

**ИЖЕВСКИЙ ГОСУДАРСТВЕННЫЙ ТЕХНИЧЕСКИЙ УНИВЕРСИТЕТ**

**Кафедра физики**

**ФИЗИЧЕСКИЕ ОСНОВЫ МОЛЕКУЛЯРНОЙ ФИЗИКИ И ТЕРМОДИНАМИКИ**

**МЕТОДИЧЕСКИЕ УКАЗАНИЯ  
И КОНТРОЛЬНЫЕ ЗАДАНИЯ**

для студентов-заочников  
инженерно-технических  
специальностей

**ИЖЕВСК - 2002**

Рекомендовано в качестве методического пособия студентам-заочникам инженерно-технических специальностей решением кафедры “Физика” ИжГТУ (протокол № 4 от 28 октября 2002 г)

Составители: канд. физ.-мат. наук, доцент Булатова Е.Г.

Рецензенты: канд. физ.-мат. наук, д-р пед. наук, профессор  
Черепанов В.С.  
канд. техн. наук, доцент Кузьмин Г.К.

## Предисловие

Среди естественных наук одно из важнейших мест занимает физика. Она является фундаментом, на котором создают свои теоретические построения и совершенствуют свои экспериментальные методы естественные и прикладные науки. Это предопределяет значение курса физики в программах высшей школы, особенно высших технических учебных заведений. На протяжении последних трех столетий развитие техники тесно переплеталось с развитием физики, которая предваряла принципиально новые направления в технике. И поэтому физика принадлежит к числу фундаментальных наук, составляющих основу теоретической подготовки инженеров и играющих роль той базы, без которой невозможна успешная деятельность инженера в любой области современной техники.

Физика есть наука, изучающая простейшие и вместе с тем наиболее общие закономерности явлений природы, свойства и строение материи, наиболее общие и простые формы движения материи (механические, тепловые, электромагнитные и др.) и их взаимные превращения. Главная цель физики – выявить и объяснить законы природы, которыми определяются все физические явления. Физика - это наука, в которой создаются представления об единстве всего окружающего нас мира. Занимая центральное место среди других наук в объяснении законов природы, физика играет первостепенную роль в формировании научного материалистического мировоззрения, целостной физической картины окружающего нас мира.

Основными задачами курса физики в вузах являются:

1. Формирование у студентов диалектико-материалистических представлений о явлениях и процессах, происходящих в природе, что способствует развитию научного мышления, в частности, правильного понимания границ применимости различных физических понятий, законов, теорий и умения оценивать степень достоверности результатов, полученных с помощью экспериментальных методов исследования. Конкретные физические примеры как нельзя лучше убеждают в том, что знание философии, повседневное применение ее

законов являются одним из существенных залогов успешного развития науки и техники, прогресса человеческого общества.

2. Усвоение основных физических явлений, их механизмов, законов классической и современной физики, методов физического исследования - теоретического фундамента будущей специальности студентов. Эти знания позволят будущим инженерам ориентироваться в потоке научной и технической информации и обеспечат им возможность использования новых физических принципов в тех областях техники, в которых они специализируются. Правильное представление о природе физических явлений особенно важно при постановке новых вопросов, которые всегда возникают в процессе практической деятельности инженера.
3. Выработка у студентов приемов и навыков решения конкретных задач из разных областей физики, помогающих студентам в дальнейшем решать инженерные задачи.
4. Ознакомление студентов с научной аппаратурой, выработка у студентов начальных навыков проведения экспериментальных исследований различных физических явлений и оценки погрешностей измерений.

Цель настоящего учебно-методического пособия – оказать помощь студентам-заочникам инженерно-технических специальностей вуза в изучении курса физики.

В данном пособии приведена контрольная работа по следующему разделу физики: « Основы молекулярной физики и термодинамики». Перед контрольным заданием даются пояснения к рабочей программе, приводятся основные законы и формулы, примеры решения задач. Кроме того, в пособии приведены общие методические указания, рабочая программа по указанному разделу физики, примерная схема решения задач, задачи для самостоятельного решения и некоторые справочные материалы.

Сведения, связанные со спецификой изучения курса физики в рамках конкретной специальности данного вуза, сообщаются студентам кафедрой физики дополнительно.

## Общие методические указания

Основной формой обучения студента – заочника является самостоятельная работа над учебным материалом. Для облегчения этой работы кафедра физики организует чтение лекций, проведение практических занятий и лабораторных работ. Поэтому процесс изучения физики состоит из следующих этапов: 1) проработка установочных и обзорных лекций; 2) самостоятельная работа над учебниками и учебными пособиями; 3) выполнение контрольных работ; 4) прохождение лабораторного практикума; 5) сдача зачетов и экзаменов.

При самостоятельной работе над учебным материалом необходимо:

- 1) составлять конспект, в котором записывать законы и формулы, выражающие эти законы, определения основных физических понятий и сущность физических явлений и методов исследования;
- 2) изучать курс физики систематически, т. к. в противном случае материал будет усвоен поверхностно;
- 3) стараться пользоваться каким-то одним учебником или учебным пособием (или ограниченным числом пособий), чтобы не утрачивалась логическая связь между отдельными вопросами, по крайней мере, внутри какого-то определенного раздела курса.

Контрольные работы позволяют закрепить теоретический материал курса. В процессе изучения физики студент должен выполнить столько контрольных работ, сколько предусмотрено учебными планами по курсу для специальности, на которой он обучается. Решение задач в контрольных работах является проверкой степени усвоения студентом теоретического курса, а рецензии на работу помогают ему доработать и правильно освоить различные разделы курса физики. Перед выполнением контрольной работы студенту необходимо внимательно ознакомиться с примерами решения задач по данной контрольной работе, уравнениями и формулами, а также со справочными материалами. Прежде чем приступить к

решению той или иной задачи, студент должен хорошо понять ее содержание и поставленные в ней вопросы.

Вариант контрольной работы соответствует последней цифре студенческого билета (зачетной книжки). Определение задач, соответствующих варианту, проводится по единой таблице вариантов.

Вариант	Номера задач в контрольной работе					
1	1	11	21	31	41	51
2	2	12	22	32	42	52
3	3	13	23	33	43	53
4	4	14	24	34	44	54
5	5	15	25	35	45	55
6	6	16	26	36	46	56
7	7	17	27	37	47	57
8	8	18	28	38	48	58
9	9	19	29	39	49	59
10	10	20	30	40	50	60

При выполнении контрольных работ необходимо соблюдать следующие правила:

- 1) контрольную работу выполнять в тетради;
- 2) на титульном листе указывать номер контрольной работы, номер варианта (последняя цифра номера студенческого билета), наименование дисциплины, фамилию и инициалы студента, шифр специальности и номер группы;
- 3) контрольную работу следует выполнять аккуратно, оставляя поля для замечаний рецензента;
- 4) задачу своего варианта переписывать полностью без сокращений, а заданные физические величины выписать отдельно, при этом все числовые величины должны быть переведены в систему СИ;
- 5) для пояснения решения задачи, где это нужно, аккуратно сделать чертеж;
- 6) решение задач и используемые формулы должны сопровождаться краткими пояснениями, в пояснениях к задаче необходимо указывать те ос-

новые формулы и законы, на которых базируется решение данной задачи;

- 7) решение задачи необходимо сначала сделать в общем виде, т. е. только в буквенных обозначениях, поясняя применяемые при написании формул буквенные обозначения; при получении расчетной формулы, которая нужна для решения конкретной задачи, обязательно приводить ее вывод;
- 8) вычисления следует проводить путем подстановки заданных числовых величин в расчетную формулу; все числовые значения величин, необходимые для решения данной задачи, должны быть выражены в системе СИ;
- 9) проверить единицы измерения величин по расчетной формуле и тем самым подтвердить правильность ее;
- 10) константы (постоянные) физических величин и другие справочные данные выбираются из таблиц;
- 11) при вычислениях используйте микрокалькулятор, точность расчета определяется числом значащих цифр исходных данных;
- 12) в контрольной работе следует указывать учебники и учебные пособия, которые использовались при решении задач;
- 13) если контрольная работа преподавателем не зачтена, то необходимые дополнения и исправления следует выполнять в той же тетради в конце работы; исправления в тексте незачтенной задачи не допускаются;
- 14) буквенные обозначения величин, используемые при решении задач, должны соответствовать общепринятым;
- 15) контрольная работа сдается на проверку не позднее, чем за месяц до начала экзаменационной сессии; сдача работ в период сессии не допускается.

Контрольные работы, представленные без соблюдения указанных правил, а также работы, выполненные не по своему варианту, рассматриваться не будут.

При возвращении работы на повторное рецензирование обязательно представлять работу с первой рецензией.

Во время экзаменационно-лабораторных сессий проводятся лабораторные работы. Цель лабораторного практикума заключается в приобретении соответствующих навыков в проведении физических экспериментов, в обращении с физическими приборами, в опытной проверке основных физических законов, что способствует более глубокому овладению теоретическим материалом.

На экзаменах и зачетах в первую очередь выясняется усвоение основных теоретических положений программы и умение творчески применять полученные знания к решению практических задач. Физическая сущность явлений, законов, процессов должна излагаться четко и достаточно подробно; решать задачи необходимо без ошибок и уверенно. Любая графическая работа должна быть выполнена аккуратно и четко. Только при выполнении этих условий знания по курсу физики могут быть признаны удовлетворительными.

#### Литература

Трофимова Т.И. Курс физики. М.: Высш. шк., 1985 и др.

Шубин А.С. Курс общей физики. М.: Высш. шк., 1976.

Савельев И.В. Курс общей физики. В 3-х т. М.: Наука, 1989 и др.

Детлаф А.А., Яворский Б.М. Курс физики. М.: Высш. шк., 1989 и др.

Чертов А.Г., Воробьев А.А. Задачник по физике. М.: Высш. шк., 1981 и др.

Трофимова Т.И. Сборник задач по курсу физики. М.: Высш. шк., 1996 и др.

Фирганг Е.В. Руководство к решению задач по курсу общей физики. М.: Высш. шк., 1978.

Яворский Б.М., Детлаф А.А. Справочник по физике. М.: Наука, 1985.

Кибец И.Н., Кибец В.И. Физика: Справочник. Харьков: Фолио; Ростов н/Д: Феникс, 1997.

## РАБОЧАЯ ПРОГРАММА

Содержание рабочей программы определено Государственным образовательным стандартом высшего профессионального образования Российской Федерации.

### Основы молекулярной физики и термодинамики

Молекулярная физика и термодинамика, их объекты и методы исследования. Термодинамические системы и процессы. Термодинамические параметры. Молекулярно-кинетическая теория (МКТ) газов. Идеальный газ. Основное уравнение МКТ, следствия из него. Число степеней свободы молекул, закон равномерного распределения энергии по степеням свободы. Скорости молекул. Распределения Максвелла и Больцмана.

Среднее число столкновений и средняя длина свободного пробега молекул. Явления переноса в термодинамически неравновесных системах. Опытные законы диффузии, теплопроводности и внутреннего трения.

Термодинамический метод исследования. Термодинамические параметры. Равновесные состояния и процессы, их изображения на термодинамических диаграммах. Работа газа, количество теплоты, внутренняя энергия системы. Первое начало термодинамики. Политропный процесс.

Классическая теория теплоемкости идеального газа и ее ограниченность. Круговые, обратимые и необратимые процессы. Тепловые машины. Цикл Карно и его КПД. Второе начало термодинамики. Энтропия. Статистическое толкование второго начала термодинамики.

Реальные газы. Отличие реальных газов от идеальных. Силы межмолекулярного взаимодействия. Уравнение Ван-дер-Ваальса и его анализ. Критическое состояние вещества. Фазовые переходы 1 и 2 рода. Внутренняя энергия реального газа.

## Примерная схема решения задач

К сожалению, не существует единого алгоритма, который позволил бы решить любую физическую задачу. Однако, можно рекомендовать определенную последовательность при решении задач.

Приступая к решению задач по какому-либо разделу, необходимо ознакомиться по учебной литературе и данному методическому пособию с конкретными понятиями и соотношениями этого раздела. Разобрать приведенные в пособии примеры решения задач изучаемого раздела.

При решении задач целесообразно придерживаться следующей схемы:

- 1) по условию задачи представьте себе физическое явление, о котором идет речь. Сделайте краткую запись условия, выразив исходные данные в единицах СИ;
- 2) сделайте, если это необходимо чертеж, схему или рисунок, поясняющий описанный в задаче процесс;
- 3) напишите уравнения или систему уравнений, отображающие физический процесс;
- 4) используя чертежи и условие задачи, преобразуйте уравнения так, чтобы в них входили лишь исходные данные и табличные величины;
- 5) решив задачу в общем виде, проверьте ответ по равенству размерностей величин, входящих в расчетную формулу;
- 6) произведите вычисления и, получив числовой ответ, оцените его реальность.

### Задачи для самостоятельного решения

1. Какой объем при нормальных условиях занимает смесь 2 кг кислорода и 1 кг азота? ( $2,2 \text{ м}^3$ )
2. В баллоне емкостью 10 л находится сжатый воздух при  $27^\circ \text{C}$ . После того, как часть воздуха выпустили, давление понизилось на  $2 \cdot 10^5 \text{ Па}$ . Определить массу выпущенного воздуха. Процесс считать изотермическим. (23 г)
3. Сколько молекул газа находится в сосуде емкостью 2,0 л при нормальных условиях? ( $5,3 \cdot 10^{22}$ )
4. Определить среднюю кинетическую энергию вращательного движения одной молекулы двухатомного газа, если суммарная кинетическая энергия молекул  $\nu=1$  кмоль этого газа 6,02 МДж. ( $4 \cdot 10^{-21} \text{ Дж}$ )

5. Определить концентрацию молекул идеального газа при температуре 350 К и давлении 1,0 МПа. ( $2 \cdot 10^{26} \text{ м}^{-3}$ )
6. Определить температуру идеального газа, если средняя кинетическая энергия поступательного движения его молекул  $2,8 \cdot 10^{-20}$  Дж. (1400 К)
7. Вычислить коэффициент диффузии воздуха при давлении  $1 \cdot 10^5$  Па и температуре 10° С. ( $1,5 \cdot 10^{-5} \text{ м}^2/\text{с}$ )
8. В сосуде емкостью 1 л находится 8 г кислорода. Определить среднюю длину свободного пробега молекул. (20 нм)
9. Газ, занимающий объем 10 л под давлением 0,5 МПа, был изобарно нагрет от 323 К до 473 К. Найти работу расширения газа. (2,3 кДж)
10. При каком процессе выгоднее производить расширение углекислого газа – адиабатном или изотермическом, если объем увеличивается в 2 раза? Начальная температура в обоих случаях одинаковая. (при изотермическом)
11. Какая часть теплоты, полученной от нагревателя, отдается холодильнику при прямом цикле Карно, если температура нагревателя 500 К, температура холодильника 175 К? (35 %)
12. При прямом цикле Карно тепловая машина совершает работу 200 Дж. Температура нагревателя 375 К, холодильника 300 К. Определить количество теплоты, получаемое машиной от нагревателя. (1000 Дж)
13. Как изменится энтропия при изотермическом расширении 0,1 кг кислорода, если при этом объем его изменится от 5 до 10 л? (18 Дж/К)
14. Объем гелия, масса которого 1 кг, увеличился в 4 раза: а) изотермически; б) адиабатно. Каково изменение энтропии в этих случаях? (2880 Дж/К; 0)

## **II ОСНОВЫ МОЛЕКУЛЯРНОЙ ФИЗИКИ И ТЕРМОДИНАМИКИ**

### **ПОЯСНЕНИЯ К РАБОЧЕЙ ПРОГРАММЕ**

Приступая к изучению раздела «Основы молекулярной физики и термодинамики», студенты должны уяснить, что существует два качественно различных и взаимодополняющих метода исследования физических свойств микроскопических систем – статистический (молекулярно-кинетический) и термодинамический. Статистический метод исследования лежит в основе молекулярной физики, а термодинамический – в основе термодинамики. Молекулярно-кинетическая теория является важнейшей теорией, которая позволяет с единой точки зрения рассмотреть самые различные явления во всех состояниях вещества, вскрыть физическую сущность этих явлений и теоретическим путем вывести многочисленные закономерности, открытые экспериментально и имеющие большое практическое значение.

При изучении молекулярно-кинетической теории следует уяснить, что свойства огромной совокупности молекул отличны от свойств каждой отдельной молекулы и свойства макроскопической системы в конечном счете определяются свойствами частиц системы, особенностями их движения и средними значениями кинематических характеристик частиц, т.е. их скоростей, энергией и т.д.

В отличие от молекулярно-кинетической теории термодинамика не изучает конкретно молекулярные взаимодействия, происходящие с отдельными молекулами или атомами, а рассматривает взаимопревращения и связь различных видов энергии, теплоты и работы. Термодинамика основывается на двух, установленных опытным путем законах (началах): первом и втором законах термодинамики. Они позволяют описывать физические явления, связанные с превращением энергии макроскопическим путем.

При изучении основ термодинамики студент должен четко усвоить такие понятия, как термодинамическая система, термодинамические параметры (параметры состояния), равновесное состояние, уравнение состояния, термодинамический процесс, внутренняя энергия, энтропия и т.д.

Контрольная работа № 2 построена так, что позволяет проверить знания студентов по основным вопросам данного раздела.

В задачах на тему «Основы молекулярно-кинетической теории» внимание уделено таким вопросам программы, как уравнение Клапейрона-Менделеева, уравнение молекулярно-кинетической теории, средне кинетические энергии поступательного и вращательного движения молекул, средняя длина свободного пробега и среднее число соударений, явления переноса.

Задачи по теме «Основы термодинамики» охватывают такие важные соотношения и понятия, как первое начало термодинамики, внутренняя энергия, работа при различных изопроцессах и адиабатном процессе. Включены также задачи, которые позволяют изучить и понять такие вопросы, как цикл Карно, второе начало термодинамики и энтропия, которая в отличие от количества теплоты является функцией состояния.

### Основные законы и формулы

Количество вещества	$\nu = \frac{N}{N_A} \text{ или } \nu = \frac{m}{\mu}$
Количество вещества смеси газов	$\nu = \frac{N_1}{N_A} + \frac{N_2}{N_A} + \dots + \frac{N_n}{N_A} \text{ или}$ $\nu = \frac{m_1}{\mu_1} + \frac{m_2}{\mu_2} + \dots + \frac{m_n}{\mu_n}$
Уравнение Клапейрона-Менделеева (уравнение состояния идеального газа)	$PV = \frac{m}{\mu} RT$
Закон Бойля-Мариотта	$PV = const \text{ или } P_1V_1 = P_2V_2$
Закон Гей-Люссака	$\frac{V}{T} = const \text{ или } \frac{V_1}{T_1} = \frac{V_2}{T_2}$
Закон Шарля	$\frac{P}{T} = const \text{ или } \frac{P_1}{T_1} = \frac{P_2}{T_2}$
Закон Дальтона	$p = p_1 + p_2 + \dots + p_n$
Молярная масса смеси газов	$\mu = \frac{m_1 + m_2 + \dots + m_n}{\nu_1 + \nu_2 + \dots + \nu_n}$
Концентрация молекул	$n = \frac{N}{V} = \frac{N_A \rho}{\mu}$
Основное уравнение молекулярно-кинетической теории газов	$p = \frac{1}{3} nm_0 \langle v_{кв}^2 \rangle$ $p = \frac{2}{3} n \langle \varepsilon_{посм} \rangle$ $p = nkT$
Средняя кинетическая энергия молекулы	$\langle \varepsilon \rangle = \frac{i}{2} kT$
Внутренняя энергия идеального газа	$U = \frac{i}{2} \frac{m}{\mu} RT$
Скорости молекул:	
средняя квадратичная	$\langle v_{кв} \rangle = \sqrt{\frac{3kT}{m_0}} = \sqrt{\frac{3RT}{\mu}}$
средняя арифметическая	$\langle v \rangle = \sqrt{\frac{8kT}{\pi m_0}} = \sqrt{\frac{8RT}{\pi \mu}}$
наиболее вероятная	$v_s = \sqrt{\frac{2kT}{m_0}} = \sqrt{\frac{2RT}{\mu}}$

Средняя длина свободного пробега молекулы	$\langle \lambda \rangle = \frac{1}{\sqrt{2}\pi d^2 n}$
Среднее число соударений молекулы за 1 с	$\langle z \rangle = \sqrt{2}\pi d^2 n \langle v \rangle$
Распределение молекул в потенциальном поле сил (распределение Больцмана)	$n = n_0 \exp\left(-\frac{E_n}{kT}\right)$
Барометрическая формула	$p = p_0 \exp\left(-\frac{mgh}{kT}\right)$
Уравнение диффузии (закон Фика)	$dm = -D \frac{dc}{dx} S dt$
Сила внутреннего трения в жидкости (газе)	$F = -\eta \frac{dv}{dx} S$
Уравнение теплопроводности	$dQ = -\lambda \frac{dT}{dx} S dt$
Коэффициент диффузии	$D = \frac{1}{3} \langle v \rangle \cdot \langle \lambda \rangle$
Динамическая вязкость (коэффициент внутреннего трения)	$\eta = \frac{1}{3} \rho \langle v \rangle \cdot \langle \lambda \rangle = D\rho$
Теплопроводность	$\lambda = \frac{1}{3} c_v \rho \langle v \rangle \cdot \langle \lambda \rangle = \eta c_v$
Уравнение Майера	$C_p - C_v = R$
Теплоемкость молярная:	
изохорная	$C_v = \frac{i}{2} R = c_v \mu$
изобарная	$C_p = \frac{i+2}{2} R = c_p \mu$
Первое начало термодинамики	$\delta Q = dU + \delta A$
Работа расширения газа при процессе:	
изобарном	$A = P\Delta V = \frac{m}{\mu} R\Delta T$
изотермическом	$A = \frac{m}{\mu} RT \ln \frac{V_2}{V_1} = \frac{m}{\mu} RT \ln \frac{P_1}{P_2}$

адиабатном	$A = \frac{m}{\mu} C_p (T_1 - T_2) =$ $= \frac{m}{\mu} \frac{RT_1}{(\gamma - 1)} \left[ 1 - \left( \frac{V}{V_2} \right)^{\gamma - 1} \right] =$ $= \frac{P_1 V_1}{(\gamma - 1)} \left[ 1 - \left( \frac{V}{V_2} \right)^{\gamma - 1} \right]$
Уравнение Пуассона	$PV^\gamma = const$ $TV^{\gamma - 1} = const$ $T^\gamma P^{1 - \gamma} = const$
Показатель адиабаты (коэффициент Пуассона)	$\gamma = \frac{c_p}{c_v}$
Коэффициент полезного действия тепловой машины	$\eta = \frac{Q_1 - Q_2}{Q_1}$
Коэффициент полезного действия цикла Карно	$\eta = \frac{T_1 - T_2}{T_1}$
Изменение энтропии	$\Delta S = S_2 - S_1 = \int_1^2 \frac{dQ}{T}$

## Примеры решения задач

1. В сосуде объемом  $V=2$  л находятся масса  $m_1=6$  г углекислого газа ( $\text{CO}_2$ ) и масса  $m_2=5$  г закиси азота ( $\text{N}_2\text{O}$ ) при температуре  $t=127$  °С. Найти давление и молярную массу смеси газов.

**Дано:**

$$\begin{aligned} V &= 2 \text{ л} = 2 \cdot 10^{-3} \text{ м}^3 \\ m_1 &= 6 \text{ г} = 0,006 \text{ кг} \\ m_2 &= 5 \text{ г} = 0,005 \text{ кг} \\ t &= 127^\circ\text{C} \\ T &= 127 + 273 = 400 \text{ К} \\ \mu_1 &= 0,044 \text{ кг/моль} \\ \mu_2 &= 0,044 \text{ кг/моль} \end{aligned}$$

**Найти:**

$p$  - ?  $\mu$  - ?

**Решение:**

Запишем уравнения Клапейрона-Менделеева для углекислого газа:

$$p_1 V = \frac{m_1}{\mu_1} RT \quad (1)$$

и для закиси азота:

$$p_2 V = \frac{m_2}{\mu_2} RT, \quad (2)$$

где  $p_1$  – парциальное давление углекислого газа;  $m_1$  – масса углекислого газа;  $\mu_1$  – молярная масса углекислого газа;  $R=8,31$  Дж/(мольК) – универсальная газовая постоянная;  $p_2$  – парциальное давление закиси азота;  $V$  – объем сосуда;  $T$  – температура газа;  $m_2$  – масса закиси азота;  $\mu_2$  – молярная масса закиси азота.

Под парциальным давлением понимается давление, которое оказывал бы газ на стенки сосуда, если бы он только один находился в нем. По закону Дальтона, давление смеси газов равно сумме парциальных давлений газов, входящих в состав смеси:

$$p = p_1 + p_2 \quad (3)$$

Из уравнений (1) и (2) выразим  $p_1$  и  $p_2$  и подставим в уравнение (3):

$$p = \frac{m_1 RT}{\mu_1 V} + \frac{m_2 RT}{\mu_2 V} = \frac{RT}{V} \left( \frac{m_1}{\mu_1} + \frac{m_2}{\mu_2} \right)$$

Подставляем числовые значения и получаем:

$$p = \frac{8,31 \cdot 400}{2 \cdot 10^{-3}} \left( \frac{6 \cdot 10^{-3}}{0,044} + \frac{5 \cdot 10^{-3}}{0,044} \right) = 4,2 \cdot 10^5 \text{ Па}$$

Молярную массу смеси определим по формуле:

$$\mu = \frac{m_1 + m_2}{\left( \frac{m_1}{\mu_1} + \frac{m_2}{\mu_2} \right)} = \frac{6 \cdot 10^{-3} + 5 \cdot 10^{-3}}{\left( \frac{6 \cdot 10^{-3}}{0,044} + \frac{5 \cdot 10^{-3}}{0,044} \right)} = 0,044 \text{ кг/моль}$$

**Ответ:**  $p=4,2 \cdot 10^5$  Па;  $\mu=0,044$  кг\моль.

2. Чему равна энергия теплового движения 20 г азота при температуре  $t=27^\circ\text{C}$ ?

Найти средние кинетические энергии поступательного и вращательного движения молекул.

**Дано:**

$$m=20 \text{ г}=0,02 \text{ кг}$$

$$t=27^\circ\text{C}$$

$$T=27+273=300 \text{ К}$$

$$\mu=0,028 \text{ кг/моль}$$

**Найти:**  $U$  - ?

$$\langle E_{\text{пост}} \rangle - ?$$

$$\langle E_{\text{вращ}} \rangle - ?$$

**Решение:**

Считаем азот идеальным газом. Молекула азота двухатомная. Связь между атомами считаем жесткой, тогда число степеней свободы молекулы азота  $i=5$ . В среднем на одну степень свободы приходится энергия:  $\langle \varepsilon_i \rangle = \frac{1}{2} kT$ ,

где  $k$  – постоянная Больцмана;  $T$  – термодинамическая температура. Поступательному движению приписывается три степени свободы  $i_{\text{пост}}=3$ , а вращательному две степени свободы  $i_{\text{вращ}}=2$ .

Тогда средняя энергия поступательного движения одной молекулы:  $\langle \varepsilon_{\text{пост}} \rangle = \frac{3}{2} kT$ . Средняя энергия вращательного

движения одной молекулы:  $\langle \varepsilon_{\text{вращ}} \rangle = kT$

Число молекул, содержащихся в массе газа:

$$N = \nu \cdot N_A = \frac{m}{\mu} N_A, \text{ где } m \text{ – масса азота; } \mu \text{ – молярная масса}$$

азота;  $\nu$  – количество вещества (число молей);  $N_A$  – число Авогадро. Тогда средняя кинетическая энергия поступательного движения молекул азота:

$$\langle E_{\text{пост}} \rangle = \frac{m}{\mu} N_A \cdot \frac{3}{2} kT = \frac{3}{2} \frac{m}{\mu} RT, \quad (1)$$

где  $R=kN_A$  – универсальная газовая постоянная.

Средняя кинетическая энергия вращательного движения молекул азота:

$$\langle E_{\text{вращ}} \rangle = \frac{m}{\mu} RT \quad (2)$$

Тогда энергия теплового движения молекул азота:

$$U = \langle E_{\text{пост}} \rangle + \langle E_{\text{вращ}} \rangle = \frac{i}{2} \frac{m}{\mu} RT = \frac{5}{2} \frac{m}{\mu} RT \quad (3)$$

Подставляя числовые значения в (1), (2) и (3), получаем:

$$\langle E_{\text{пост}} \rangle = \frac{3}{2} \frac{0,02}{0,028} 8,31 \cdot 300 = 2,7 \cdot 10^3 \text{ Дж}$$

$$\langle E_{\text{вращ}} \rangle = \frac{0,02}{0,028} 8,31 \cdot 300 = 1,8 \cdot 10^3 \text{ Дж}$$

$$U = \frac{5}{2} \frac{0,02}{0,028} 8,31 \cdot 300 = 4,5 \cdot 10^3 \text{ Дж}$$

**Ответ:**  $\langle E_{\text{пост}} \rangle = 2,7 \text{ кДж}$ ;  $\langle E_{\text{вращ}} \rangle = 1,8 \text{ кДж}$ ;  $U = 4,5 \text{ кДж}$ .

3. Найти среднее число столкновений в единицу времени и среднюю длину свободного пробега молекул кислорода при давлении  $p = 53,33 \text{ кПа}$  и температуре  $t = 27^\circ\text{C}$ . При этих же условиях определите коэффициенты диффузии и внутреннего трения кислорода.

**Дано:**

$$t = 27^\circ\text{C}$$

$$T = 27 + 273 = 300 \text{ К}$$

$$\mu = 0,032 \text{ кг/моль}$$

$$p = 53,33 \text{ кПа} =$$

$$= 53,33 \cdot 10^3 \text{ Па}$$

$$d = 2,9 \cdot 10^{-10} \text{ м}$$

**Решение:**

Средняя длина свободного пробега молекул кислорода:

$$\langle \lambda \rangle = \frac{1}{\sqrt{2} \pi d^2 n}, \quad (1)$$

где  $d$  – эффективный диаметр молекулы кислорода;  $n$  – концентрация молекул. Ее можно определить из уравнения

$$p = nkT: \quad n = \frac{p}{kT}, \quad (2)$$

где  $k$  – постоянная Больцмана. Подставляем (2) в (1) и получаем:

$$\langle \lambda \rangle = \frac{kT}{\sqrt{2} \pi d^2 p} \quad (3)$$

Среднее число соударений одной молекулы за одну секунду равно:

$$\langle z \rangle = \frac{\langle v \rangle}{\langle \lambda \rangle}, \quad (4)$$

где  $\langle v \rangle$  – средняя арифметическая скорость молекулы:

$$\langle v \rangle = \sqrt{\frac{8RT}{\pi \mu}} \quad (5)$$

Подставляем (3) и (5) в (4) и получаем:

$$\langle z \rangle = \sqrt{\frac{8RT}{\pi \mu}} \frac{\sqrt{2} \pi d^2 p}{kT} \quad (6)$$

Коэффициент диффузии:

$$D = \frac{1}{3} \langle v \rangle \langle \lambda \rangle \quad (7)$$

Подставляем (3) и (5) в (7) и получаем:

$$D = \frac{1}{3} \sqrt{\frac{8RT}{\pi \mu}} \frac{kT}{\sqrt{2} \pi d^2 p} \quad (8)$$

**Найти:**  $\langle z \rangle$  - ?  
 $\langle \lambda \rangle$  - ?  $D$  - ?  $\eta$  - ?

Коэффициент внутреннего трения:

$$\eta = \frac{1}{3} \langle v \rangle \langle \lambda \rangle \rho \quad (9)$$

где  $\rho$  - плотность газа при температуре  $T=300$  К и давлении  $p=53,33$  кПа.

Для нахождения  $\rho$  воспользуемся уравнением Клапейрона-Менделеева:

$$PV = \frac{m}{\mu} RT \quad (10)$$

Из уравнения (10):

$$\rho = \frac{m}{V} = \frac{p\mu}{RT} \quad (11)$$

Подставляем (11) в (9) и учитывая (7), получаем:

$$\eta = D \frac{p\mu}{RT} \quad (12)$$

Подставляя числовые значения в (3), (6), (8), (12), получаем:

$$\begin{aligned} \langle \lambda \rangle &= \frac{1,38 \cdot 10^{-23} 300}{\sqrt{2} \cdot 3,14 \cdot (2,9 \cdot 10^{-10})^2 53,33 \cdot 10^3} = 2,1 \cdot 10^{-7} \text{ м} \\ \langle z \rangle &= \sqrt{\frac{8 \cdot 8,31 \cdot 300}{3,14 \cdot 0,032} \frac{\sqrt{2} \cdot 3,14 \cdot (2,9 \cdot 10^{-10})^2 53,33 \cdot 10^3}{1,38 \cdot 10^{-23} 300}} = \\ &= 2,1 \cdot 10^9 \text{ с}^{-1} \\ D &= \frac{1}{3} \sqrt{\frac{8 \cdot 8,31 \cdot 300}{3,14 \cdot 0,032} \frac{1,38 \cdot 10^{-23} 300}{\sqrt{2} \cdot 3,14 \cdot (2,9 \cdot 10^{-10})^2 53,33 \cdot 10^3}} = \\ &= 3,12 \cdot 10^{-5} \text{ м}^2/\text{с} \\ \eta &= 3,12 \cdot 10^{-5} \frac{53,33 \cdot 10^3 \cdot 0,032}{8,31 \cdot 300} = 2,1 \cdot 10^{-5} \text{ кг}/(\text{м} \cdot \text{с}) \end{aligned}$$

**Ответ:**

$$\begin{aligned} \langle \lambda \rangle &= 2,1 \cdot 10^{-7} \text{ м}; \quad \langle z \rangle = 2,1 \cdot 10^9 \text{ с}^{-1}; \quad D = 3,12 \cdot 10^{-5} \text{ м}^2/\text{с}; \\ \eta &= 2,1 \cdot 10^{-5} \text{ кг}/(\text{м} \cdot \text{с}). \end{aligned}$$

4. Масса  $m=6,5$  г водорода, находящегося при температуре  $t=27^\circ\text{C}$ , расширяется вдвое при  $p=\text{const}$  за счет притока тепла извне. Найти работу  $A$  расширения газа, изменения  $\Delta U$  внутренней энергии газа и количество теплоты  $Q$ , сообщенное газу.

**Дано:**

$t_1=27^\circ\text{C}$

$T_1=27+273=300\text{ K}$

$\mu=0,002\text{ кг/моль}$

$m=6,5\text{ г}=6,5\cdot 10^{-3}\text{ кг}$

$V_2=2V_1$

**Найти:**  $A$  - ? $\Delta U$  - ?  $Q$  - ?**Решение:**

Количество теплоты, необходимое для нагревания газа при постоянном давлении:

$$Q = \frac{m}{\mu} c_p (T_2 - T_1), \quad (1)$$

где  $c_p$  – молярная теплоемкость газа при постоянном давлении. Для всех двухатомных газов (с жесткой связью):

$$c_p = \frac{7}{2} R; \quad c_p = \frac{7}{2} 8,31 = 29,1 \text{ Дж/(моль}\cdot\text{К)}$$

Температуру  $T_2$  найдем из закона Гей-Люссака:

$$\frac{V_1}{T_1} = \frac{V_2}{T_2} \quad (2)$$

Из уравнения (2) получаем:

$$T_2 = \frac{V_2 T_1}{V_1} = 2T_1 \quad (3)$$

С учетом (3) выражение (1) запишется:

$$Q = \frac{m}{\mu} c_p T_1 \quad (4)$$

Изменение внутренней энергии газа:

$$\Delta U = \frac{m}{\mu} c_v (T_2 - T_1), \quad (5)$$

где  $c_v$  – молярная теплоемкость газа при постоянном объеме. Для всех двухатомных газов (с жесткой связью):

$$c_v = \frac{5}{2} R; \quad c_v = \frac{5}{2} 8,31 = 20,8 \text{ Дж/(моль}\cdot\text{К)}$$

С учетом (3) выражение (5) запишется:

$$\Delta U = \frac{m}{\mu} c_v T_1 \quad (6)$$

Работа расширения газа при изобарном процессе:

$$A = p\Delta V = \frac{m}{\mu} R\Delta T = \frac{m}{\mu} R(T_2 - T_1) \quad (7)$$

С учетом (3) выражение (7) запишется:

$$A = \frac{m}{\mu} R T_1 \quad (8)$$

Подставляя числовые значения в формулы (4), (6) и (8), получаем:

$$Q = \frac{6,5 \cdot 10^{-3}}{0,002} 29,1 \cdot 300 = 28,4 \cdot 10^3 \text{ Дж} = 28,4 \text{ кДж}$$

$$\Delta U = \frac{6,5 \cdot 10^{-3}}{0,002} 20,8 \cdot 300 = 20,3 \cdot 10^3 \text{ Дж} = 20,3 \text{ кДж}$$

$$A = \frac{6,5 \cdot 10^{-3}}{0,002} 8,31 \cdot 300 = 8,1 \cdot 10^3 = 8,1 \text{ кДж}$$

**Ответ:**  $Q=28,4$  кДж;  $\Delta U=20,3$  кДж;  $A=8,1$  кДж

5. Объем аргона, находящегося при давлении  $p=80$  кПа увеличился от  $V_1=1$  л до  $V_2=2$  л. Насколько изменится внутренняя энергия газа, если расширение производилось адиабатно?

**Дано:**

$$\begin{aligned} \mu &= 0,040 \text{ кг/моль} \\ p &= 80 \text{ кПа} = \\ &= 80 \cdot 10^3 \text{ Па} \\ V_1 &= 1 \text{ л} = 10^{-3} \text{ м}^3 \\ V_2 &= 2 \text{ л} = 2 \cdot 10^{-3} \text{ м}^3 \end{aligned}$$

**Найти:**  $\Delta U$  - ?

**Решение:**

При адиабатном расширении теплообмена с внешней средой не происходит, поэтому  $Q=0$ . Первый закон термодинамики запишем в виде:

$$\Delta U + A = 0 \quad (1)$$

Это соотношение устанавливает, что работа расширения газа может быть произведена только за счет уменьшения внутренней энергии газа:

$$A = -\Delta U \quad (2)$$

Работа, совершаемая газом при адиабатном процессе,

$$A = \frac{p_1 V_1}{(\gamma - 1)} \left[ 1 - \left( \frac{V_1}{V_2} \right)^{\gamma - 1} \right], \quad (3)$$

где  $\gamma = \frac{c_p}{c_v} = \frac{i + 2}{i}$  - показатель степени адиабаты. Для аргона

одноатомного газа ( $i=3$ ) имеем  $\gamma=1,67$ .

Найдем изменение внутренней энергии при адиабатном процессе для аргона, учитывая формулы (2) и (3):

$$\Delta U = \frac{p_1 V_1}{(\gamma - 1)} \left[ \left( \frac{V_1}{V_2} \right)^{\gamma - 1} - 1 \right] \quad (4)$$

Подставляем числовые значения в (4), получаем:

$$\Delta U = \frac{80 \cdot 10^3 \cdot 10^{-3}}{(1,67 - 1)} \left[ \left( \frac{10^{-3}}{2 \cdot 10^{-3}} \right)^{1,67 - 1} - 1 \right] = -44,6 \text{ Дж}$$

**Ответ:**  $\Delta U=-44,6$  Дж

6. Идеальный газ, совершающий цикл Карно, произвел работу  $A=600$  Дж. Температура нагревателя равна  $T_1=500$  К, холодильника –. Определить термический к.п.д. цикла и количество теплоты, отданное холодильнику за один цикл.

**Дано:**

$$\begin{aligned} A &= 600 \text{ Дж} \\ T_1 &= 500 \text{ К} \\ T_2 &= 300 \text{ К} \end{aligned}$$

**Найти:**  $\eta$  - ?  
 $Q_2$  - ?

**Решение:**

Термический к.п.д. цикла Карно:

$$\eta = \frac{T_1 - T_2}{T_1} \quad (1)$$

С другой стороны к.п.д. машины:

$$\eta = \frac{Q_1 - Q_2}{Q_1} = \frac{A}{Q_1} \quad (2)$$

Из выражения (2) находим количество теплоты отданное холодильнику:  $Q_2 = Q_1 - A$ , (3)

где  $Q_1 = \frac{A}{\eta}$  - количество теплоты, полученной от нагревателя.

Подставив это выражение в (3), получим:

$$Q_2 = \frac{A}{\eta} - A = A \left( \frac{1 - \eta}{\eta} \right) \quad (4)$$

Подставляем числовые значения и получаем:

$$\eta = \frac{500 - 300}{500} = 0,4$$

$$Q_2 = 600 \left( \frac{1 - 0,4}{0,4} \right) = 900 \text{ Дж}$$

**Ответ:**  $\eta=0,4$ ;  $Q_2=900$  Дж

7. Определить изменение энтропии при изотермическом расширении азота массой  $m=10$  г, если давление газа уменьшилось от  $p_1=0,1$  МПа до  $p_2=50$  кПа.

**Дано:**

$$\begin{aligned} m &= 10 \text{ г} = 0,01 \text{ кг} \\ p_1 &= 0,1 \text{ МПа} = 10^5 \text{ Па} \\ p_2 &= 50 \text{ кПа} = \\ &= 5 \cdot 10^4 \text{ Па} \end{aligned}$$

**Найти:**  $\Delta S$  - ?

**Решение:**

Изменение энтропии с учетом, что процесс изотермический ( $T=\text{const}$ ):

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

Из первого начала термодинамики количество теплоты, полученное газом,  $Q = A + \Delta U$ . Для изотермического процесса  $\Delta U=0$ , поэтому:  $Q=A$  (2)

Работа газа в изотермическом процессе

$$A = \frac{m}{\mu} RT \ln \frac{V_2}{V_1} = \frac{m}{\mu} RT \ln \frac{p_1}{p_2} \quad (3)$$

Учитывая (2) подставим (3) в (1) и получим

$$\Delta S = \frac{m}{\mu} R \ln \frac{p_1}{p_2} \quad (4)$$

Подставляем числовые значения в (4) и получаем:

$$\Delta S = \frac{0,01}{0,028} 8,31 \ln \frac{10^5}{5 \cdot 10^4} = 2,06 \text{ Дж/К}$$

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

## Контрольная работа № 2

1. Какой объем при нормальных условиях занимает смесь 4 кг гелия и 2 кг азота?
2. В баллоне емкостью 5 л находится 2 кг водорода и 1 кг кислорода. Определить давление смеси, если температура окружающей среды  $7^\circ \text{C}$ .
3. В баллоне емкостью 20 л находится азот при  $127^\circ \text{C}$ . После того, как часть газа выпустили, давление понизилось на  $2 \cdot 10^5 \text{ Па}$ . Определить массу выпущенного азота. Процесс считать изотермическим.
4. В сосуде, имеющем форму шара, радиус которого 0,2 м, находится 80 г кислорода. До какой температуры можно нагревать сосуд, если его стенки выдерживают давление  $7 \cdot 10^5 \text{ Па}$ ?
5. При какой температуре находится газ, если при нагревании его на  $20^\circ \text{C}$  при постоянном давлении объем увеличился в 2 раза? Для каких газов это возможно?
6. В баллоне под давлением 1 МПа находится газовая смесь из кислорода и азота. Считая, что масса азота составляет 80% от массы смеси, определить парциальное давление отдельных газов.
7. Два сосуда одинакового объема содержат кислород. В одном сосуде давление  $p_1 = 2 \text{ МПа}$  и температура  $T_1 = 800 \text{ К}$ , в другом –  $p_2 = 2,5 \text{ МПа}$ ,  $T_2 = 200 \text{ К}$ . Сосуды соединили трубкой и охладили находящийся в них кислород до температуры  $T = 200 \text{ К}$ . Определить установившееся в сосудах давление  $p$ .
8. При температуре  $27^\circ \text{C}$  и давлении  $12 \cdot 10^5 \text{ Па}$  плотность смеси водорода и азота  $10 \text{ г/дм}^3$ . Определить молярную массу смеси.
9. До какой температуры нужно нагреть запаянный шар, содержащий 35 г воды, чтобы шар разорвался, если известно, что стенки шара выдерживают давление  $2 \cdot 10^7 \text{ Па}$ ? Емкость шара 1 л.
10. В пустой сосуд емкостью  $5 \text{ дм}^3$  впустили  $3 \text{ дм}^3$  азота под давлением 250 кПа и  $4 \text{ дм}^3$  водорода под давлением 50 кПа. Каково давление образовавшейся смеси?

11. Давление идеального газа 2 МПа, концентрация молекул  $2 \cdot 10^{23} \text{ см}^{-3}$ . Определить среднюю кинетическую энергию поступательного движения одной молекулы и температуру газа.
12. Определить среднюю кинетическую энергию одной молекулы неона, кислорода и водяного пара при температуре 500 К.
13. Средняя кинетическая энергия поступательного движения молекул газа равна  $5 \cdot 10^{-21}$  Дж. Концентрация молекул  $3 \cdot 10^{19} \text{ см}^{-3}$ . Определить давление газа.
14. Определить среднюю кинетическую энергию вращательного движения одной молекулы двухатомного газа, если суммарная кинетическая энергия молекул одного киломоля этого газа равна 6,02 МДж.
15. Сколько молекул водорода находится в сосуде емкостью 1 л, если средняя квадратичная скорость движения молекул 500 м/с, а давление на стенки сосуда 1 кПа?
16. Найти среднюю кинетическую энергию вращательного движения всех молекул, содержащихся в 0,25 г водорода при температуре 27°C.
17. При какой температуре средняя кинетическая энергия поступательного движения молекулы идеального газа равна  $4,14 \cdot 10^{-21}$  Дж?
18. Количество вещества гелия  $\nu = 1,5$  моль, температура  $T = 120$  К. Определить суммарную кинетическую энергию поступательного движения всех молекул гелия.
19. В сосуде емкостью  $500 \text{ см}^3$  находится газ при температуре 47°C. Из-за утечки газа из колбы просочилось  $10^{21}$  молекул. На сколько снизилось давление газа в сосуде?
20. Определить среднюю квадратичную скорость молекулы газа, заключенного в сосуд вместимостью  $V = 2$  л под давлением  $p = 200$  кПа. Масса газа  $m = 0,3$  г.
21. Во сколько раз коэффициент диффузии молекул кислорода больше коэффициента диффузии молекул азота? Температура и давление газов одинаковые.
22. Сколько соударений в секунду в среднем испытывает молекула водорода, находящегося при нормальных условиях?
23. Определить коэффициент внутреннего трения углекислого газа при температуре 200 К.
24. Сосуд емкостью 10 л содержит водород массой 20 г. Определить среднее число соударений молекул в секунду, если температура газа 300 К.
25. Динамическая вязкость кислорода при нормальных условиях  $1,91 \cdot 10^{-4} \text{ кг/(м}\cdot\text{с)}$ . Какова средняя длина свободного пробега молекул кислорода при этих условиях?
26. В сосуде находится углекислый газ, плотность которого  $\rho = 1,7 \text{ кг/м}^3$ . Средняя длина свободного пробега его молекул  $\langle \lambda \rangle = 79$  нм. Найти диаметр молекул углекислого газа.
27. Определить среднюю длину свободного пробега молекул азота, если плотность разреженного газа  $0,9 \cdot 10^{-6} \text{ кг/м}^3$ .
28. При каком давлении средняя длина свободного пробега молекул кислорода равна 1,25 м, если температура газа 47°C?

29. Вычислить среднюю длину свободного пробега молекул воздуха при давлении  $1 \cdot 10^5$  Па и температуре  $10^\circ \text{C}$ .
30. Вычислить коэффициент диффузии воздуха при давлении  $p=10^5$  Па и температуре  $t=17^\circ \text{C}$ .
31. Количество  $\nu=1$  кмоль азота, находящегося при нормальных условиях, расширяется адиабатически от объема  $V_1$  до объема  $V_2=5V_1$ . Найти изменение внутренней энергии газа и работу, совершенную газом при расширении.
32. Найти работу и изменение внутренней энергии при адиабатном расширении 0,5 кг воздуха, если его объем увеличился в 5 раз. Начальная температура  $17^\circ \text{C}$ .
33. Определить количество теплоты, сообщенное 14 г азота, если он был изобарически нагрет от  $37^\circ \text{C}$  до  $187^\circ \text{C}$ . Какую работу при этом совершит газ и как изменится его внутренняя энергия?
34. Во сколько раз увеличится объем 2 моль водорода при изотермическом расширении при температуре  $27^\circ \text{C}$ , если при этом была затрачена теплота 8 кДж?
35. Водород, занимающий объем 4 л и находящийся под давлением  $10^5$  Па, адиабатно сжат до объема 1 л. Найти работу сжатия и изменение внутренней энергии водорода.
36. Масса  $m=10,5$  г азота изотермически расширяется при температуре  $t=-23^\circ \text{C}$ , причем его давление изменяется от  $p_1=250$  кПа до  $p_2=100$  кПа. Найти работу, совершенную газом при расширении.
37. При нагревании 0,5 кмоль азота было передано 1000 Дж теплоты. Определить работу расширения при постоянном давлении.
38. Определить, какое количество теплоты необходимо сообщить углекислому газу массой 440 г, чтобы нагреть его на 10 К: а) изохорно; б) изобарно.
39. Какое количество теплоты нужно сообщить 1 моль кислорода, чтобы он совершил работу в 10 Дж: а) при изотермическом процессе; б) при изобарном?
40. Азот массой 1 кг, находящийся при температуре 300 К, сжимают: а) изотермически; б) адиабатно, увеличивая давление в 10 раз. Определить работу, затраченную на сжатие газа, в обоих случаях.
41. Какая часть теплоты, полученной от нагревателя, отдается холодильнику при прямом цикле Карно, если температура нагревателя в четыре раза больше температуры холодильника?
42. Найти КПД цикла, состоящего из двух изобар и из двух адиабат, если температуры характерных точек равны  $T_1=370$  К,  $T_2=600$  К,  $T_3=500$  К,  $T_4=350$  К. Решение пояснить диаграммой  $PV$ .
43. За счет 1 кДж теплоты, полученного от нагревателя, машина, работающая по циклу Карно, совершает работу 0,5 кДж. Температура нагревателя 500 К. Определить температуру холодильника.
44. Идеальная тепловая машина работает по циклу Карно. Температура нагревателя  $T_1=500$  К, температура холодильника  $T_2=250$  К. Определить термический КПД цикла, а также работу рабочего вещества при изотермическом расширении, если при изотермическом сжатии совершена работа 70 Дж.

45. Определить, на сколько процентов изменится КПД прямого цикла Карно, если температура нагревателя 894 К, а температура холодильника уменьшилась от 494 К до 394 К.
46. Совершая прямой цикл Карно, газ отдал холодильнику 25 % теплоты, полученной от нагревателя. Определить температуру холодильника, если температура нагревателя 500 К.
47. Тепловая машина работает по циклу Карно, КПД которого 0,2. Каким будет КПД этой машины, если она совершит тот же цикл в обратном направлении?
48. Холодильная машина работает по обратному циклу Карно, КПД которого 300%. Каков будет КПД тепловой машины, работающей по прямому циклу Карно?
49. Определить работу идеальной тепловой машины за один цикл, если она в течение цикла получает от нагревателя количество теплоты 2095 Дж. Температура нагревателя 500 К, холодильника 300 К.
50. Температура нагревателя тепловой машины, работающей по циклу Карно, 480 К, температура холодильника 390 К. Какой должна быть температура нагревателя при неизменной температуре холодильника, чтобы КПД машины увеличился в 2 раза?
51. При изобарном расширении водорода массой 200 г его объем увеличивается в 3 раза. Определить изменение энтропии водорода при этом процессе.
52. Определить изменение энтропии, происходящее при смешивании 2 кг воды при температуре 250 К и 4 кг воды при температуре 300 К.
53. Объем кислорода, масса которого 10 г, увеличился в 4 раза: а) изотермически; б) адиабатно. Каково изменение энтропии в этих случаях?
54. Определить изменение энтропии 1 моль идеального газа при изохорном, изобарном и изотермическом процессах.
55. Определить изменение энтропии 2 кг расплавленного свинца при охлаждении его от 327°C до 10°C. Температура плавления свинца 327°C.
56. Найти изменение энтропии при нагревании 1 кг воды от 0°C до 100°C и последующем превращении ее в пар при той же температуре.
57. Найти изменение энтропии при изотермическом расширении 6 г водорода, если при этом давление его изменится от  $p_1=100$  кПа до  $p_2=50$  кПа?
58. Определить изменение энтропии при изобарном нагревании 0,1 кг азота от 17°C до 97°C.
59. Лед массой 0,2 кг, находящийся при температуре -30°C, превращается в пар. Определить изменение энтропии в этом случае.
60. Железо массой 1 кг при температуре 100°C находится в тепловом контакте с таким же куском железа при 0°C. Чему будет равно изменение энтропии при достижении равновесной температуры 50°C? Считать, что молярная теплоемкость железа 25,14 Дж/К.

## ПРИЛОЖЕНИЕ

### 1. Основные физические постоянные

<i>Физическая постоянная</i>	<i>Обозначение</i>	<i>Числовое значение</i>
Ускорение свободного падения	g	9,81 м/с <sup>2</sup>
Гравитационная постоянная	G	6,67·10 <sup>-11</sup> Н·м <sup>2</sup> /кг <sup>2</sup>
Скорость света в вакууме	c	3·10 <sup>8</sup> м/с
Постоянная Авогадро	N <sub>A</sub>	6,02·10 <sup>23</sup> моль <sup>-1</sup>
Молярная газовая постоянная	R	8,31 Дж/(моль·К)
Постоянная Больцмана	k	1,38·10 <sup>-23</sup> Дж/К
Нормальные условия:		
температура	T <sub>0</sub>	273,15 К
давление	P <sub>0</sub>	101325 Па

### 2. Плотность газов (при нормальных условиях), кг/м<sup>3</sup>

Азот	1,25	Водород	0,09	Гелий	0,18
Аргон	1,78	Воздух	1,29	Кислород	1,43

### 3. Эффективный диаметр молекулы газов d·10<sup>10</sup>, м

Азот	3,1	Воздух	3,0	Гелий	1,9
Аргон	3,6	Водород	2,3	Кислород	2,9
		Углекислый газ	4,0		

### 4. Скорость звука в веществе (при 15°C), м/с

Бериллий	12500
Воздух	340
Вода	1450
Воск	390

## 5. Свойства некоторых жидкостей (при 20°C)

Вещество	Плотность, кг/м <sup>3</sup>	Удельная теплоемкость, Дж/(кг·К)
Вода	1000	4190
Глицерин	1200	2430
Касторовое масло	900	1800
Керосин	800	2140
Ртуть	13600	138
Спирт	790	2510

## 5. Свойства некоторых твердых тел

Вещество	Плотность, кг/м <sup>3</sup>	Температура плавления, °С	Удельная теплоемкость, Дж/(кг·К)	Удельная теплота плавления, кДж/кг
Алюминий	2600	659	896	322
Железо	7900	1530	500	272
Латунь	8400	900	386	-
Лед	900	0	2100	335
Медь	8600	1100	395	176
Серебро	10500	960	234	88
Сталь	7700	1300	460	-
Цинк	7000	420	391	117
Свинец	11300	327	126	22,6

6. Масса  $m_0$  и энергия  $E_0$  покоя некоторых частиц

Частица	$m_0$		$E_0$	
	а.е.м.	кг	МэВ	$10^{10}$ , Дж
Электрон	0,0005486	$9,1 \cdot 10^{-31}$	0,511	0,00082
Протон	1,007277	$1,67 \cdot 10^{-27}$	938,27	1,503
Нейтрон	1,008665	$1,67 \cdot 10^{-27}$	939,56	1,505
$\alpha$ -частица	4,001507	$6,64 \cdot 10^{-27}$	3727,3	5,972

**При разработке методического пособия была использована литература:**

1. Физика: Методические указания и контрольные задания для студентов-заочников инженерно-экономических специальностей вузов/В.Л. Прокофьев, В.Ф. Дмитриева, В.А. Рябов и др.; Под ред. В.Л. Прокофьева. – М.: Высш. шк., 1988. – 111 с.
2. Чертов А.Г., Воробьев А.А. Задачник по физике: учебное пособие. – М.: Высш. шк., 1981. – 496 с.
3. Трофимова Т.И. Сборник задач по курсу физики: Учебное пособие для студентов втузов. - М.: Высш. шк., 1996. – 303 с.
4. Волькенштейн В.С. Сборник задач по общему курсу физики: Учебное пособие. - М.: Наука, 1985. – 384 с.
5. Физика: Задания к практ. занятиям: Учеб. пособие для вузов/ И.И. Рубан, С.М. Жаврид, Н.Е. Великевич, Ж.П. Лагутина; Под общ. ред. Ж.П. Лагутиной. – Мн.: Высш. шк., 1989. – 236 с.
6. Задания для самостоятельной работы по общей физике: Учебное пособие для студентов-заочников всех спец. втузов/ В.В. Харитонов, З.В. Гончарова, З.Д. Егорова, Р.Г. Пинчук. - Мн.: Высш. шк., 1984. – 156 с.