих поверхностей практически одинаковы. Поэтому добавочное давление

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

где R – радиус пузыря.

Так как $R = d / 2$, то $\Delta p = 8\alpha / d$.

Работа, которую нужно совершить, чтобы, растягивая плёнку, увеличить площадь её 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 плёнки, затягивающей отверстие трубки до выдувания пузыря.

Пренебрегая S_0 , получаем

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

Произведя вычисления, получим

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

5 ЗАДАЧИ К КОНТРОЛЬНОЙ РАБОТЕ № 2

- 2.1 При нагревании идеального газа на $\Delta T = 2 \text{ К}$ при постоянном давлении объем его увеличился на $1/200$ первоначального объема. Найти первоначальную температуру T газа.
- 2.2 Баллон объемом $V = 15 \text{ л}$ содержит углекислый газ под давлением $p = 1,5 \text{ МПа}$ и температуре $T = 330 \text{ К}$. Определить массу m газа.
- 2.3 В цилиндр длиной $l = 19 \text{ м}$, заполненный воздухом при нормальном атмосферном давлении p_0 , начали медленно вдвигать поршень площадью $S = 220 \text{ см}^2$. Определить силу F , которая будет действовать на поршень, если его остановить на расстоянии $l_1 = 11 \text{ см}$ от дна цилиндра.
- 2.4 Каков может быть наименьший V объем баллона, вмещающего $m = 8 \text{ кг}$ кислорода, если его стенки при температуре $t = 30 \text{ }^\circ\text{C}$ выдерживают давление $p = 1,8 \cdot 10^6 \text{ Па}$.
- 2.5 Два сосуда одинакового объема содержат кислород. В одном сосуде давление $p_1 = 220 \text{ кПа}$ и температура $T_1 = 850 \text{ К}$, в другом – $p_2 = 280 \text{ кПа}$, а $T_2 = 210 \text{ К}$. Сосуды соединили и охладили находящийся в них кислород до $T = 180 \text{ К}$. Определить установившееся в сосудах давление p .
- 2.6 В баллоне вместимостью $V = 18 \text{ л}$ находится аргон под давлением $p_1 = 620 \text{ кПа}$ и при температуре $T_1 = 315 \text{ К}$. Когда из баллона было взято некоторое количество газа, давление в баллоне понизилось до $p_2 = 450 \text{ кПа}$, а температура установилась $T_2 = 280 \text{ К}$. Определить массу m аргона, взятого из баллона.
- 2.7 14 г кислорода находятся под давлением $p_1 = 280 \text{ кПа}$ при температуре $t_1 = 11 \text{ }^\circ\text{C}$. После расширения вследствие нагревания при постоянном давлении кислород занял объем $V_2 = 11 \text{ л}$. 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.
- 2.8 Баллон объемом $V = 14$ л содержит углекислый газ. Давление p газа равно 1,5 МПа, а температура $T = 320$ К. Определить массу газа в баллоне.
- 2.9 Вычислить плотность ρ азота, находящегося в баллоне под давлением $p = 2,5$ МПа и имеющего температуру $T = 420$ К.
- 2.10 В баллоне находится газ при температуре $T_1 = 450$ К. До какой температуры T_2 надо нагреть газ, чтобы его давление увеличилось в 1,3 раза?
- 2.11 Найти массу m воздуха, заполняющего аудиторию высотой $h = 4,5$ м и площадью пола $S = 210$ м². Давление воздуха $p = 0,1$ МПа, температура помещения $t = 19$ °С.
- 2.12 Определить плотность ρ водяного пара, находящегося под давлением $p = 2,3$ кПа и имеющего температуру $T = 350$ К.
- 2.13 В сосуде вместимостью $V = 45$ л находится кислород при температуре $T = 310$ К. Когда часть газа израсходовали, давление в баллоне понизилось на 120 кПа. Определить массу m израсходованного кислорода. Процесс считать изотермическим.
- 2.14 Определить относительную молярную массу газа, если при температуре $T = 231$ К и давлении $p = 4,2$ МПа он имеет плотность $\rho = 6,1$ кг/м³.
- 2.15 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.
- 2.16 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 $t_2 = 32$ °С, если после нагревания ее горлышко опустили в воду.
- 2.17 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 $\Delta p = 0,8$ атм (без изменения температуры). Определить массу m выпущенного газа. Плотность данного газа при нормальных условиях $\rho = 1,4$ г/л.

- 2.18 Какой объем V занимает идеальный газ, содержащий количество вещества $\nu = 1,1$ кмоль при давлении $p = 1,2$ МПа и температуре $T = 430$ К?
- 2.19 Определить количество вещества ν идеального газа, занимающего объем $V = 30$ л при температуре $T = 310$ К и давлении $p = 750$ мм. рт. ст.
- 2.20 Азот массой $m = 6$ 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.
- 2.21 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?
- 2.22 В запаянном сосуде находится вода, занимающая объем, равный половине объема сосуда. Вычислить давление и плотность водяных паров при температуре $t = 410$ °С, зная, что при этой температуре вся вода превращается в пар.
- 2.23 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.
- 2.24 Как и во сколько раз отличается вес воздуха, заполняющего помещение при температурах $t_1 = 15$ °С и $t_2 = 35$ °С? Давление одинаково.
- 2.25 В вертикальном закрытом с обоих торцов цилиндре находится массивный поршень, по обе стороны которого по одному моллю воздуха. При $T_1 = 310$ К отношение верхнего объема к нижнему $k_1 = 4$. При какой температуре T_2 это отношение станет $k_2 = 3$?
- 2.26 В закрытом сосуде вместимостью $V = 1,1$ 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.
- 2.27 Баллон вместимостью $V = 6$ 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.
- 2.28 Газовая смесь, состоящая из кислорода и азота, находится в баллоне под давлением $p = 1,5$ МПа. Считая, что масса кислорода

- составляет 30 % от массы смеси, определить парциальные давления p_1 и p_2 отдельных газов.
- 2.29 Найти плотность ρ газовой смеси, состоящей по массе из одной части водорода и семи частей кислорода, при давлении $p = 110$ кПа и температуре $T = 320$ К.
- 2.30 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.
- 2.31 В сосуде объемом $V = 0,4$ м³ содержится смесь газов: азота массой $m_1 = 3$ г и кислорода массой $m_2 = 18$ г при температуре $T = 290$ К. Определить давление p смеси газов.
- 2.32 В сосуде находится смесь из $m_1 = 11$ г углекислого газа и $m_2 = 16$ г азота. Найти плотность этой смеси при температуре $t = 28$ °С и давлении $p = 1,3 \cdot 10^5$ Н/м².
- 2.33 В сосуде объемом $V = 0,02$ м³ содержится смесь газов: азота массой $m_1 = 12$ г и водорода массой $m_2 = 2$ г при температуре $T = 280$ К. Определить давление p смеси газов.
- 2.34 Какой объем занимает смесь азота массой $m_1 = 0,5$ кг и гелия массой $m_2 = 0,7$ кг при нормальных условиях?
- 2.35 Углекислый газ (CO₂) массой $m_1 = 7$ г и закись азота (N₂O) массой $m_2 = 6$ г заполняют сосуд объемом $V = 3 \cdot 10^{-3}$ м³. Каково общее давление в сосуде при температуре $t = 106$ °С?
- 2.36 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.
- 2.37 Сосуд объемом $V = 25$ 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.
- 2.38 В сосуде объемом $V = 0,6$ л находится $m = 1,2$ г парообразного йода. При температуре $t = 1050$ °С давление p в сосуде оказалось равным 95 кПа. Определить степень диссоциации молекул йода I_2 на атомы I при этих условиях. Масса одного моля I_2 равна 254 г/моль.
- 2.39 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 бы диссоциированы?
- 2.40 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 – $p_2 = 1,7$ МПа. Определить общее давление и парциальные давления газов после соединения баллонов, если температура газов осталась прежней.
- 2.41 Колба вместимостью $V = 0,6$ л содержит газ при нормальных условиях. Определить число N молекул газа, находящихся в колбе.
- 2.42 Одна треть молекул азота массой $m = 12$ г распалась на атомы. Определить полное число N частиц, находящихся в колбе.
- 2.43 В сосуде вместимостью $V = 6$ л при нормальных условиях находится кислород. Определить количество вещества ν и массу m кислорода, а также концентрацию n его молекул в сосуде.
- 2.44 Определить количество вещества ν водорода, заполняющего сосуд объемом $V = 5$ л, если концентрация молекул газа в сосуде $n = 3 \cdot 10^8$ м⁻³.
- 2.45 Определить количество вещества ν и число N молекул азота массой $m = 0,6$ кг.
- 2.46 Определить: сколько молекул N содержится в $V = 2$ мм³ воды; какова масса m одной молекулы воды; диаметр d молекулы воды, считая, что молекулы имеют вид шариков, соприкасающихся друг с другом.
- 2.47 В баллоне вместимостью $V = 5$ л находится кислород массой $m = 5$ г. Определить количество вещества ν и концентрацию n его молекул.
- 2.48 Сколько молекул будет находиться в $V = 4$ см³ сосуда при температуре $t = 14$ °С, если сосуд откачали до разрежения $p = 10^{-11}$ мм рт. ст.
- 2.49 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.
- 2.50 Плотность ρ водорода при нормальных условиях равна $0,09$ кг/м³. Определит массы атома и молекулы водорода.

- 2.51 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 равна 29 г/моль.
- 2.52 Определить массу m молекулы пропана C_3H_8 и его плотность ρ при нормальных условиях.
- 2.53 Плотность водорода ρ_1 и метана ρ_2 при некоторых одинаковых условиях соответственно равны 0,09 и 0,72 кг/м³. Вычислить молярную μ_2 массу метана, если молярная масса водорода $\mu_1 = 2 \cdot 10^{-3}$ кг/моль.
- 2.54 Какое количество N молекул содержится в $m = 5$ г водяного пара.
- 2.55 Молекула азота летит со скоростью $v = 480$ м/с. Найти количество движения этой молекулы.
- 2.56 В сосуде вместимостью $V = 5$ л находится водород массой $m = 2$ г. Какое количество N молекул находится в объеме $V = 3$ см³ этого сосуда?
- 2.57 В колбе вместимостью $V = 260$ см³ находится газ при температуре $T = 280$ К и давлении $p = 55$ кПа. Определить количество вещества ν газа и число N его молекул.
- 2.58 Определить концентрацию n молекул кислорода, находящегося в сосуде вместимостью $V = 3$ л. Количество вещества ν кислорода равно 0,4 моль.
- 2.59 Сколько N молекул газа находится в баллоне вместимостью $V = 35$ л при температуре $T = 310$ К и давлении $p = 2$ МПа?
- 2.60 В колбе вместимостью $V = 120$ см³ содержится некоторый газ при температуре $T = 305$ К. Как и на сколько изменится давление p газа в колбе, если вследствие утечки газа из колбы вышло $\Delta N = 3 \cdot 10^{19}$ молекул?
- 2.61 Молекула кислорода, летящая со скоростью $v = 550$ м/с, ударяется нормально о стенку сосуда и упруго отскакивает от нее без потери скорости. Определить импульс силы, полученный стенкой сосуда за время удара.
- 2.62 Молекула азота, летящая со скоростью $v = 490$ 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.
- 2.63 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.
- 2.64 В сосуде находится смесь кислорода и водорода. Масса смеси $m = 3,8$ г. Массовая доля ω_1 кислорода составляет 0,6. Определить количество молекул N смеси, N_1 и N_2 каждого газа в отдельности.
- 2.65 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).
- 2.66 Давление p газа равно 2 мПа, концентрация n его молекул равна 10^{11} см⁻³. Определить: температуру T газа; среднюю кинетическую энергию $\langle \varepsilon_n \rangle$ поступательного движения молекул газа.
- 2.67 Определить среднее значение $\langle \varepsilon \rangle$ полной кинетической энергии одной молекулы гелия, кислорода и водяного пара при температуре $T = 550$ К.
- 2.68 Определить кинетическую энергию $\langle \varepsilon_i \rangle$, приходящуюся в среднем на одну степень свободы i молекулы азота при температуре $T = 2$ К, а также среднюю кинетическую энергию $\langle \varepsilon_n \rangle$ поступательного движения, среднюю кинетическую энергию $\langle \varepsilon_b \rangle$ вращательного движения и среднее значение полной кинетической энергии $\langle \varepsilon \rangle$ одной молекулы.
- 2.69 Чему равна энергия E теплового движения всех молекул, содержащихся в $m = 25$ г азота при температуре $t = 12$ °С? Какая часть этой энергии приходится на долю поступательного движения и какая – на долю вращательного движения?
- 2.70 Двухатомный газ массой $m = 1,2$ 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.
- 2.71 При какой температуре T молекулы азота имеют такую же среднюю квадратичную скорость $\langle v_{кв} \rangle$, как молекулы водорода при температуре $T_1 = 130$ К?
- 2.72 Взвешенные в воздухе мельчайшие пылинки движутся так же, как и очень крупные молекулы. Определить среднюю квадратичную скорость $\langle v_{кв} \rangle$ пылинки массой $m = 2 \cdot 10^{-10}$ г, если температура T воздуха равна 305 К.

- 2.73 Определить среднюю квадратичную скорость $\langle v_{\text{кв}} \rangle$ молекулы газа, заключенного в сосуд вместимостью $V = 3$ л под давлением $p = 220$ кПа. Масса газа $m = 0,4$ г.
- 2.74 В азоте взвешены мельчайшие пылинки, которые движутся так, как если бы они были очень крупными молекулами. Масса каждой пылинки $m = 5 \cdot 10^{-10}$ г. Газ находится при температуре $T = 450$ К. Определить средние квадратичные скорости $\langle v_{\text{кв}} \rangle$ и средние кинетические энергии $\langle \varepsilon \rangle$ поступательного движения молекулы азота и пылинки.
- 2.75 Смесь гелия и аргона находится при температуре $T = 1,8$ К. Определить среднюю квадратичную скорость $\langle v_{\text{кв}} \rangle$ и среднюю кинетическую энергию $\langle \varepsilon \rangle$ атомов гелия и аргона.
- 2.76 Определить наиболее вероятную скорость $v_{\text{в}}$ молекул водорода при температуре $T = 480$ К.
- 2.77 Сколько степеней свободы i имеет молекула, обладающая средней кинетической энергией теплового движения $\langle \varepsilon \rangle = 9,7 \cdot 10^{-21}$ Дж при температуре $7,1$ °С?
- 2.78 Определить число N молекул ртути, содержащихся в воздухе объемом $V = 3$ м³ в помещении, зараженном ртутью, при температуре $t = 20$ °С, если давление p насыщенного пара ртути при этой температуре равно $0,13$ Па.
- 2.79 Плотность некоторого газа $\rho = 0,07$ кг/м³, средняя квадратичная скорость $\langle v_{\text{кв}} \rangle$ молекул этого газ равна 510 м/с. Вычислить давление p , которое газ оказывает на стенки сосуда.
- 2.80 Сосуд с газом из жестких двухатомных молекул движется со скоростью $v = 25$ м/с. Молярная масса газа $\mu = 28$ г/моль. Вычислить приращение температуры газа после внезапной остановки сосуда.
- 2.81 Пылинки, взвешенные в воздухе, имеют массу $m = 2 \cdot 10^{-18}$ г. Во сколько раз уменьшится их концентрация n при увеличении высоты на $\Delta h = 15$ м? Температура воздуха $T = 305$ К.
- 2.82 На сколько уменьшится атмосферное давление $p = 100$ кПа при подъеме наблюдателя над поверхностью Земли на высоту $h = 150$ м? Считать, что температура воздуха T равна 295 К и не изменяется с высотой.
- 2.83 Барометр в кабине летящего вертолета показывает давление $p = 91$ кПа. На какой высоте h летит вертолет, если на взлетной

- площадке барометр показывал давление $p_0 = 100$ кПа? Считать, что температура T воздуха равна 295 К и не меняется с высотой.
- 2.84 На какой высоте h концентрация n_1 молекул газа составляет 60% от концентрации n_0 на уровне моря. Температуру считать постоянной и равной 10^0 °С? Задачу решить для воздуха, водорода и кислорода.
- 2.85 Пассажирский самолет совершает полеты на высоте $h = 8100$ м. Чтобы не снабжать пассажиров кислородными масками, в кабинах при помощи компрессора поддерживается постоянное давление, соответствующее высоте $h_2 = 2600$ м. Найти разность давлений внутри и снаружи кабины. Среднюю температуру наружного воздуха считать равной $T = 273$ К.
- 2.86 Найти в предыдущей задаче, во сколько раз плотность ρ_1 воздуха в кабине больше плотности ρ_2 воздуха вне ее, если температура T_1 наружного воздуха равна -18 °С, а температура T_2 внутри кабины равна $+22$ °С.
- 2.87 В атмосфере находятся частицы пыли, имеющие массу $m = 9 \cdot 10^{-22}$ кг. Найти, во сколько раз отличаются их концентрации на высотах $h_1 = 4$ м и $h_2 = 45$ м. Воздух находится при нормальных условиях.
- 2.88 На какой высоте плотность ρ_1 газа составляет 55 % от плотности ρ_0 его на уровне моря? Температуру T считать постоянной и равной 280 К. Задачу решить для воздуха, водорода и азота.
- 2.89 Найти изменение высоты Δh , соответствующее изменению давления на $\Delta p = 130$ Па, в двух случаях: 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.
- 2.90 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.
- 2.91 При подъеме вертолета на некоторую высоту h барометр, находящийся в его кабине, изменил свое показание на $\Delta p = 12$ кПа. На какой высоте летит самолет, если на летной площадке барометр

- показывал $p_0 = 0,1$ МПа? Температура воздуха постоянна и равна 22 °С.
- 2.92 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 $t = 18$ °С. Изменением температуры с высотой пренебречь.
- 2.93 На какой высоте h давление p воздуха составляет 75 % от давления p_0 на уровне моря. Температуру t считать постоянной и равной 0 °С.
- 2.94. Сколько весит $V = 2$ м³ воздуха: 1) у поверхности земли; 2) на высоте $h = 5$ км от поверхности земли? Давление p_0 у поверхности земли равно 10^5 Па. Температура с высотой не меняется и равна $t = 8$ °С.
- 2.95. Каково давление p воздуха в шахте на глубине $h = 1,2$ 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.
- 2.96. 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 .
- 2.97. На какой глубине шахты плотность ρ_1 газа на 5 % больше плотности ρ_0 его на уровне моря? Температуру T считать постоянной и равной 285 К. Задачу решить для воздуха, кислорода и азота.
- 2.98. Одинаковые частицы массой $m = 2 \cdot 10^{-12}$ 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.
- 2.99. 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 295 К.

- 2.100. 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.
- 2.101. Ротор центрифуги, заполненный радоном, вращается с частотой $n = 60 \text{ с}^{-1}$. Радиус ротора $r = 0,6 \text{ м}$. 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 .
- 2.102. Кислород находится в очень высоком сосуде в однородном гравитационном поле при температуре T . Температура увеличилась в k раз. На какой высоте h концентрация молекул осталась прежней?
- 2.103. 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.
- 2.104. В очень высоком вертикальном цилиндрическом сосуде находится кислород при некоторой температуре T . Считая гравитационное поле однородным, определить, как изменится давление газа на дно сосуда, если температура газа увеличится в k раз.
- 2.105. Газ находится в очень высоком цилиндрическом сосуде при температуре T . Считая гравитационное поле однородным, определить среднее значение потенциальной энергии молекул газа. Как изменяется эта величина от того, состоит ли газ из одного сорта молекул или из нескольких сортов?
- 2.106. 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 $\Delta v = 15 \text{ м/с}$?
- 2.107. Какая часть молекул кислорода при $5 \text{ }^\circ\text{C}$ обладает скоростями от $v = 110 \text{ м/с}$ до $v + \Delta v = 120 \text{ м/с}$?
- 2.108. Какая часть молекул азота при температуре $180 \text{ }^\circ\text{C}$ обладает скоростями от $v = 348 \text{ м/с}$ до $v + \Delta v = 358 \text{ м/с}$?

- 2.109. Какая часть ω молекул водорода при температуре $t = 8^\circ\text{C}$ обладает скоростями от $v = 2100\text{ м/с}$ до $v + \Delta v = 2200\text{ м/с}$?
- 2.110. Определить относительное число ω молекул идеального газа, скорости которых заключены в пределах от нуля до двух сотых наиболее вероятной скорости v_v .
- 2.111. Азот находится при нормальных условиях и занимает $V = 2\text{ см}^3$. Определить число N молекул в этом объеме, обладающих скоростями, меньшими 2 м/с .
- 2.112. Определить отношение числа N_1 молекул водорода, скорости которых лежат в интервале от $v_1 = 2\text{ км/с}$ до $v_1 + \Delta v = 2,02\text{ км/с}$, к числу N_2 молекул, скорости которых лежат в интервале от $v_2 = 1$ до $v_2 + \Delta v = 1,02\text{ км/с}$, если температура водорода $t = 5^\circ\text{C}$.
- 2.113. Найти относительное число молекул $\Delta N/N$ гелия, скорости которых лежат в интервале от $v = 1990$ до $v + \Delta v = 2010\text{ м/с}$ при температуре $T = 500\text{ К}$.
- 2.114. Какая часть ω молекул кислорода обладает скоростями, отличающимися от наиболее вероятной v_v не более чем на 8 м/с , при температуре $T = 350\text{ К}$?
- 2.115. В сосуде находится кислород массой $m = 9\text{ г}$ при температуре $T = 1500\text{ К}$. Какое число N молекул кислорода имеет энергию $\langle \varepsilon_n \rangle$ поступательного движения, превышающую значение $6,66 \cdot 10^{-20}\text{ Дж}$,
- 2.116. Определить долю ω молекул идеального газа, энергии которых отличаются от средней энергии $\langle \varepsilon_n \rangle$ поступательного движения молекул при той же температуре не более чем на $1,5\%$.
- 2.117. Определить долю ω молекул, энергия которых заключена в пределах от $\varepsilon_1 = 0$ до $\varepsilon_2 = 0,02 kT$.
- 2.118. Найти относительное число ω молекул идеального газа, кинетические энергии которых отличаются от наиболее вероятного значения ε_v энергии не более чем на $1,5\%$.
- 2.119. Число молекул, энергия которых заключена в пределах от нуля до некоторого значения ε , составляет $0,2\%$ от общего числа молекул. Определить величину ε в долях kT .
- 2.120. Как и во сколько раз изменится значение максимума функции $f(\varepsilon)$ распределения молекул идеального газа по энергиям, если

- температура T увеличится в три раза? Решение пояснить графиком.
- 2.121. Найти среднюю длину $\langle l \rangle$ свободного пробега молекул азота при давлении $p = 0,2$ Па и температуре $T = 150$ К.
 - 2.122. Баллон вместимостью $V = 15$ л содержит кислород массой $m = 3$ г. Определить среднюю длину $\langle l \rangle$ свободного пробега.
 - 2.123. Определить плотность ρ аргона, если средняя длина свободного пробега $\langle l \rangle$ молекул равна 3 см.
 - 2.124. Найти среднюю продолжительность свободного пробега $\langle \tau \rangle$ молекул водорода при температуре $T = 280$ К и давлении $p = 120$ Па.
 - 2.125. Найти среднее число $\langle z \rangle$ столкновений, испытываемых в течение $t = 1$ с молекулой азота при нормальных условиях.
 - 2.126. Найти среднее число $\langle z \rangle$ столкновений в 1 секунду молекул углекислого газа при температуре $t = 101$ °С, если средняя длина свободного пробега $\langle l \rangle$ при этих условиях равна $8,7 \cdot 10^{-2}$ см.
 - 2.127. Как и во сколько раз изменится число столкновений $\langle z \rangle$ в 1 секунду молекул двухатомного газа, если объем V газа адиабатически увеличить в 3 раза?
 - 2.128. Найти среднюю длину свободного пробега $\langle l \rangle$ атомов гелия в условиях, когда плотность гелия $\rho = 2,4 \cdot 10^{-2}$ кг/м³.
 - 2.129. В сосуде вместимостью $V = 7$ л находится водород массой $m = 0,6$ г. Определить среднюю длину свободного пробега $\langle l \rangle$ молекул водорода в этом сосуде.
 - 2.130. В сферической колбе вместимостью $V = 4$ л, содержащей азот, создан вакуум с давлением $p = 85$ мкПа. Температура азота $T = 255$ К. Можно ли считать вакуум в колбе высоким, если таким считается вакуум, в котором длина $\langle l \rangle$ свободного пробега молекул много больше линейных размеров сосуда.
 - 2.131. В сосуде объемом $V_1 = 2$ дм³ находится кислород при температуре $t = 11$ °С и давлении $p = 0,3$ МПа. Определить число $\langle z \rangle$ столкновений молекул кислорода в этом сосуде за время $\tau = 1$ секунду.
 - 2.132. При каком давлении p средняя длина свободного пробега $\langle l \rangle$ молекул углекислого газа равна 1,1 м, если температура T газа равно 305 К?

- 2.133. Можно ли считать вакуум с давлением $p = 105$ мкПа высоким, если он создан в колбе диаметром $d = 25$ см, содержащей кислород при температуре $T = 290$ К.
- 2.134. Найти число N всех соударений, которые происходят в течение времени $t = 3$ с между всеми молекулами азота, занимающего при нормальных условиях объем $V_1 = 2$ мм³.
- 2.135. В газоразрядной трубке находится неон при температуре $T = 295$ 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.
- 2.136. Средняя длина $\langle l \rangle$ свободного пробега атомов гелия при 0° С равна 180 нм. Вычислить коэффициент диффузии D гелия.
- 2.137. Найти массу m азота, прошедшего вследствие диффузии через площадку $S = 120$ см² за $\tau = 11$ 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.
- 2.138. Коэффициент диффузии D кислорода при температуре $t = 0$ °С равен $0,19$ см²/с. Вычислить среднюю длину $\langle l \rangle$ свободного пробега молекул кислорода.
- 2.139. Найти коэффициент диффузии D азота: 1) при нормальных условиях; 2) при давлении $p = 110$ Па и температуре $T = 305$ К.
- 2.140. 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.
- 2.141. Определить зависимость коэффициента диффузии D от температуры T при изобарическом и изохорическом процессах.
- 2.142. Определить зависимость коэффициента диффузии D от давления p при изотермическом и изохорическом процессах.
- 2.143. Вычислить коэффициент диффузии D водорода при нормальных условиях, если средняя длина $\langle l \rangle$ свободного пробега молекул равна 160 нм.
- 2.144. 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 равной $t = 18\text{ }^{\circ}\text{C}$, диаметр молекул воздуха $d=0,3\text{ нм}$.
- 2.145. Вычислить динамическую вязкость η водорода при нормальных условиях.
 - 2.146. При каком давлении p отношение коэффициента внутреннего трения η некоторого газа к коэффициенту его диффузии D равно $0,3\text{ г/л}$, а средняя квадратичная скорость $\langle v_{\text{кв}} \rangle$ его молекул равна 632 м/с ?
 - 2.147. Найти диаметр d молекулы кислорода, если известно, что для кислорода коэффициент внутреннего трения η при $0\text{ }^{\circ}\text{C}$ равен $18,8\text{ мкПа}\cdot\text{с}$.
 - 2.148. Определить коэффициент диффузии D и коэффициент внутреннего трения η воздуха при давлении $p=0,1\text{ МПа}$ и температуре $T=285\text{ К}$. Диаметр молекул воздуха $d=0,3\text{ нм}$.
 - 2.149. Коэффициенты диффузии D и внутреннего трения η водорода при некоторых условиях равны соответственно $D=1,42\text{ см}^2/\text{с}$ и $\eta=8,5\text{ мкПа}\cdot\text{с}$. Определить число N молекул водорода в $V=2\text{ м}^3$ при этих условиях.
 - 2.150. Вычислить коэффициент внутреннего трения η азота при нормальных условиях, если коэффициент диффузии D для него при этих условиях равен $8,9\cdot 10^{-2}\text{ м}^2/\text{с}$.
 - 2.151. Найти среднюю длину $\langle l \rangle$ свободного пробега молекул азота при давлении 10^5 Па , при условии, что его динамическая вязкость равна $\eta=17\text{ мкПа}\cdot\text{с}$.
 - 2.152. Считая известной динамическую вязкость η гелия при нормальных условиях, определить эффективный диаметр d его атома.
 - 2.153. Вычислить коэффициент теплопроводности λ гелия при нормальных условиях.
 - 2.154. Найти коэффициент теплопроводности λ водорода, если известно, что коэффициент внутреннего трения η для него при этих условиях равен $8,6\text{ мкПа}\cdot\text{с}$.
 - 2.155. В сосуде объемом $V=2\text{ л}$ находится $N=4\cdot 10^{22}$ молекул двухатомного газа. Коэффициент теплопроводности газа $\lambda=$

- 0,013 Вт/(м·К). Найти коэффициент диффузии D газа при этих условиях.
- 2.156. Коэффициент диффузии углекислого газа при нормальных условиях
 $D = 10 \text{ мм}^2/\text{с}$. Определить коэффициент внутреннего трения η углекислого газа при этих условиях.
- 2.157. Найти коэффициент теплопроводности λ воздуха при температуре $t = 10 \text{ }^\circ\text{C}$. Диаметр d молекулы воздуха принять равным $3 \cdot 10^{-8} \text{ см}$.
- 2.158. 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. Диаметры молекул этих газов считать одинаковыми.
- 2.159. Коэффициент теплопроводности гелия в 8,7 раза больше, чем у аргона (при нормальных условиях). Вычислить отношение эффективных диаметров атомов аргона и гелия.
- 2.160. Пространство между двумя большими параллельными пластинами, расстояние d между которыми равно 6 мм, заполнено гелием. Температура T_1 одной пластины поддерживается равной 295 К, другой $T_2 = 315 \text{ К}$. Вычислить плотность теплового потока $|q|$. Расчеты выполнить для двух случаев, когда давление p гелия равно: 1) 0,1 Мпа; 2) 1,5 Мпа.
- 2.161. 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 .
- 2.162. Найти удельные теплоемкости c_p и c_v смеси газов, содержащей кислород массой $m_1 = 15 \text{ г}$ и азот массой $m_2 = 25 \text{ г}$.
- 2.163. Чему равны удельные теплоемкости c_p и c_v некоторого двухатомного газа, если плотность ρ этого газа при нормальных условиях равна $1,43 \text{ кг/м}^3$?
- 2.164. Найти показатель адиабаты γ для смеси газов, содержащей гелий массой $m_1 = 14 \text{ г}$ и водород – массой $m_2 = 6 \text{ г}$.
- 2.165. Определить для азота отношение удельной теплоемкости при постоянном давлении c_p к удельной теплоемкости при постоянном объеме c_v .

- 2.166. Вычислить удельную теплоемкость при постоянном давлении c_p следующих газов: хлористого водорода; неона; окиси азота; окиси углерода; паров ртути.
- 2.167. Для некоторого двухатомного газа удельная теплоемкость при постоянном давлении $c_p = 1,4 \cdot 10^3 \text{ Дж}/(\text{кг} \cdot \text{К})$. Чему равна масса одного моля этого газа?
- 2.168. Найти показатель адиабаты γ смеси водорода и аргона, если массовые доли обоих газов в смеси одинаковы и равны $\omega_1 = \omega_2 = 0,5$.
- 2.169. Смесь газов состоит из неона и азота, взятых при одинаковых условиях и одинаковых объемах. Определить показатель адиабаты γ этой смеси.
- 2.170. Вычислить удельные теплоемкости при постоянном давлении c_p и постоянном объеме c_v неона и водорода, принимая эти газы за идеальные.
- 2.171. Вычислить удельные теплоемкости при постоянном объеме c_v и при постоянном давлении c_p смеси неона и водорода, если массовые доли неона и водорода составляют соответственно $\omega_1 = 80$ и $\omega_2 = 20$ %.
- 2.172. Газовая смесь состоит из азота массой $m_1 = 5$ кг и водяного пара массой $m_2 = 2$ кг. Принимая эти газы за идеальные, определить удельные теплоемкости c_p и c_v газовой смеси.
- 2.173. 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.
- 2.174. 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 $C_p / C_v = 1,67$.
- 2.175. Одноатомный газ при нормальных условиях занимает объем $V = 5$ л. Вычислить молярную теплоемкость C_v этого газа при постоянном объеме.
- 2.176. Отношение удельных теплоемкостей c_p и c_v смеси нескольких киломолей азота и $\nu_2 = 6$ киломолей аммиака равно 1,33. Определить число ν_1 киломолей азота в смеси.
- 2.177. Вычислить удельные теплоемкости c_p и c_v газов: 1) аргона; 2) гелия; 3) водорода; 4) углекислого газа.

- 2.178. Найти показатель адиабаты γ газовой смеси, состоящей из $\nu_1 = 3$ моля кислорода и $\nu_2 = 4$ моля углекислого газа. Газы считать идеальными.
- 2.179. Степень диссоциации α газообразного водорода равна 0,7. Вычислить удельные теплоемкости такого частично диссоциированного водорода при постоянном давлении c_p и постоянном объеме c_v .
- 2.180. Определить показатель адиабаты γ частично диссоциированного азота, степень диссоциации которого равна 0,3.
- 2.181. Азот массой $m = 6$ 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 .
- 2.182. Азот нагревался при постоянном давлении, причем ему было сообщено количество теплоты $Q = 23$ кДж. Определить работу A , которую совершил при этом газ, и изменение ΔU его внутренней энергии.
- 2.183. 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 250 г.
- 2.184. При адиабатическом сжатии кислорода массой $m = 1,1$ кг совершена работа $A = 120$ кДж. Определить конечную температуру T_2 газа, если до сжатия кислород находился при температуре $T_1 = 310$ К.
- 2.185. 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?
- 2.186. При изотермическом расширении азота, содержащего количество вещества $\nu = 1$ моль и имевшего температуру $T = 310$ К, газу было передано количество теплоты $Q = 3$ кДж. Во сколько раз увеличился объем газа?
- 2.187. При адиабатическом сжатии кислорода массой $m = 25$ 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.

- 2.188. Определить количество теплоты Q , которое надо сообщить кислороду объемом $V = 55$ л при его изохорном нагревании, чтобы давление газа повысилось на $\Delta p = 0,6$ МПа.
- 2.189. Водяной пар расширяется при постоянном давлении. Определить работу A расширения, если пару передано количество теплоты $Q = 5$ кДж.
- 2.190. 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.
- 2.191. Какое количество теплоты Q выделится, если азот массой $m = 15$ г, взятый при температуре $T = 290$ К под давлением $p_1 = 0,2$ МПа, изотермически сжать до давления $p_2 = 2$ МПа?
- 2.192. Закрытый баллон вместимостью $V = 0,9$ м³ заполнен азотом под давлением $p_1 = 2,4 \cdot 10^3$ Па при температуре $T_1 = 298$ К. Газу сообщили $Q = 4,7 \cdot 10^3$ кДж тепла. Определить температуру T_2 и давление p_2 газов в конце процесса.
- 2.193. Азот массой $m = 220$ г нагревают при постоянном давлении от температуры $t_1 = 25$ °С до $t_2 = 270$ °С. Какое количество теплоты Q поглощается при этом? Каков прирост внутренней энергии ΔU газа? Какая работа A совершается газом?
- 2.194. Водород занимает объем $V_1 = 12$ м³ при давлении $p_1 = 0,2$ МПа. Газ нагрели при постоянном объеме до давления $p_2 = 0,5$ МПа. Определить изменение внутренней энергии ΔU газа, работу A , совершенную газом, и количество теплоты Q , сообщенное газу.
- 2.195. Водород массой $m = 13$ г нагрели на $\Delta T = 220$ К, причем газу было передано количество теплоты $Q = 48$ кДж. Найти изменение внутренней энергии ΔU водорода и совершенную им работу A .
- 2.196. Двухатомный газ, находящийся при температуре $t_1 = 22$ °С, 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.
- 2.197. Вычислить молярную массу μ газа, если при нагревании $m = 500$ г на $\Delta t_1 = 10$ °С изобарически требуется на $\Delta Q = 1,48$ кДж тепла больше, чем при изохорическом нагревании.

- 2.198. Водород при нормальных условиях имел объем $V_1 = 110 \text{ м}^3$. Найти изменение ΔU внутренней энергии при его адиабатическом расширении до $V_2 = 160 \text{ м}^3$.
- 2.199. Углекислый газ, находившийся под давлением $p_1 = 110 \text{ кПа}$ при температуре $T_1 = 295 \text{ К}$, был адиабатически сжат до давления $p_2 = 230 \text{ кПа}$. Какова температура T_2 газа после сжатия?
- 2.200. При некотором политропическом 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 окружающей среды; 2) как и насколько изменилась внутренняя энергия газа.
- 2.201. Идеальная тепловая машина, работающая по циклу Карно, получает за каждый цикл от нагревателя теплоту $Q_1 = 620 \text{ кДж}$. Температура нагревателя $T_1 = 410 \text{ К}$, температура холодильника $T_2 = 305 \text{ К}$. Найти работу A , совершаемую машиной за один цикл, и количество тепла Q_2 , отдаваемого холодильнику.
- 2.202. 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 $Q_2 = 130 \text{ Дж}$ теплоты.
- 2.203. Идеальная тепловая машина, работающая по циклу Карно, совершает за один цикл работу A , равную $7,25 \cdot 10^4 \text{ Дж}$. Температура нагревателя $t_1 = 120 \text{ }^\circ\text{C}$, температура холодильника $t_2 = 10 \text{ }^\circ\text{C}$. Определить: КПД η машины; количество тепла Q_1 , получаемого машиной за один цикл от нагревателя; количества тепла Q_2 , отдаваемого за один цикл холодильнику.
- 2.204. Газ, совершающий цикл Карно, получает теплоту $Q_1 = 15 \text{ кДж}$. Определить температуру T_1 теплоотдатчика, если при температуре теплоприемника $T_2 = 275 \text{ К}$ работа A цикла равна 6 кДж .
- 2.205. Газ, совершающий цикл Карно, получает теплоту $Q_1 = 98 \text{ кДж}$. Определить работу A газа, если температура теплоотдатчика T_1 в четыре раза выше температуры T_2 теплоприемника.
- 2.206. В цикле Карно газ получил от теплоотдатчика теплоту $Q_1 = 510 \text{ Дж}$ и совершил работу $A = 102 \text{ Дж}$. Температура теплоотдатчика $T_1 = 420 \text{ К}$. Определить температуру T_2 теплоприемника.
- 2.207. Идеальная тепловая машина работает по циклу Карно. Температура теплоотдатчика $T_1 = 550 \text{ К}$, теплоприемника – $T_2 = 260 \text{ К}$. Определить термический КПД цикла; работу A_1 рабочего вещества при изотермическом расширении, если при изотермическом сжатии совершена работа $A_2 = 80 \text{ Дж}$.
- 2.208. Во сколько раз увеличится коэффициент полезного действия η цикла Карно при повышении температуры теплоотдатчика от $T_1 =$

$T_1' = 570 \text{ К}$? Температура теплоприемника $T_2 = 275 \text{ К}$.

- 2.209. Определить работу A_2 изотермического сжатия газа, совершающего цикл Карно, КПД которого $\eta = 0,3$, если работа изотермического расширения $A_1 = 9 \text{ Дж}$.
- 2.210. Идеальная холодильная машина работающая по обратному циклу Карно от холодильника с водой при температуре $T_2 = 273 \text{ К}$ к кипятильнику с водой при температуре $T_1 = 373 \text{ К}$. Какое количество воды нужно заморозить в холодильнике, чтобы превратить в пар воду массой $m = 1,5 \text{ кг}$ в кипятильнике.
- 2.211. Идеальный газ совершает цикл Карно. Температура нагревателя $T_1 = 480 \text{ К}$, температура охладителя $T_2 = 278 \text{ К}$. При изотермическом расширении газ совершает работу $A_1 = 110 \text{ Дж}$. Определить термический КПД цикла и количество теплоты Q_2 , которую газ отдает охладителю при изотермическом сжатии.
- 2.212. Идеальный газ совершает цикл Карно. Температура нагревателя T_1 в пять раз выше температуры T_2 охладителя. Нагреватель передал газу количество теплоты $Q_1 = 48 \text{ кДж}$. Какую работу A совершил газ?
- 2.213. Идеальный газ, совершающий цикл Карно, получил от нагревателя количество теплоты $Q_1 = 4,9 \text{ кДж}$, совершил работу $A = 680 \text{ Дж}$. Найти термический КПД этого цикла. Во сколько раз температура T_1 нагревателя больше температуры T_2 охладителя?
- 2.214. Наименьший объем V_1 газа, совершающего цикл Карно, равен 156 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 .
- 2.215. Водород совершает цикл Карно. Найти КПД цикла, если при адиабатическом расширении объем газа увеличивается в три раза.
- 2.216. Найти термический КПД цикла, состоящего из двух изохор и двух адиабат, если в пределах цикла объем идеального газа изменяется в $n = 12$ раз.
- 2.217. Кислород совершает цикл Карно. Найти КПД цикла, если при адиабатическом расширении давление уменьшается в три раза..
- 2.218. У тепловой машины, работающей по циклу Карно, температура нагревателя в два раза больше температуры холодильника. За один цикл машина производит работу $A = 14 \text{ кДж}$. Какая работа за цикл затрачивается на изотермическое сжатие рабочего вещества?

- 2.219. Холодильная машина, работающая по обратному циклу Карно, совершает за один цикл работу $A = 38$ кДж, беря при этом тепло от тела с температурой -18°C и передавая тепло телу с температурой 30°C . Найти: 1) КПД цикла; 2) количество тепла, отнятого у холодного тела за один цикл; 3) количество тепла, переданного горячему телу за один цикл.
- 2.220. Холодильная машина, работающая по обратному циклу Карно, должна поддерживать в своей камере температуру -10°C при температуре окружающей среды 25°C . Какую работу надо совершить над рабочим веществом машины, чтобы отвести от ее камеры $Q_2 = 150$ кДж тепла?
- 2.221. Смешали воду массой $m_1 = 6$ кг при температуре $T_1 = 290$ К с водой массой $m_2 = 9$ кг при температуре $T_2 = 370$ К. Найти: температуру смеси T ; изменение энтропии ΔS , происшедшее при смешении.
- 2.222. Найти изменение энтропии ΔS при превращении $m = 11$ г льда при $t_1 = -21^\circ\text{C}$ в пар при $t_2 = 100^\circ\text{C}$.
- 2.223. Найти изменение ΔS энтропии при изобарическом расширении кислорода массой $m = 5$ г от объема $V_1 = 4$ л до $V_2 = 11$ л.
- 2.224. Углекислый газ массой $m = 10,7$ г расширяется изобарически до удвоения объема. Найти изменение энтропии ΔS при этом расширении.
- 2.225. Кислород массой $m = 3$ кг увеличил свой объем в 6 раз, один раз изотермически, другой – адиабатически. Найти изменение энтропии ΔS в каждом из указанных случаев.
- 2.226. Найти изменение энтропии ΔS при изобарическом расширении $m = 9$ г аргона от объема $V_1 = 12$ л до объема $V_2 = 30$ л.
- 2.227. Азот массой $m = 15,5$ г изотермически расширяется от объема $V_1 = 3$ л до объема $V_2 = 9$ л. Найти прирост энтропии ΔS при этом процессе.
- 2.228. При нагревании $\nu = 2$ кмоль двухатомного газа его абсолютная температура T_1 увеличилась в 2,5 раза. Найти изменение энтропии ΔS , если нагревание происходит: 1) изохорически, 2) изобарически.

- 2.229. Кислород массой $m = 11$ г нагревается от температуры $t_1 = 55$ °С до температуры $t_2 = 160$ °С. Найти изменение энтропии ΔS , если нагревание происходит: 1) изохорически, 2) изобарически.
- 2.230. Водород массой $m = 150$ г был изобарически нагрет так, что объем V_1 его увеличился в 4 раза, затем водород был изохорически охлажден так, что его давление p_1 уменьшилось в 4 раза. Найти изменение энтропии ΔS в ходе этих процессов.
- 2.231. Лед массой $m = 3$ кг 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?
- 2.232. Гелий в количестве $\nu = 1$ кмоль, изобарически расширяясь, увеличил свой объем в 3 раза. Каково изменение энтропии ΔS при этом расширении?
- 2.233. Найти изменение энтропии ΔS при переходе кислорода массой $m = 8$ г от объема $V_1 = 11$ л при температуре $t_1 = 82$ °С к объему $V_2 = 44$ л при температуре $t_2 = 305$ °С.
- 2.234. Найти изменение энтропии ΔS при переходе $m = 7$ 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.
- 2.235. Расплавленный свинец массой $m = 650$ г при температуре плавления вылили на лед при температуре $t = 0$ °С. Найти изменение энтропии ΔS при этом процессе.
- 2.236. Найти изменение энтропии ΔS при превращении воды массой $m = 2$ г, взятой при температуре $t_1 = 1$ °С, в пар при $t_2 = 100$ °С.
- 2.237. Во сколько раз следует увеличить изотермически объем идеального газа в количестве $\nu = 1$ моль, чтобы его энтропия увеличилась на $\Delta S = 26$ Дж/К?
- 2.238. Гелий массой $m = 1,8$ г был адиабатически расширен в 5 раз и затем изобарически сжат до первоначального объема. Найти изменение энтропии ΔS в ходе этих процессов.
- 2.239. В результате изохорического нагревания ксенона массой $m = 4,8$ г давление газа p увеличилось в три раза. Вычислить изменение энтропии ΔS газа.

- 2.240. Изменение энтропии ΔS на участке между двумя адиабатами в цикле Карно равно 950 Дж/К. Разность температур между двумя изотермами равна 95 °С. Какое количество тепла превращается в работу в этом цикле?
- 2.241. Определить давление p , которое будет производить кислород, содержащий количество вещества $\nu = 1$ моль, если он будет занимать объем $V = 0,4$ л при температуре $T = 320$ К. Сравнить полученный результат с давлением, вычисленным по уравнению Менделеева-Клапейрона.
- 2.242. Гелий массой $m = 2$ г занимает объем $V = 110$ см³ при давлении $p = 10^8$ Па. Найти температуру T газа, рассматривая его как 1) идеальный, 2) реальный. Постоянные Ван-дер-Ваальса для гелия: $a = 0,036$ Н·м⁴; $b = 2,4 \cdot 10^{-4}$ м³.
- 2.243. В сосуде вместимостью $V = 0,4$ 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.
- 2.244. Кислород в количестве $\nu = 1$ кмоль находится при температуре $t = 25$ °С и давлении $p = 2 \cdot 10^7$ Па. Найти объем V газа, считая, что кислород ведет себя как реальный газ.
- 2.245. Углекислый газ в количестве $\nu = 1$ кмоль находится при температуре $t = 90$ °С. Найти давление p газа, считая его: 1) реальным и 2) идеальным. Задачу решить для объемов: $V_1 = 1,1$ м³ и $V_2 = 0,03$ м³.
- 2.246. Давление кислорода p равно 8 МПа, его плотность $\rho = 120$ кг/м³. Найти температуру T кислорода, считая его реальным газом.
- 2.247. Найти критический объем $V_{кр}$ веществ: 1) кислорода массой $m_1 = 0,4$ г; 2) воды массой $m_2 = 1,1$ г.
- 2.248. Определить давление p водяного пара массой $m = 1,5$ г при температуре $T = 370$ К и объеме: 1) $V_1 = 1100$ л; 2) $V_2 = 11$ л; 3) $V_3 = 1$ л.
- 2.249. Найти постоянные a и b в уравнении Ван-дер-Ваальса для азота, если известны критические температура $T_{кр} = 126$ К и давление $p_{кр} = 3,39$ МПа.
- 2.250. Критическая температура аргона $T_{кр} = 151$ К и критическое давление

$p_{кр} = 4,86$ МПа. Вычислить по этим данным критический молярный объем $V_{кр}$ аргона.

- 2.251. В баллоне вместимостью $V = 24$ дм³ находится азот массой $m = 0,8$ кг при температуре $t = 1$ °С. Определить давление p газа на стенки баллона, внутреннее давление p , давление газа и собственный объем V_1 молекул.
- 2.252. 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.
- 2.253. 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.
- 2.254. Криптон, содержащий количество вещества $\nu = 1$ моль, находится при температуре $T = 295$ К. Определить относительную погрешность $\epsilon = \Delta p/p$, 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.
- 2.255. Внутренняя полость наполовину заполнили водой при комнатной температуре. Затем баллон герметически закупорили и нагрели до температуры $T = 645$ К. Определить давление p водяного пара в баллоне при этой температуре.
- 2.256. Какому давлению необходимо подвергнуть углекислый газ при температуре $T = 295$ К, чтобы его плотность оказалась равной $\rho = 480$ г/л. Расчет провести, используя уравнения Менделеева-Клапейрона и Ван-дер-Ваальса.
- 2.257. Один моль кислорода находится в объеме $V = 1,5$ 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.
- 2.258. Один моль некоторого газа находится в сосуде объемом $V = 0,25$ л. При температуре $T_1 = 300$ К давление газа $p_1 = 9$ Мпа, а при

- температуре $T_2 = 350 \text{ К}$ давление газа $p_2 = 11 \text{ Мпа}$. Найти постоянные Ван-дер-Ваальса для этого газа.
- 2.259. Определить коэффициент диффузии D для гелия при температуре $t = 18 \text{ }^\circ\text{С}$ и давлении $p = 0,5 \text{ Мпа}$. Эффективный диаметр атома гелия вычислить, считая известными для гелия критическую температуру $T_{\text{кр}}$ и критическое давление $p_{\text{кр}}$.
- 2.260. В сосуде объемом $V = 11 \text{ л}$ находится азот массой $m = 0,3 \text{ кг}$ при температуре $t = 26 \text{ }^\circ\text{С}$. Определить: 1) какую часть давления газа составляет давление, обусловленное силами взаимодействия молекул; 2) какую часть объема сосуда составляет собственный объем молекул.
- 2.261. Трехатомный газ в количестве $\nu = 500$ моль адиабатически расширяется в пустоту от $V_1 = 0,5 \text{ м}^3$ до $V_2 = 0,5 \text{ м}^3$; температура газа при этом уменьшается на $\Delta t = 12,2 \text{ }^\circ\text{С}$. Найти из этих данных постоянную a , входящую в уравнение Ван-дер-Ваальса.
- 2.262. Вычислить критические температуру $T_{\text{кр}}$ и давление $p_{\text{кр}}$: 1) кислорода; 2) азота; 3) воды.
- 2.263. Найти наибольший объем V_{max} , который может занимать вода, содержащая количество вещества $\nu = 1$ моль.
- 2.264. Определить плотность ρ гелия в критическом состоянии, считая известными для гелия критические температуру $T_{\text{кр}}$ и давление $p_{\text{кр}}$.
- 2.265. Вычислить плотность ρ водяных паров в критическом состоянии, считая известными для водяных паров критические температуру $T_{\text{кр}}$ и давление $p_{\text{кр}}$.
- 2.266. Найти наибольшее давление p_{max} насыщающих водяных паров.
- 2.267. Во сколько раз концентрация $n_{\text{кр}}$ молекул азота в критическом состоянии больше концентрации n_0 молекул при нормальных условиях?
- 2.268. Найти эффективный диаметр d молекулы кислорода, считая известными для кислорода критические температуру $T_{\text{кр}}$ и давление $p_{\text{кр}}$.
- 2.269. При какой температуре T находится окись азота, если ее объем V и давление p в $k=2$ раза превышают соответствующие критические значения $V_{\text{кр}}$ и $p_{\text{кр}}$? Критическая температура $T_{\text{кр}}$ окиси азота равна 180 К .

- 2.270. Газ, содержащий количество вещества $\nu = 1$ моль, находится при критической температуре и занимает объем V , в $n = 2$ раза превышающий 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 изохорически увеличить в $k = 2,5$ 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 $k = 2,5$ раза?
- 2.273. Определить для газа Ван-дер-Ваальса разность молярных теплоемкостей $C_p - C_v$.
- 2.274. Найти работу A , совершаемую одним молем газа Ван-дер-Ваальса при его расширении от объема V_1 до объема V_2 при температуре T .
- 2.275. Кислород, содержащий количество вещества $\nu = 1$ моль, находится при температуре $T = 340$ К. Найти относительную погрешность ϵ в вычислении внутренней энергии газа, если газ рассматривать как идеальный. Расчеты выполнить для двух значений объема V_1 : 1) 1 л; 2) 0,1 л.
- 2.276. Определить внутреннюю энергию U углекислого газа массой $m = 0,15$ кг при нормальном давлении p_0 и температуре $T = 290$ К в двух случаях, когда газ рассматривается: 1) как идеальный; 2) как реальный.
- 2.277. Объем углекислого газа массой $m = 0,2$ кг увеличился от $V_1 = 2 \cdot 10^3$ л до объема $V_2 = 2 \cdot 10^4$ л. Вычислить работу A внутренних сил взаимодействия молекул при этом расширении газа.
- 2.278. Определить изменение внутренней энергии ΔU неона, содержащего количество вещества $\nu = 1$ моль, при изотермическом расширении его объема от $V_1 = 2$ л до объема $V_2 = 3$ л. Неон считать газом Ван-дер-Ваальса.
- 2.279. Какое количество тепла 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?
- 2.280. Два теплоизолированных баллона соединены между собой трубкой с краном. В одном баллоне объемом $V_1 = 12$ л находится

- $v = 3$ моля углекислого газа. Второй баллон объемом $V_2 = 105$ л откачан до высокого вакуума. После открывания крана газ расширился. Определить приращение температуры углекислого газа, считая его газом Ван-дер-Ваальса.
- 2.281. Диаметр d канала стеклянной трубки чашечного ртутного барометра равен 6 мм. Какую поправку Δp нужно вводить в отсчеты по этому барометру, чтобы получить верное значение атмосферного давления?
- 2.282. Воздушный пузырек диаметром $d = 3$ мкм находится в воде у самой ее поверхности. Определить плотность ρ воздуха в пузырьке, если воздух над поверхностью воды находится при нормальных условиях.
- 2.283. Определить силу F , прижимающую друг к другу две стеклянные пластинки размерами (11 x 11) см, расположенные параллельно друг к другу, если расстояние d между пластинами равно 23 мкм, а пространство между ними заполнено водой.
- 2.284. Найти массу m воды, вошедшей в стеклянную трубку с диаметром канала $d = 0,9$ мм, опущенную в воду на малую глубину. Смачивание считать полным.
- 2.285. 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.
- 2.286. Две капли ртути радиусом $R = 1,2$ мм каждая слились в одну большую каплю. Какая энергия E выделится при этом слиянии? Процесс считать изотермическим.
- 2.287. В сосуд со ртутью опущен открытый капилляр, внутренний диаметр которого $d = 2,9$ мм. Разность уровней ртути в сосуде и капилляре $h = 3,8$ мм. Чему равен радиус R кривизны ртутного мениска в капилляре?
- 2.288. Какую работу A против сил поверхностного натяжения надо совершить, чтобы выдуть мыльный пузырек диаметром $d = 5$ см?
- 2.289. Во сколько раз плотность ρ_1 воздуха в пузырьке, находящемся на глубине $h = 6$ м под водой, больше плотности ρ_2 воздуха при атмосферном давлении и той же температуре? Радиус пузырька $r = 6 \cdot 10^{-4}$ мм.
- 2.290. Из вертикальной трубки внутренним радиусом $r = 1,5$ мм вытекают капли воды. Найти радиус R капли в момент отрыва.

- Считать каплю сферической, а шейку капли в момент отрыва равной внутреннему диаметру трубки.
- 2.291. Давление p воздуха внутри мыльного пузыря на 1 мм рт. ст. больше атмосферного. Чему равен радиус r пузыря?
- 2.292. В капиллярной трубке, радиус канала которой $r = 0,3$ мм, жидкость поднялась на $h = 4,25$ см. Определить плотность ρ жидкости, если ее поверхностное натяжение $\alpha = 0,071$ Н/м?
- 2.293. Определить разность уровней Δh ртути в двух сообщающихся капиллярах с диаметрами каналов $d_1 = 2$ мм и $d_2 = 3$ мм.
- 2.294. Проволочное кольцо радиусом $R = 7$ см приведено в соприкосновение с поверхностью мыльного раствора. Масса кольца $m = 6$ г. Какую силу F надо приложить для отрыва кольца от поверхности раствора?
- 2.295. Спичка длиной $l = 5$ см плавает на поверхности воды, температура которой $t = 22$ °С. Если по одну сторону от спички капнули глицерин, спичка придет в движение. Определить силу F , действующую на спичку, и ее направление.
- 2.296. Глицерин поднялся в капиллярной трубке на высоту $h = 20$ мм. Определить поверхностное натяжение α глицерина, если радиус канала трубки $r = 0,5$ мм.
- 2.297. В широкий сосуд с водой опущен капилляр так, что верхний его конец находится выше уровня воды в сосуде на высоту $h = 2,2$ см. Внутренний радиус капилляра $r = 0,6$ мм. Найти радиус R кривизны мениска в капилляре. Смачивание считать полным.
- 2.298. Масса m 1000 капель спирта, вытекающего из капилляра, равна 7,1 г. Определить поверхностное натяжение α спирта, если диаметр шейки капли в момент отрыва равен 1 мм.
- 2.299. Ртуть массой $m = 3,2$ 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.
- 2.300. Трубка имеет диаметр $d_1 = 0,1$ см. На нижнем конце трубки повисла капля воды, имеющая в момент отрыва вид шарика. Вычислить диаметр d_2 этой капли.

- 2.301. Как и на сколько давление p воздуха внутри мыльного пузыря отличается от атмосферного давления p_0 , если диаметр пузыря $d = 6$ мм?
- 2.302. Разность Δh уровней жидкости в коленах U-образной трубки равна 2,3 см. Радиусы r_1 и r_2 каналов в коленах трубки равны соответственно 1 мм и 0,2 мм. Плотность ρ жидкости равна 0,8 г/см³. Определить поверхностное натяжение α жидкости.
- 2.303. На какую высоту h поднимется бензол в капилляре, внутренний диаметр d которого равен 2 мм?
- 2.304. В дне сосуда со ртутью имеется круглое отверстие диаметра $d = 72$ мкм. Определить, при какой максимальной толщине h слоя ртути она еще не будет вытекать через это отверстие.
- 2.305. В сосуде с воздухом при давлении p_0 находится мыльный пузырек диаметра d . При изотермическом уменьшении давления воздуха в n раз диаметр пузырька увеличивается в k раз. Определить поверхностное натяжение α мыльной воды.
- 2.306. Вычислить удельные теплоемкости c кристаллов меди и кобальта по классической теории теплоемкости.
- 2.307. Определить изменение ΔU внутренней энергии кристалла никеля при нагревании его от $t_1 = 1$ °С до $t_2 = 221$ °С, вычислив теплоемкость C . Масса m кристалла равна 25 г.
- 2.308. Пользуясь классической теорией, вычислить удельные теплоемкости c кристаллов KCl, NaCl и CaCl₂.
- 2.309. Вычислить по классической теории теплоемкости теплоемкость C кристалла бромид алюминия AlBr₃ объемом $V_1 = 1,1$ м³. Плотность ρ кристалла бромида алюминия равна $3,01 \cdot 10^3$ кг/м³.
- 2.310. Пользуясь законом Дюлонга и Пти, вычислить удельную теплоемкость c : 1) железа; 2) цинка; 3) никеля.
- 2.311. 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.
- 2.312. Пользуясь законом Дюлонга и Пти, найти, как и во сколько раз отличаются удельные теплоемкости платины и алюминия.

- 2.313. Свинцовая пуля, летящая со скоростью $v=420$ 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.
- 2.314. Пользуясь классической теорией, найти, как и во сколько раз отличаются удельные теплоемкости кристаллов кремния и германия.
- 2.315. Какие силы надо приложить к концам стального стержня с площадью поперечного сечения $S=11$ см², чтобы не дать ему расширяться при нагревании от $t_1=5$ °С до $t_2=40$ °С?
- 2.316. К стальной проволоке диаметром $d=2,2$ мм подвешен груз. Под действием этого груз проволока получила такое же удлинение, как при нагревании на $\Delta t=20$ °С. Вычислить массу m груза.
- 2.317. Медная проволока натянута горячей 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.
- 2.318. 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.
- 2.319. При нагревании некоторого металла от $t_1=0$ °С до $t_2=500$ °С его плотность уменьшается в $k=1,027$ раза. Найти для этого металла коэффициент линейного расширения α_l , считая его постоянным в данном интервале температур.
- 2.320. 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 c меди вычислить, пользуясь классической теорией теплоемкости.

7 Приложения

А 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)
Постоянная Авогадро	N_A	$6,02 \cdot 10^{23}$ моль ⁻¹
Молярная газовая постоянная	R	8,31 Дж/(моль · К)
Постоянная Больцмана	k	$1,38 \cdot 10^{-23}$ Дж/К
Элементарный заряд	e	$1,6 \cdot 10^{-19}$ Кл
Скорость света в вакууме	c	$3,0 \cdot 10^8$ м/с
Постоянная Стефана-Больцмана	σ	$5,67 \cdot 10^{-8}$ Вт/(м ² · К ⁴)
Постоянная Вина	b	$2,90 \cdot 10^{-3}$ м · К
Постоянная Планка	h	$6,63 \cdot 10^{-34}$ Дж · с
	\hbar	$1,05 \cdot 10^{-34}$ Дж · с
Постоянная Ридберга	R_a	$1,01 \cdot 10^7$ м ⁻¹
Радиус Бора	a_0	$0,529 \cdot 10^{-10}$ м
Комптоновская длина волны электрона	λ	$2,43 \cdot 10^{-12}$ м
Магнитная Бора	μ_B	$0,927 \cdot 10^{-23}$ А · м ²
Энергия ионизации атома водорода	E_i	$2,18 \cdot 10^{-18}$ Дж (13,6 эВ)
Атомная единица массы	а.е.м.	$1,660 \cdot 10^{-27}$ кг
Электрическая постоянная	ϵ_0	$8,85 \cdot 10^{-12}$ Ф/м
Магнитная постоянная	μ_0	$4 \pi \cdot 10^{-7}$ Гн/м

Б Плотность (ρ) твердых тел

Вещество	Плотность, кг/м ³	Вещество	Плотность, кг/м ³	Вещество	Плотность, кг/м ³
Алюминий	$2,70 \cdot 10^3$	Железо	$7,88 \cdot 10^3$	Свинец	$11,3 \cdot 10^3$
Барий	$3,50 \cdot 10^3$	Литий	$0,53 \cdot 10^3$	Серебро	$10,5 \cdot 10^3$
Ванадий	$6,02 \cdot 10^3$	Медь	$8,93 \cdot 10^3$	Цезий	$1,90 \cdot 10^3$
Висмут	$9,80 \cdot 10^3$	Никель	$8,90 \cdot 10^3$	Цинк	$7,15 \cdot 10^3$

В Плотность (ρ) жидкостей

Вещество	Плотность, кг/м ³	Вещество	Плотность, кг/м ³	Вещество	Плотность, кг/м ³
Вода	$1,00 \cdot 10^3$	Керосин	$0,8 \cdot 10^3$	Сероуглерод	$1,26 \cdot 10^3$
Глицерин	$1,26 \cdot 10^3$	Масло смазочн.	$0,9 \cdot 10^3$	Спирт	$0,8 \cdot 10^3$
Ртуть	$13,6 \cdot 10^3$	Масло каст.	$0,96 \cdot 10^3$	Эфир	$0,7 \cdot 10^3$

Г Эффективный диаметр молекул, динамическая вязкость и теплопроводность газов при нормальных условиях

Вещество	Эффективный диаметр d , нм	Динамическая вязкость η мкПа·с	Теплопроводность 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

Д Критические параметры и поправка Ван-дер-Ваальса

Газ	Критическая температура $T_{кр}, K$	Критическое давление $P_{кр}, MPa$	Поправка Ван-дер-Ваальса	
			$a,$ $H \cdot$ $M^4/МОЛЬ^2$	$b,$ 10^{-5} $M^3/МОЛЬ$
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
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

Е Динамическая вязкость (η) жидкостей при 20 °С, мПа · с

Вода	1,00
Глицерин	1480
Масло касторовое	967
Масло машинное	100
Ртуть	1,58

Ж Поверхностное натяжение (σ) жидкостей при 20 °С, мН/м

Вода	73
Глицерин	62
Мыльная вода	40
Ртуть	500
Спирт	22

З Удельная теплоемкость твердых и жидких веществ

Вещество	Удельная теплоемкость c , Дж/(кг · К)	Вещество	Удельная теплоемкость 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	$2,3 \cdot 10^2$
Керосин	$2,14 \cdot 10^3$	Медь	$3,8 \cdot 10^2$
Лед	$2,09 \cdot 10^3$	Свинец	$1,26 \cdot 10^2$
Ртуть	$1,38 \cdot 10^2$		

И Температура плавления и удельная теплота плавления

Вещество	Температура плавления $T_{пл}$, К	Удельная теплота плавления λ х 10^3 Дж/кг
Алюминий	933	4,0
Лед	273	3,34

Ртуть	233,2	0,117
Сталь	1573	0,873
Серебро	1253,6	0,88
Медь	1353	2,1
Никель	1726	3,0
Свинец	600	0,25

К Температура кипения (T_k) и удельная теплота парообразования (r) при температуре кипения

Вещество	Температура кипения T_k , К	Удельная теплота парообразования $r \times 10^3$ Дж/кг
Азот	77,2	2,01
Вода	373	22,6
Водород	20,3	4,61
Воздух	80	2,09
Глицерин	563	
Кислород	90	2,14
Ртуть	629,7	2,88
Спирт	351,3	8,46
Углекислый газ	194,5	5,95

Л Коэффициент теплопроводности (χ) при нормальных условиях

Вещество	Коэффициент теплопроводности χ , Вт/(м · К)	Вещество	Коэффициент теплопроводности χ , Вт/(м · К)
Азот	$2,37 \cdot 10^{-2}$	Гелий	$1,41 \cdot 10^{-2}$
Алюминий	$2,01 \cdot 10^2$	Кислород	$2,39 \cdot 10^{-2}$
Водяной пар	$1,58 \cdot 10^{-2}$	Лед	2,51
Водород	0,168	Сталь	46,1
Воздух	$2,37 \cdot 10^{-2}$	Углекислый газ	$2,32 \cdot 10^{-2}$

М Коэффициент линейного расширения (α), 1/К

Алюминий	$2,3 \cdot 10^{-5}$
Железо	$1,2 \cdot 10^{-5}$
Латунь	$1,9 \cdot 10^{-5}$
Медь	$1,6 \cdot 10^{-5}$
Олово	$2,7 \cdot 10^{-5}$

Окончание приложения А

Множители и приставки для образования десятичных кратных и дольных единиц

Наименование	Множитель	Обозначение	
		русское	международное

экса	10^{18}	Э	E
пэта	10^{15}	П	P
тера	10^{12}	Т	T
гига	10^9	Г	G
мега	10^6	М	M
кило	10^3	к	k
гекта	10^2	г	h
дека	10^1	да	da
деци	10^{-1}	д	d
санти	10^{-2}	с	c
милли	10^{-3}	м	m
микро	10^{-6}	мк	μ
нано	10^{-9}	н	n
пико	10^{-12}	п	p
фемто	10^{-15}	ф	f
атто	10^{-18}	а	a

Греческий алфавит

Обозначения букв	Названия букв	Обозначения букв	Названия букв
------------------	---------------	------------------	---------------

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

ОГЛАВЛЕНИЕ

1 Общие методические указания.....	3
2 Вопросы для изучения теоретического материала по разделам программы.....	6
3 Рекомендуемая литература.....	7
4 Сведения из теории	9
5 Примеры решения задач	18
6 Задачи к контрольной работе №2.....	28
7 Приложения.....	58

Учебное издание

ПРОНЕВИЧ Игорь Иванович
ПИНЧУК Ростислав Григорьевич
МАТЮШЕНКО Владимир Яковлевич

Физика

Часть 2

Молекулярная физика и термодинамика

Учебно-методическое пособие

для студентов инженерно-технических специальностей
безотрывной формы обучения

Редактор **И. И. Эвентов**

Технический редактор **В. Н. Кучерова**

Подписано в печать . . .2008 г. Формат 60x84 ¹/₁₆.
Бумага газетная. Гарнитура “Таймс”. Печать офсетная.
Усл. печ. л. 6,04. Уч.-изд. л. 4,20. Тираж 1000 экз.
Зак. № . Изд. № .

Издатель и полиграфическое исполнение
Белорусский государственный университет транспорта:
ЛИ № 02330/0133394 от 19.07.2004 г.
ЛП № 02330/0148780 от 30.04.2004 г.
246653, г. Гомель, ул. Кирова, 34