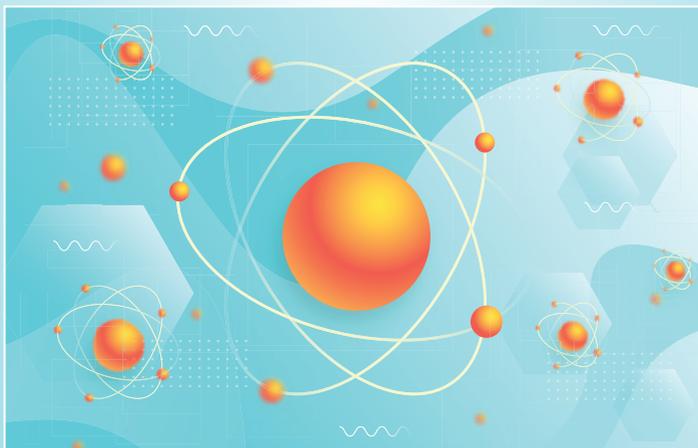


Министерство науки и высшего образования Российской Федерации
Тольяттинский государственный университет

Н.В. Чиркунова, Н.М. Смоленская, С.Н. Потемкина

ОБЩАЯ И ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНАЯ ФИЗИКА. МОЛЕКУЛЯРНАЯ ФИЗИКА И ТЕРМОДИНАМИКА

Практикум



© Чиркунова Н.В., Смоленская Н.М., Потемкина С.Н., 2024

© ФГБОУ ВО «Тольяттинский государственный университет», 2024

ISBN 978-5-8259-1670-5

УДК 53(075.8)

ББК 22.3я73

Рецензенты:

канд. физ.-мат. наук, доцент института перспективных систем
передачи данных Национального исследовательского университета

ИТМО *М.В. Дорогов*;

д-р физ.-мат. наук, доцент, профессор кафедры «Общая
и теоретическая физика» Тольяттинского государственного
университета *И.С. Ясников*.

Чиркунова, Н.В. Общая и экспериментальная физика. Молекулярная физика и термодинамика : практикум / Н.В. Чиркунова, Н.М. Смоленская, С.Н. Потемкина. – Тольятти : Издательство ТГУ, 2024. – 1 оптический диск. – ISBN 978-5-8259-1670-5.

Практикум включает типовые задачи, задания для самостоятельной аудиторной работы, а также вопросы (задания) для самоконтроля по дисциплине «Общая и экспериментальная физика. Молекулярная физика и термодинамика». Материалы практикума направлены на формирование у студентов знаний о физических явлениях, законах и методах расчета физических величин, характеризующих физические явления, а также умений применять физические законы к решению качественных и расчетных задач для формирования навыков самостоятельного научного мышления.

Предназначен для студентов, обучающихся по направлению подготовки бакалавров 44.03.05 «Педагогическое образование», профиль «Математика и физика», очной формы обучения высшего образования.

Текстовое электронное издание.

Рекомендовано к изданию научно-методическим советом Тольяттинского государственного университета.

Минимальные системные требования: IBM PC-совместимый компьютер: Windows XP/Vista/7/8/10; PIII 500 МГц или эквивалент; 128 Мб ОЗУ; SVGA; CD-ROM; Adobe Acrobat Reader; интернет-браузер.

© Чиркунова Н.В., Смоленская Н.М., Потемкина С.Н., 2024

© ФГБОУ ВО «Тольяттинский государственный университет», 2024

Учебное издание

***Чиркунова Наталья Валерьевна
Смоленская Наталья Михайловна
Потемкина Светлана Николаевна***

ОБЩАЯ И ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНАЯ ФИЗИКА.
МОЛЕКУЛЯРНАЯ ФИЗИКА И ТЕРМОДИНАМИКА

Редактор *Е.В. Пилясова*
Технический редактор *Н.П. Крюкова*
Компьютерная верстка: *Л.В. Сызганцева*
Художественное оформление,
компьютерное проектирование: *И.И. Шишкина*

В оформлении пособия использовано изображение
от freepik на сайте ru.freepik.com

Дата подписания к использованию 26.04.2024.

Объем издания 2,8 Мб.

Комплектация издания: компакт-диск, первичная упаковка.

Тираж 50 экз. Заказ № 1-43-23.

Издательство Тольяттинского государственного университета
445020, г. Тольятти, ул. Белорусская, 14,
тел. 8 (8482) 44-91-47, www.tltsu.ru

Содержание

Введение	5
Практическое занятие 1. Молекулярно-кинетическая теория. Уравнение состояния идеального газа. Закон Дальтона	8
Практическое занятие 2. Тепловое движение молекул. Средняя энергия молекул. Статистические распределения	13
Практическое занятие 3. Изопроцессы. Работа идеального газа при изопроцессах. Количество теплоты. Теплоемкость	20
Практическое занятие 4. Испарение, конденсация, кипение. Свойства жидкостей, поверхностное натяжение	28
Практическое занятие 5. Первое начало термодинамики. Адиабатный процесс. Политропный процесс	36
Практическое занятие 6. Круговые процессы. Термический КПД. Цикл Карно	43
Практическое занятие 7. Второе начало термодинамики. Энтропия	50
Практическое занятие 8. Подготовка к итоговому тестированию	55
Рекомендуемая литература	62
Глоссарий	63

ВВЕДЕНИЕ

Предлагаемый практикум по дисциплине «Общая и экспериментальная физика. Молекулярная физика и термодинамика» предназначен для студентов, обучающихся по специальности 44.03.05 «Педагогическое образование», профилю «Математика и физика» и составлен с учетом требований государственных образовательных стандартов по соответствующим направлениям подготовки. В структуре подготовки педагога по профилю «Математика и физика» общая и экспериментальная физика рассматривается нами как важнейшая общеобразовательная дисциплина, на основе которой и будет далее строиться его специализация.

Программа включает панораму универсальных методов, законов и моделей, демонстрирует специфику рационального метода познания окружающего мира, сосредотачивает усилия на формировании у студентов общего физического мировоззрения. В основании современной естественно-научной картины мира лежат физические принципы и концепции. С другой стороны, общая и экспериментальная физика являются базой, без которой невозможна успешная деятельность выпускника вуза по направлению «Педагогическое образование», профилю «Математика и физика». Данная программа отражает современное состояние физики и ее приложений. В ней естественным образом сочетаются макро- и микроскопические подходы. Порядок расположения материала соответствует современной структуре физики как науки и отражает мировой педагогический опыт. Практикум содержит: основные формулы разделов, примеры решения типовых задач, задачи для самостоятельной работы, тестовые задания для подготовки к тестированию.

Цель и задачи изучения дисциплины «Физика» (учебного курса)

Цель: создание основ достаточно широкой теоретической подготовки в области физики, позволяющей будущим выпускникам ориентироваться в потоке научной и технической информации и обеспечивающей им возможность использования физических принципов в тех отраслях техники, в которых они будут специализироваться.

Задачи:

– усвоение основных физических явлений и законов раздела «Молекулярная физика и термодинамика» и умение применять математический аппарат при решении физических задач;

– выработка способности применять соответствующий физико-математический аппарат, методы анализа и моделирования, теоретического и экспериментального исследования при решении профессиональных задач;

– обучение самостоятельной работе с учебной литературой.

Планируемые результаты обучения по дисциплине (учебному курсу)

После прохождения курса студент должен:

- *знать*: фундаментальные законы природы и основные физические законы в области механики, молекулярно-кинетической теории и термодинамики;

- *уметь*: применять физические методы и законы для решения физических задач;

- *владеть*: основными методами решения конкретных физических задач из разных областей физики; навыками практического применения законов физики.

Пособие посвящено молекулярной физике и термодинамике и включает семь тематических занятий и одно тестовое. В каждом тематическом разделе занятий имеются три части:

- 1) основные понятия, законы и формулы, где приводятся формулировки основных физических законов и формулы, необходимые для решения задач по данному тематическому разделу;
- 2) методические рекомендации по решению задач, где подробно разобраны типичные задачи, характерные для данного тематического раздела, в зависимости от сложности и объема изучаемого материала;
- 3) задачи для самостоятельной работы.

Формой контроля знаний студентов по курсу является зачет.

Критерии оценки

Традиционная шкала балльно-рейтинговой системы, действующей в ТГУ:

1. Оценке «зачтено» соответствует сумма баллов, равная 55–100.
2. Оценке «не зачтено» соответствует сумма баллов, равная 0–54.

Общие методические рекомендации

Цель пособия – развить у студентов курса навыки и способности, требующие понимания основ физического метода мышления. Одним из основных способов успешного изучения физики является систематическое решение физических задач. Таким образом закрепляются в памяти основные физические законы, отрабатываются навыки применения теоретических знаний на практике, а также формируется понимание физического смысла явлений. Для того чтобы правильно решить задачу по физике, необходимо придерживаться определенного порядка действий:

- 1) проанализировать условие задачи и записать кратко все значения заданных физических величин. Обозначить искомые величины;
- 2) представить данные задачи в международной системе единиц (СИ);
- 3) пояснить задачу с помощью схемы или рисунка в соответствии с представленными в условиях задачи данными;
- 4) записать уравнение или систему уравнений, отображающих происходящий физический процесс в общем виде;
- 5) решить задачу в общем виде. То есть необходимо найти искомую величину, выразив ее с помощью уравнений связи с другими величинами, заданными в условии;
- 6) проверить размерности полученных выражений (единицы измерения) для искомых величин;
- 7) произвести вычисления;
- 8) записать ответ в численном виде с учетом единицы измерения, при необходимости использовать буквенные обозначения М (мега), н (нано), мк (микро) и т. д.;
- 9) оценить соответствие результата условию задачи.

Практическое занятие 1

Молекулярно-кинетическая теория. Уравнение состояния идеального газа. Закон Дальтона

Основные формулы

Количество вещества	$\nu = N / N_A = m / \mu$
Молярная масса вещества	$\mu = m / n = m \cdot N_A / N$
Уравнение состояния идеальных газов (уравнение Менделеева – Клапейрона)	$pV = \frac{m}{\mu} RT,$ $pV = \nu RT$
Объединенный газовый закон	$\frac{pV}{T} = \text{const}$
Зависимость давления газа от концентрации молекул и температуры	$p = nkT$
Закон Дальтона	$p = \sum_{i=1}^n p_i$
Соотношение между термодинамическими константами	$R = kN_A,$ где $N_A = 6,02 \cdot 10^{23}$ моль ⁻¹ ; $k = 1,38 \cdot 10^{-23}$ Дж/К
Концентрация частиц (молекул, атомов и т. п.) однородной системы	$n = N / V,$ где V – объем системы

Методические указания

При изучении физики требуется закрепить пройденный материал посредством решения задач. Уровень задач может быть разным. Задачи бывают простые и более сложные, для решения которых надо не просто понимать материал, но уверенно владеть математическим аппаратом, уметь выделять в физическом явлении существенные составляющие, а несущественные упрощать или отбрасывать.

Простыми можно назвать задачи, в которых достаточно подстановки данных в соответствующую явлению формулу. Для решения более сложных задач понадобятся дополнительные умения, например умение определять молярную массу по таблице Менделеева. При переходе газа из одного состояния в другое (при условии сохранения массы) можно записать обобщенный газовый закон

$$\frac{P_1 V_1}{T_1} = \frac{P_2 V_2}{T_2}$$

и найти неизвестный параметр. Если масса газа не остается постоянной, то необходимо записать уравнение Менделеева – Клапейрона для начального и конечного состояний и решать полученную систему относительно искомой величины.

В случае когда газ разделен подвижной перегородкой (перемещающейся без трения), остановка перегородки означает, что давление газа с обеих сторон одинаково и можно считать, что газ по обе стороны перегородки находится в состоянии равновесия. В этом случае для каждой части газа можно записать объединенный газовый закон, связывающий начальные и конечные параметры.

Примеры решения задач

Пример 1.1. Найти молярную массу μ смеси 21 % (по массе) кислорода и 79 % азота.

Дано:

$$m_{\mu}(O_2) = 21 \%$$

$$m_{\mu}(N_2) = 79 \%$$

$$m_{\mu} - ?$$

Решение

Количество вещества в смеси газов равно сумме количества вещества каждого из компонентов: $\nu = \nu_{O_2} + \nu_{N_2}$, то есть

$$\nu = \frac{m_{O_2}}{m_{\mu O_2}} + \frac{m_{N_2}}{m_{\mu N_2}}.$$

Молярная масса μ смеси есть отношение массы m_{μ} смеси к количеству вещества ν :

$$m_{\mu} = \frac{m}{\frac{m_{O_2}}{m_{\mu O_2}} + \frac{m_{N_2}}{m_{\mu N_2}}} = \frac{1}{\frac{\omega_{O_2}}{m_{\mu O_2}} + \frac{\omega_{N_2}}{m_{\mu N_2}}}.$$

Здесь $\omega_{O_2} = \frac{m_{O_2}}{m} = 0,21$ – массовая доля кислорода,

а $\omega_{N_2} = \frac{m_{N_2}}{m} = 0,79$ – массовая доля азота (данные в условии задачи).

Молярные массы кислорода и азота находим с помощью таблицы Менделеева:

$$m_{\mu O_2} = 32 \cdot 10^{-3} \text{ кг/моль}, \quad m_{\mu N_2} = 28 \cdot 10^{-3} \text{ кг/моль}.$$

Подставляя указанные данные, получаем:

$$m_{\mu} = \frac{1}{\frac{0,21}{0,032} + \frac{0,79}{0,028}} = 28,7 \cdot 10^{-3} \text{ (кг/моль)}.$$

Данная смесь газов близка по составу к обычному воздуху.

Ответ: $m_{\mu} = 28,7 \cdot 10^{-3}$ кг/моль [4, с. 353].

Пример 1.2. Идеальный газ находится в баллоне при температуре 27°C и давлении $3 \cdot 10^6$ Па. Как изменится температура, если выпустить из баллона $0,3$ массы газа? Давление при этом понизится до $2 \cdot 10^6$ Па.

<i>Дано:</i>	<i>Решение</i>
$T_1 = 27^{\circ}\text{C} = 300 \text{ K}$	Рассмотрим два состояния идеального газа.
$p_1 = 3 \cdot 10^6 \text{ Па}$	В первом состоянии газ имеет массу m
$p_2 = 2 \cdot 10^6 \text{ Па}$	и характеризуется параметрами p_1 , V и T_1 .
$k = 0,3$	Во втором состоянии газ имеет массу $(1 - k)m$
$T_2 = ?$	и характеризуется параметрами p_2 , V и T_2 .

Параметры каждого из этих состояний связаны уравнением Менделеева – Клапейрона:

$$p_1 V = (m/\mu)RT_1; \quad (1)$$

$$p_2 V = ((1 - k)m/\mu)RT_2. \quad (2)$$

Разделив уравнение (1) на уравнение (2), получим:

$$p_1/p_2 = T_1/(1 - k)T_2.$$

Следовательно:

$$T_2 = p_2 T_1 / (1 - k)p_1;$$

$$T_2 = \frac{2 \cdot 10^6 \cdot 300}{(1 - 0,3) \cdot 3 \cdot 10^6} = 286 \text{ (K)}.$$

Ответ: $T_2 = 286 \text{ K}$.

Задания для аудиторной самостоятельной работы

1.1. Сколько молекул вы вдыхаете, если при одном вдохе вы получаете $1,0$ л воздуха?

1.2. В сосуде вместимостью $V = 5$ л находится однородный газ с количеством вещества $\nu = 0,2$ моль. Определить, какой это газ, если его плотность $\rho = 1,12$ кг/м³.

1.3. В пресное озеро площадью $S = 1 \text{ км}^2$ и средней глубиной $h = 9 \text{ м}$ бросили кристаллик поваренной соли массой 1 мг . Когда соль полностью растворится и ионы натрия и хлора равномерно размещаются по объему озера, сколько ионов натрия попадет в стакан взятой из озера воды? Объем воды в стакане $V = 180 \text{ мл}$.

1.4. В баллоне находится азот массой 4 г при 300 К . Определите среднюю энергию поступательного движения молекул, находящихся в баллоне.

1.5. Чему равна плотность смеси кислорода и углекислого газа, если масса кислорода $m_1 = 50 \text{ г}$, масса углекислого газа $m_2 = 80 \text{ г}$? Смесь газов находится при температуре $t = 7 \text{ }^\circ\text{C}$ и под давлением $p = 0,5 \text{ МПа}$. Газы считать идеальными.

1.6. Резиновую лодку надули до давления $p_1 = 10^6 \text{ кПа}$ при температуре $t_1 = 10 \text{ }^\circ\text{C}$. Лодка может выдержать давление надутого в нее воздуха не более $p_{\text{max}} = 112 \text{ кПа}$. Если температура повысится до $t_2 = 33 \text{ }^\circ\text{C}$, может ли лопнуть лодка? Увеличение объема лодки не превышает 5% . Газ считать идеальным.

1.7. Определить число молекул идеального газа в единице объема при нормальных условиях.

1.8. Азот массой 5 г , находящийся в закрытом сосуде объемом 4 л при температуре $200 \text{ }^\circ\text{C}$, нагревают до температуры $400 \text{ }^\circ\text{C}$. Найти давление газа до и после нагревания.

1.9. В баллоне объемом $V = 5 \text{ л}$ находится смесь кислорода и водорода под давлением $p = 5 \cdot 10^5 \text{ Па}$ и при температуре $t = 27 \text{ }^\circ\text{C}$. Масса кислорода втрое больше массы водорода ($m_1 = 3m_2$). Определите число молекул N_1 кислорода и число молекул N_2 водорода в этом баллоне. Газы считать идеальными.

1.10. Цилиндрический сосуд, расположенный горизонтально, заполнен газом при температуре $t_0 = 27 \text{ }^\circ\text{C}$ и давлении $p_0 = 0,1 \text{ МПа}$, разделен на две равные части подвижной перегородкой. Определите давление газа в цилиндре, если в левой половине газ нагреть до температуры $t_1 = 57 \text{ }^\circ\text{C}$, а в правой температуру газа оставить без изменения.

Вопросы для самоконтроля

1. Что изучает молекулярная физика?
2. Расскажите о количестве вещества по следующему плану:
 1. Что характеризует данная величина?
 2. Каково определение количества вещества?
 3. Какова формула для расчета количества вещества? Какие величины оно связывает?
 4. В каких единицах выражается эта величина?
3. Расскажите о молярной массе по следующему плану:
 1. Что характеризует данная величина?
 2. Каково определение молярной массы?
 3. Какова формула расчета молярной массы? Какие величины она связывает?
 4. В каких единицах выражается эта величина?
4. Расскажите о давлении газа по следующему плану:
 1. Что характеризует данная величина?
 2. Какова формула для ее расчета?
 3. В каких единицах выражается данная величина?
 4. Как можно измерить давление?
 5. Можно ли говорить о давлении, оказываемом одной молекулой на стенки сосуда?
5. Рассчитайте массу молекулы кислорода.
6. Рассчитайте число молекул, содержащихся в 1 г гелия.
7. Запишите уравнение состояния идеального газа. Дайте характеристику всем физическим величинам, входящим в уравнение.
8. Сформулируйте закон Дальтона. При каких условиях работает этот закон?
9. Основные признаки (свойства), которыми наделяется идеальный газ.
10. Условия применимости понятия «идеальный газ».

Практическое занятие 2

Тепловое движение молекул. Средняя энергия молекул. Статистические распределения

Основные формулы

Основное уравнение кинетической теории газов	$p = \frac{2}{3}n \langle \varepsilon \rangle,$ <p>где p – давление газа; $\langle \varepsilon \rangle$ – средняя кинетическая энергия поступательного движения молекул</p>
Средняя кинетическая энергия, приходящаяся на одну степень свободы молекулы	$\langle \varepsilon_1 \rangle = kT/2$
Средняя кинетическая энергия, приходящаяся на все степени свободы молекулы (полная энергия молекулы)	$\langle \varepsilon \rangle = \frac{i}{2} kT$
Средняя кинетическая энергия поступательного движения молекулы	$\langle \varepsilon \rangle = \frac{3}{2} kT$
Средняя кинетическая энергия вращательного движения молекулы	$\varepsilon_{вр} = \frac{i - 3}{2} kT$
Средняя квадратичная скорость молекул	$\langle v_{кв} \rangle = \sqrt{3RT/\mu}$ <p>или</p> $\langle v_{кв} \rangle = \sqrt{3kT/m_1},$ <p>где m_1 – масса одной молекулы</p>
Средняя арифметическая скорость молекул	$\langle v \rangle = \sqrt{8RT/\pi\mu}$ <p>или</p> $\langle v \rangle = \sqrt{8kT/\pi m_1},$ <p>где m_1 – масса одной молекулы</p>
Наиболее вероятная скорость молекул	$\langle v_в \rangle = \sqrt{2kT/m_1}$ <p>или</p> $\langle v_в \rangle = \sqrt{2RT/\mu}$

Барометрическая формула (распределение давления в однородном поле силы тяжести)	$p_h = p_0 e^{-mgh/kT}$ или $p_h = p_0 e^{-\mu gh/RT}$
Распределение Больцмана (распределение частиц в силовом поле)	$n_h = n_0 e^{-mgh/kT},$ где n_h – концентрация частиц; n_0 – кон- центрация частиц в точках поля при $mgh = 0$; e – основание натурального логарифма; mgh – потенциальная энер- гия частиц; k – постоянная Больцмана; T – термодинамическая температура
Распределение Максвелла (распределение молекул по скоростям)	$dN(v) = N f(v) dv$ или $dN(v) = \frac{4}{\sqrt{\pi}} N \left(\frac{m}{2kT} \right)^{3/2} e^{-mv^2/2kT} v^2 dv,$ где N – общее число молекул; $f(v)$ – функция распределения молекул по мо- дулям скоростей; m – масса молекулы

Методические указания

Основное утверждение молекулярно-кинетической теории: все вещества состоят из молекул и атомов, которые взаимодействуют друг с другом и находятся в непрерывном хаотическом движении.

Учитывая дискретный характер строения вещества, одним из естественных способов задания количества вещества является указание числа составляющих его структурных элементов (частиц). При этом в качестве единицы такого измерения количества вещества используется моль. Число атомов, содержащихся в 12 граммах изотопа углерода ^{12}C , называют числом Авогадро N_A , оно примерно равно $6,02 \cdot 10^{23}$ моль $^{-1}$.

Тепловое движение атомов и молекул является хаотическим. Однако в этой хаотичности наблюдаются важные закономерности:

– во-первых, движение атомов и молекул имеет различный характер в твердых телах, жидкостях и газах. В твердых (кристаллических) телах атомы хаотично колеблются относительно положений равновесия, сами же положения равновесия образуют упорядоченную структуру. В жидкостях, наряду с хаотичными колебаниями относительно положения равновесия, молекулы время от времени

случайным образом перескакивают из одного положения в другое. В результате данная молекула может оказаться в любом месте объема, занимаемого жидкостью, а сама жидкость принимает форму сосуда. В газах молекулы хаотически двигаются по всему сосуду, в котором находится газ, сталкиваясь друг с другом и со стенками;

– во-вторых, существуют закономерности в распределении молекул по скоростям, которые не зависят от агрегатного состояния вещества. В частности, в любой атомно-молекулярной системе, содержащей достаточно большое количество частиц (сравнимое с числом Авогадро), всегда существуют частицы, которые в данный момент времени двигаются с малыми, средними и большими скоростями. При этом средний модуль скорости всех частиц увеличивается с ростом температуры системы.

Числом степеней свободы i механической системы называется число независимых возможных движений этой системы. Для одноатомной молекулы $i = 3$, для двухатомной – $i = 5$, для молекулы из трех и более атомов $i = 6$ (если только атомы не расположены на одной прямой). Приведенные значения числа степеней свободы соответствуют возможности поступательного движения по трем осям и вращения молекулы как целого вокруг осей, проходящих через центр масс. При этом составляющие молекулу атомы формально считаются материальными точками.

Примеры решения задач

Пример 2.1. Определить среднюю кинетическую энергию вращательного движения одной молекулы кислорода при температуре $T = 286$ К, а также кинетическую энергию вращательного движения всех молекул этого газа, если его масса $m = 4$ г.

Дано:

$$\mu = 0,032 \text{ кг/моль}$$

$$T = 286 \text{ К}$$

$$m = 4 \text{ г} = 4 \cdot 10^{-3} \text{ кг}$$

$$N_A = 6,02 \cdot 10^{23} \text{ моль}^{-1}$$

$$\langle \varepsilon_{\text{вр}} \rangle = ?$$

$$\varepsilon_{\text{вр}} = ?$$

Решение

Известно, что на каждую степень свободы молекул газа приходится одинаковая средняя энергия $kT/2$. Так как молекула кислорода является двухатомной, а следовательно, обладает двумя вращательными степенями свободы,

то средняя кинетическая энергия вращательного движения молекулы кислорода

$$\langle \varepsilon_{\text{вр}} \rangle = 2 \frac{1}{2} kT = kT.$$

Подставив в эту формулу значения k и T , получим:

$$\langle \varepsilon_{\text{вр}} \rangle = 1,38 \cdot 10^{-23} \cdot 286 = 3,95 \cdot 10^{-21} \text{ (Дж)}.$$

Средняя кинетическая энергия вращательного движения всех молекул газа выражается соотношением

$$\varepsilon_{\text{вр}} = N \langle \varepsilon_{\text{вр}} \rangle,$$

где число молекул газа

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

В результате находим:

$$\varepsilon_{\text{вр}} = N_A \frac{m}{\mu} \langle \varepsilon_{\text{вр}} \rangle;$$

$$\varepsilon_{\text{вр}} = 6,02 \cdot 10^{23} \cdot \frac{4 \cdot 10^{-3}}{32 \cdot 10^{-3}} \cdot 3,95 \cdot 10^{-21} = 297 \text{ (Дж)}.$$

Ответ: $\langle \varepsilon_{\text{вр}} \rangle = 3,95 \cdot 10^{-21}$ Дж, $\varepsilon_{\text{вр}} = 297$ Дж.

Пример 2.2. В большой сосуд с водой был опрокинут цилиндрический сосуд (см. рис.). Уровни воды внутри и вне цилиндрического сосуда находятся на одинаковой высоте. Расстояние l от уровня воды до дна опрокинутого сосуда равно 40 см. На какую высоту поднимается вода в цилиндрическом сосуде при понижении температуры от $T_1 = 310$ К до $T_2 = 273$ К? Атмосферное давление нормальное.

Дано:

$$l = 40 \text{ см} = 0,4 \text{ м}$$

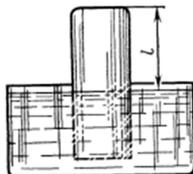
$$T_1 = 310 \text{ К}$$

$$T_2 = 273 \text{ К}$$

$$\Delta h - ?$$

Решение

Условия задачи представлены на рисунке:



Давление воздуха p_1 в цилиндрическом сосуде до понижения температуры уравнивается атмосферным давлением p_0 :

$$p_1 = p_0. \tag{1}$$

После понижения температуры атмосферное давление уравнивается суммой двух давлений: p_2 воздуха в сосуде и Δp , создаваемого столбом воды высотой Δh :

$$p_0 = p_2 + \Delta p = p_2 + \rho g \Delta h. \quad (2)$$

Приравняв правые части формул (1) и (2) и выразив p_2 , найдем

$$p_2 = p_1 - \rho g \Delta h. \quad (3)$$

Давление, объем и температура воздуха в цилиндре связаны с уравнением газового состояния:

$$\frac{p_1 V_1}{T_1} = \frac{p_2 V_2}{T_2} \quad \text{или} \quad \frac{p_1 S h_1}{T_1} = \frac{p_2 S h_2}{T_2}.$$

Сократив на S , получим:

$$\frac{p_1 h_1}{T_1} = \frac{p_2 h_2}{T_2}.$$

Подставив сюда выражение p_2 по формуле (3), а также учитывая, что $h_2 = h_1 - \Delta h$ и $h_1 = l$, после преобразования получим:

$$\Delta h^2 - \left(h_1 + \frac{p_1}{\rho g} \right) \Delta h + \frac{p_1 h_1}{\rho g} \left(1 - \frac{T_2}{T_1} \right) = 0.$$

Решив это квадратное уравнение и отбросив второе значение Δh , не имеющее физического смысла, найдем, на какую высоту поднимается вода в цилиндрическом сосуде.

Ответ: $\Delta h = 4,5 \cdot 10^{-2}$ м.

Задания для аудиторной самостоятельной работы

2.1. Пассажирский самолет совершает полеты на высоте 8300 м. Чтобы не снабжать пассажиров кислородными масками, в кабинах при помощи компрессора поддерживается постоянное давление, соответствующее высоте 2700 м. Найти разность давлений внутри и снаружи кабины. Среднюю температуру наружного воздуха считать равной 0 °С.

2.2. При какой температуре T средняя квадратичная скорость атомов гелия станет равной 11,2 км/с?

2.3. Определить среднюю арифметическую скорость молекул газа, если их средняя квадратичная скорость равна 1 км/с.

2.4. Определить наиболее вероятную скорость молекул водорода при температуре $T = 400$ К.

2.5. На какой высоте давление воздуха составляет 75 % от давления на уровне моря? Температуру считать постоянной и равной 0°C .

2.6. При какой температуре средняя квадратичная скорость молекул азота больше их наиболее вероятной скорости на 50 м/с?

2.7. Плотность некоторого газа равна $6 \cdot 10^{-2}$ кг/м³, средняя квадратичная скорость молекул этого газа равна 500 м/с. Найти давление, которое газ оказывает на стенки сосуда.

2.8. В сосуде объемом 2 л находится 10 г кислорода под давлением 680 мм рт. ст. Найти: 1) среднюю квадратичную скорость молекул газа; 2) число молекул, находящихся в сосуде; 3) плотность газа.

2.9. У поверхности Земли давление $p_{(0)} = 10^5$ Па, температура $t = 0^\circ\text{C}$. Найти массу воздуха в 1 м³ у поверхности Земли и на высоте $h = 5$ км, считая атмосферу изотермической. Молярная масса воздуха $\mu = 29$ г/моль.

2.10. Определить плотность ρ смеси $m_1 = 4$ г водорода и $m_2 = 32$ г кислорода при температуре $t = 7^\circ\text{C}$ и давлении $p_0 = 1$ атм.

Вопросы для самоконтроля

1. Дайте определение вероятности получения некоторого результата измерения.
2. Дайте определение элементарной вероятности при измерении величины скорости.
3. Что такое функция распределения? Как связаны функции распределения величины и проекции скорости?
4. Каковы особенности графика функции распределения величины скорости молекул идеального газа?
5. Напишите формулу для вычисления среднего значения скорости молекул, средней квадратичной скорости молекул, наиболее вероятной скорости молекул.

6. Запишите распределение Максвелла (распределение молекул по скоростям). Сравните его с распределением Больцмана. Сделайте выводы.
7. Что подтверждает явление диффузии? Где используется диффузия на практике (для газов, жидкостей и твердых тел)?
8. В чем причина броуновского движения? Внешние признаки броуновского движения. Условия, при которых протекает это явление.
9. Поясните сходство и различие между броуновским движением и диффузией.
10. Приведите пример проявления броуновского движения на практике.

Практическое занятие 3
Изопроцессы. Работа идеального газа при изопроцессах.
Количество теплоты. Теплоемкость

Основные формулы

Работа газа при изменении объема	$A = \int_{V_1}^{V_2} p dV$
Работа газа в изотермическом процессе	$A = \frac{m}{\mu} RT \ln \frac{V_2}{V_1} = \frac{m}{\mu} RT \ln \frac{p_1}{p_2}$
Работа газа в адиабатном процессе	$A = \frac{m}{\mu} C_V (T_1 - T_2)$ <p style="text-align: center;">или</p> $A = \frac{RT_1}{\gamma - 1} \frac{m}{\mu} \left[1 - \left(\frac{V_1}{V_2} \right)^{\gamma - 1} \right]$
Внутренняя энергия идеального газа	$U = \frac{i}{2} \nu RT$
Уравнение состояния идеальных газов (уравнение Менделеева – Клапейрона)	$pV = \frac{m}{\mu} RT \quad \text{или} \quad pV = \nu RT$
Изотермический процесс, закон Бойля – Мариотта	$m, T = \text{const},$ $pV = \text{const}$
Изобарический процесс, закон Гей-Люссака	$m, p = \text{const},$ $\frac{V}{T} = \text{const},$ $V = \alpha T$
Изохорический процесс, закон Шарля	$m, V = \text{const},$ $\frac{p}{T} = \text{const},$ $p = \beta T$
Связь между молярной (C_μ) и удельной (c) теплоемкостями газа	$C_\mu = c\mu,$ <p>где μ – молярная масса газа</p>

Уравнение Майера	$C_p - C_v = R$
Удельные теплоемкости при постоянном объеме и постоянном давлении	$c_v = \frac{i R}{2 \mu}$ $c_p = \frac{(i + 2) R}{2 \mu}$
Показатель адиабаты	$\gamma = \frac{C_p}{C_v}$ или $\gamma = \frac{i + 2}{i}$

Методические указания

При решении задач в этом разделе необходимо придерживаться следующего порядка действий:

1. Установить все тела, входящие в термодинамическую систему.
2. Определить при взаимодействии двух тел: 1) у какого из двух взаимодействующих тел изменяется внутренняя энергия; 2) за счет чего изменяется внутренняя энергия (работа, совершаемая самим телом, или работа, совершенная над телом).
3. Записать первый закон термодинамики (составить уравнение теплового баланса).
4. Если не все величины известны, дополнить систему уравнениями связи и решить ее относительно искомой величины в общем виде.
5. Проверить единицы измерения.
6. Перевести заданные в задаче величины в систему единиц измерения СИ. Значение молярной массы μ определяется из таблицы «Периодическая система элементов Д.И. Менделеева» с учетом степеней свободы исследуемой молекулы. Например, для двухатомного газа кислорода $O_2 \mu = 32 \text{ г/моль}$.
7. При определении КПД цикла учитывайте, что коэффициент полезного действия для цикла Карно равен максимальному коэффициенту полезного действия теплового двигателя.

Примеры решения задач

Пример 3.1. 10 г кислорода находятся под давлением 300 кПа при температуре 10 °С. После нагревания при $p = \text{const}$ газ занял объем 10 л. Найдите количество теплоты Q , полученное газом, изменение внутренней энергии газа ΔU и работу A , совершенную газом при расширении.

Дано:

$$m = 10 \text{ г} = 10^{-2} \text{ кг}$$

$$p = 3 \cdot 10^5 \text{ Па}$$

$$C_p = 29,1 \text{ Дж}/(\text{моль} \cdot \text{К})$$

$$T_1 = 10 \text{ °С} = 283 \text{ К}$$

$$V_2 = 10 \text{ л} = 10^{-2} \text{ м}^3$$

$$\mu = 0,032 \text{ кг}/\text{моль}$$

$$Q - ?$$

$$\Delta U - ?$$

$$A - ?$$

Решение

Количество теплоты, полученное газом, определяется следующим соотношением:

$$Q = \frac{m}{\mu} C_p \Delta T. \quad (1)$$

Молярная теплоемкость кислорода при $p = \text{const}$ равна $C_p = 29,1 \text{ Дж}/(\text{моль} \cdot \text{К})$.

Запишем уравнение состояния газа до и после нагревания:

$$pV_1 = \frac{m}{\mu} RT_1, \quad (2)$$

$$pV_2 = \frac{m}{\mu} RT_2. \quad (3)$$

Вычитая из (3) уравнение (2), получим:

$$p(V_2 - V_1) = \frac{m}{\mu} R \Delta T. \quad (4)$$

Из (2) выразим:

$$V_1 = \frac{mRT_1}{\mu p}. \quad (5)$$

Из (4) для ΔT с учетом (5):

$$\Delta T = \frac{\mu p \left(V_2 - \frac{mRT_1}{\mu p} \right)}{mR} = \frac{\mu p V_2 - mRT_1}{mR}. \quad (6)$$

Тогда уравнение (1) можно записать в виде:

$$Q = \frac{1}{\mu} C_p \frac{(\mu p V_2 - mRT_1)}{R}.$$

Изменение внутренней энергии кислорода:

$$\Delta U = \frac{i}{2} \frac{m}{\mu} R \Delta T$$

или, подставляя (6):
$$\Delta U = \frac{5}{2} \frac{1}{\mu} (\mu p V_2 - m R T_1).$$

Работа, совершаемая при изменении объема газа:

$$A = p \int_{V_1}^{V_2} dV = p(V_2 - V_1)$$

или с учетом (5):

$$A = p \left(V_2 - \frac{m R T_1}{\mu p} \right).$$

Произведя вычисления, получим искомые в задаче величины:

$$Q = 29,1 \cdot \frac{(0,032 \cdot 3 \cdot 10^5 \cdot 10^{-2} - 10^{-2} \cdot 8,31 \cdot 283)}{0,032 \cdot 8,31} = 7,92 \cdot 10^3 \text{ (Дж)};$$

$$\Delta U = \frac{5}{2} \cdot \frac{1}{0,032} (0,032 \cdot 3 \cdot 10^5 \cdot 10^{-2} - 10^{-2} \cdot 8,31 \cdot 283) = 5,66 \cdot 10^3 \text{ (Дж)};$$

$$A = 3 \cdot 10^5 \left(10^{-2} - \frac{10^{-2} \cdot 8,31 \cdot 283}{0,032 \cdot 3 \cdot 10^5} \right) = 2,26 \cdot 10^3 \text{ (Дж)}.$$

Ответ: $Q = 7,92$ кДж, $\Delta U = 5,66$ кДж, $A = 2,26$ кДж.

Пример 3.2. Кислород занимает объем 1 м^3 и находится под давлением 200 кПа . Газ нагрели сначала при постоянном давлении до объема 3 м^3 , а затем при постоянном объеме — до давления 500 кПа . Постройте график процесса и найдите: 1) изменение внутренней энергии газа ΔU ; 2) совершенную газом работу A .

Дано:

$$V_1 = 1 \text{ м}^3$$

$$p_1 = 200 \text{ кПа} = 2 \cdot 10^5 \text{ Па}$$

$$V_2 = 3 \text{ м}^3$$

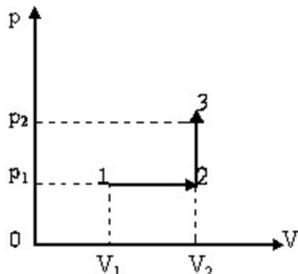
$$p_2 = 500 \text{ кПа} = 5 \cdot 10^5 \text{ Па}$$

$$\Delta U - ?$$

$$A - ?$$

Решение

Построим график процесса:



На графике точками 1, 2, 3 обозначены состояния газа, характеризующиеся параметрами (p_1, V_1, T_1) , (p_1, V_2, T_2) , (p_2, V_2, T_3) .

1. Изменение внутренней энергии газа при переходе его из состояния 1 в состояние 3 равно:

$$\Delta U = c_V m \Delta T,$$

где c_V — удельная теплоемкость газа при постоянном объеме; m — масса газа; ΔT — разность температур, соответствующих конечному 3 и начальному 1 состояниям.

То есть

$$\Delta T = T_3 - T_1.$$

Так как

$$c_V = \frac{i R}{2 \mu},$$

где μ — молярная масса газа, то

$$\Delta U = \frac{i m}{2 \mu} R (T_3 - T_1). \quad (1)$$

Температуры T_1 и T_3 выразим из уравнения Менделеева — Клапейрона:

$$pV = \frac{m}{\mu} RT;$$

$$T_1 = \frac{\mu p_1 V_1}{mR};$$

$$T_3 = \frac{\mu p_2 V_2}{mR}.$$

С учетом этого (1) перепишем в виде:

$$\Delta U = \frac{5}{2} (p_2 V_2 - p_1 V_1). \quad (2)$$

2. Полная работа, совершаемая газом:

$$A = A_1 + A_2,$$

где A_1 — работа на участке 1–2; A_2 — работа на участке 2–3.

На участке 1–2 давление постоянно ($p = \text{const}$).

Работа в этом случае:

$$A_1 = p_1 \Delta V = p_1 (V_2 - V_1).$$

На участке 2–3 объем газа не изменяется и, следовательно, работа газа на этом участке равна нулю ($A_2 = 0$). Таким образом:

$$A = A_1 = p_1 (V_2 - V_1). \quad (3)$$

Произведем вычисления по формулам (2), (3):

$$\Delta U = \frac{5}{2}(5 \cdot 10^5 \cdot 3 - 2 \cdot 10^5 \cdot 1) = 32,5 \cdot 10^5 \text{ (Дж);}$$

$$A = 2 \cdot 10^5 \cdot (3 - 1) = 4 \cdot 10^5 \text{ (Дж).}$$

Ответ: $\Delta U = 3,25$ МДж, $A = 0,4$ МДж [6, с. 171–172].

Задания для аудиторной самостоятельной работы

3.1. Азот массой $m = 5$ кг, нагретый на $\Delta T = 150$ К, сохранил неизменный объем V . Найти: 1) количество теплоты Q , сообщенное газу; 2) изменение внутренней энергии ΔU ; 3) совершенную газом работу A .

3.2. Какое количество тепла необходимо сообщить азоту при его изобарическом нагревании, чтобы газ совершил работу $A = 2,0$ Дж?

3.3. Показать, что внутренняя энергия воздуха в комнате не зависит от температуры, если наружное давление $p = \text{const}$. Вычислить U , если $p = 10^5$ Па, $V = 40$ м³.

3.4. Водород занимает объем $V_1 = 10$ м³ при давлении $p_1 = 10^5$ Па. Газ нагрели при постоянном объеме до давления $p_2 = 300$ кПа. Определить: 1) изменение внутренней энергии ΔU ; 2) работу A , совершаемую газом; 3) количество теплоты Q , сообщенное газу.

3.5. Газообразный водород, находившийся при нормальных условиях в закрытом сосуде объемом $V = 5,0$ л, охладили на $T = 55$ К. Найти приращение внутренней энергии газа и количество отданного им тепла.

3.6. Кислород массой 32 г находится в закрытом сосуде под давлением 0,1 МПа при температуре $T = 290$ К. После нагревания давление в сосуде повысилось в 4 раза. Определить: 1) объем сосуда; 2) температуру, до которой нагрели газ; 3) количество теплоты, сообщенное газу.

3.7. Два моля идеального газа при температуре $T_0 = 300$ К охладил изохорически, вследствие чего его давление уменьшилось в $n = 2$ раза. Затем газ изобарически расширили так, что в конечном состоянии его температура стала равна первоначальной. Найти количество теплоты, поглощенной газом в данном процессе.

3.8. Какая работа совершается при изотермическом расширении водорода: а) массой $m = 5$ г, взятого при температуре $T = 290$ К; б) $m = 1$ г при $T = 280$ К, если объем газа увеличился в $n = 3$ раза?

3.9. При изотермическом расширении 1 моля кислорода, имевшего температуру $T = 300$ К, газу было передано $Q = 2$ кДж теплоты. Во сколько раз увеличился объем газа?

3.10. Вычислить удельные теплоемкости c_v и c_p смеси газов, состоящей из $m_1 = 9$ г водяного пара (H_2O) и $m_2 = 16$ г кислорода (O_2) при температуре 300 К.

3.11. В ходе процесса $pV^{3/2} = \text{const}$ азот, занимавший при давлении $p_1 = 2 \cdot 10^5$ Па объем $V = 6$ л, расширяется до объема вдвое большего. Найти изменение внутренней энергии газа ΔU , работу A , совершенную газом при расширении, и количество теплоты Q , которым газ обменивается с окружающей средой. Колебательные степени свободы атомов в молекулах азота не возбуждены.

Вопросы для самоконтроля

1. Каков физический смысл универсальной газовой постоянной?
2. Какие процессы называются изопроцессами? Перечислите их.
3. Что определяет площадь под кривой изотермы?
4. Из каких компонентов состоит внутренняя энергия вещества?
5. Какие величины фигурируют в записи первого начала термодинамики?
6. Дайте определение теплоемкости, удельной теплоемкости, молярной теплоемкости.
7. Запишите, чему равна работа идеального газа при следующих изопроцессах:
 - 1) изобарном,
 - 2) изохорном,
 - 3) изотермическом,
 - 4) адиабатном.
8. Дайте определение количества теплоты. В чем измеряется данная величина?

9. Как удельная теплоемкость вещества зависит от массы тела? напишите удельные теплоемкости при постоянном объеме и постоянном давлении.
10. Что характеризует коэффициент Пуассона? Каково число степеней свободы молекул? Как связаны эти величины?

Практическое занятие 4

Испарение, конденсация, кипение. Свойства жидкостей, поверхностное натяжение

Основные формулы

<p>Формула Ван-дер-Ваальса (уравнение состояния реального газа) для одного моля газа</p>	$\left(p + \frac{a}{V_M^2}\right)(V_M - b) = RT,$ <p>где a, b – постоянные Ван-дер-Ваальса, которые для разных газов можно найти в справочниках</p>
<p>Формула Ван-дер-Ваальса (уравнение состояния реального газа) для произвольного количества вещества ν</p>	$\left(p + \frac{\nu^2 a}{V^2}\right)(V - \nu b) = \nu RT$
<p>Количество теплоты, необходимое для испарения определенной массы жидкости</p>	$Q_{\text{исп}} = rm,$ <p>где r – удельная теплота парообразования</p>
<p>Количество теплоты, необходимое для расплавления определенной массы твердого тела</p>	$Q_{\text{пл}} = \lambda m,$ <p>где λ – удельная теплота плавления</p>
<p>Закон Дюлонга – Пти</p>	$C_\mu = 3R,$ <p>где R – универсальная газовая постоянная</p>
<p>Закон Дебая</p>	$C_p = k \left(\frac{T}{\theta_D}\right)^3,$ <p>где k – коэффициент пропорциональности (табличные величины); θ_D – температура Дебая</p>
<p>Капиллярное давление под изогнутой поверхностью жидкости</p>	<p>Для сферической поверхности: $\Delta P = 2\alpha/R;$ для цилиндрической поверхности: $\Delta P = \alpha/R,$ где α – коэффициент поверхностного натяжения; R – радиус кривизны поверхности</p>

Высота подъема (или глубина опускания) жидкости в капиллярной трубке	$h = 2\alpha \cos \theta / \rho g r,$ где α – коэффициент поверхностного натяжения; θ – краевой угол смачивания; ρ – плотность жидкости; g – ускорение свободного падения; r – радиус капилляра
--	--

Методические указания

При решении задач данного раздела необходимо учитывать, что между жидкостью и паром (газом), находящимся над ней, может существовать динамическое равновесие.

Динамическое равновесие – это процесс, при котором число молекул, покидающих жидкость за некоторое время, равно числу молекул, возвращающихся из пара в жидкость за то же время. Пар, находящийся в динамическом равновесии со своей жидкостью, называют насыщенным паром. Давление насыщенного пара не зависит от объема и определяется только температурой. В природе существует два процесса перехода из жидкости в газ. Эти процессы – испарение и кипение – называют процессами парообразования.

Испарение – это процесс парообразования, происходящий при любой температуре с поверхности жидкости с поглощением энергии.

Скорость испарения зависит от нескольких параметров: 1) температуры жидкости; 2) плотности вещества; 3) атмосферного давления; 4) площади поверхности жидкости; 5) движения воздушных масс у поверхности жидкости; 6) содержания водяных паров в атмосфере (влажность воздуха).

Кипение – это процесс парообразования, происходящий при определенной температуре во всем объеме жидкости с поглощением энергии. Температура кипения также зависит от нескольких параметров: 1) рода жидкости (плотности вещества); 2) атмосферного давления; 3) примесей в жидкости.

Конденсация – это процесс, обратный парообразованию, происходящий с выделением энергии.

Относительную влажность воздуха определяют как процентное соотношение парциального давления водяного пара, содержащегося

ся в воздухе при данной температуре, к давлению насыщенного пара при той же температуре.

Парциальное давление и плотность водяного пара, содержащегося в воздухе при данной температуре, определяют различными способами. Например, с помощью гигрометра определяют точку росы и по определенному алгоритму (приведенному ниже) определяют относительную влажность воздуха. При охлаждении влажного воздуха при постоянном давлении его относительная влажность повышается, так как чем ниже температура, тем ближе парциальное давление пара в воздухе к давлению насыщенного пара. Температура, до которой должен охладиться воздух, чтобы находящийся в нем водяной пар достиг состояния насыщения (при данной влажности воздуха и неизменном давлении), называется *точкой росы*. Давление насыщенного водяного пара при температуре воздуха, равной точке росы, и есть парциальное давление водяного пара, содержащегося в атмосфере. При охлаждении воздуха до точки росы начинается конденсация паров: появляется туман, выпадает роса.

При решении задач на точку росы применяется следующий алгоритм:

1. С помощью термометра определить температуру окружающего воздуха. По таблице зависимости давления насыщенного пара от температуры определить давление P_0 .

Давление и плотность насыщенного водяного пара

$t, ^\circ\text{C}$	$P, \text{Па}$	$\rho, \text{г/м}^3$	$t, ^\circ\text{C}$	$P, \text{Па}$	$\rho, \text{г/м}^3$
-28	46,7	0,41	12	1402,3	10,7
-27	50,7	0,46	13	1519,6	11,4
-26	57,3	0,51	14	1598,3	12,1
-25	62,7	0,55	15	1704,9	12,8
-24	69,3	0,66	16	1816,9	13,6
-23	77,3	0,68	17	1936,8	14,5
-22	85,3	0,73	18	2063,5	15,4
-21	93,3	0,80	19	2196,8	16,3
-20	102,6	0,85	20	2338,1	17,3
-19	113,3	0,96	21	2486,0	18,3
-18	125,3	1,05	22	2643,3	19,4
-17	137,3	1,15	23	2808,6	20,6
-16	150,6	1,27	24	2983,3	21,8

$t, ^\circ\text{C}$	$P, \text{Па}$	$\rho, \text{г/м}^3$	$t, ^\circ\text{C}$	$P, \text{Па}$	$\rho, \text{г/м}^3$
-15	165,3	1,38	25	3167,2	23,0
-14	181,3	1,51	26	3360,5	24,4
-13	198,6	1,65	27	3567,1	25,8
-12	217,3	1,80	28	3779,1	27,2
-11	237,3	1,96	29	4004,3	28,7
-10	259,9	2,14	30	4241,6	30,3
-9	283,9	2,33	31	4603,2	31,9
-8	337,2	2,54	32	4753,6	33,9
-7	351,9	2,76	33	5029,4	35,7
-6	367,9	2,99	34	5316,7	37,6
-5	401,2	3,24	35	5 622,6	39,6
-4	437,2	3,51	36	5 939,8	41,8
-3	475,9	3,81	38	6 623,6	46,3
-2	517,2	4,13	39	6 990,3	48,7
-1	562,5	4,47	40	7 374,2	51,2
0	610,5	4,84	45	9 581,6	65,4
1	656,1	5,22	50	12 330,3	83,0
2	758,4	5,60	55	15 729,4	104,3
3	797,3	5,98	60	19 915,0	130
4	812,1	6,40	65	24 993,8	161
5	871,1	6,84	70	31 152,2	198
6	934,4	7,3	75	38 577,0	242
7	1 001,1	7,8	80	47 334,8	293
8	1 073,1	8,3	85	57 798,9	354
9	1 147,7	8,8	90	70 089,1	424
10	1 227,7	9,4	95	84 498,9	505
11	1 300,7	10,0	100	101 303,0	598

2. Определить температуру, при которой выпала роса. По таблице зависимости давления насыщенного пара от температуры определить парциальное давление P .

3. По формуле

$$\varphi = \frac{P}{P_0} \cdot 100 \%$$

рассчитать относительную влажность воздуха.

Примеры решения задач

Пример 4.1. Какое количество теплоты необходимо затратить, чтобы нагреть 1 моль льда от температуры $-200\text{ }^\circ\text{C}$ до температуры плавления (считаем, что во всем диапазоне температур теплоемкость льда постоянна и равна $c_{\text{л}} = 2,1\text{ кДж/кг}$), затем расплавить, нагреть образовавшуюся воду до температуры кипения (считаем, что во всем диапазоне температур теплоемкость воды постоянна и равна $c_{\text{в}} = 4,18\text{ кДж/кг}$) и, наконец, полностью испарить ее? Какое количество тепловой энергии придется затратить в расчете на одну молекулу H_2O ? Ответ выразить в электрон-вольтах.

Дано:

$$\nu = 1 \text{ моль}$$

$$\mu = 0,018 \text{ кг/моль}$$

$$T = -200\text{ }^\circ\text{C}$$

$$c_{\text{л}} = 2,1 \text{ кДж/кг} = 2,1 \cdot 10^3 \text{ Дж/кг}$$

$$c_{\text{в}} = 4,18 \text{ кДж/кг} = 4,18 \cdot 10^3 \text{ Дж/кг}$$

$$\lambda_{\text{л}} = 3,3 \cdot 10^5 \text{ Дж/кг}$$

$$r = 2,3 \cdot 10^6 \text{ Дж/кг}$$

$$N_A = 6,02 \cdot 10^{23} \text{ моль}^{-1}$$

$$Q - ?$$

$$E - ?$$

Решение

Используем стандартные формулы для всех четырех этапов процесса:

$$Q = c_{\text{л}}m\Delta t + \lambda_{\text{л}}m + c_{\text{в}}m\Delta t + rm.$$

Так как $m = \nu\mu$, то

$$Q = \nu\mu(c_{\text{л}}\Delta t + \lambda_{\text{л}} + c_{\text{в}}\Delta t + r).$$

Учитывая условие задачи, получаем:

$$Q = 1 \cdot 0,018 \cdot (2,1 \cdot 10^3 \cdot 200 + 3,3 \cdot 10^5 + 4,18 \cdot 10^3 \cdot 100 + 4,18 \cdot 10^3) = 62,4 \cdot 10^3 \text{ Дж.}$$

Чтобы определить затраты тепловой энергии в расчете на одну молекулу, надо разделить полученный результат на число Авогадро и на переводной коэффициент $1,6 \cdot 10^{-19}\text{ эВ/Дж}$:

$$E = \frac{62,4 \cdot 10^4}{6,02 \cdot 10^{23} \cdot 1,6 \cdot 10^{-19}} = 0,65 \text{ (эВ)}.$$

Эта величина характеризует величину энергии связи между молекулами в кристалле льда.

Ответ: $Q = 62,4\text{ кДж}$, $E = 0,65\text{ эВ}$.

Пример 4.2. Две вертикальные, параллельные друг другу стеклянные пластины частично погружены в воду. Зазор между пластинами имеет ширину $d = 0,5\text{ мм}$. Ширина пластин по горизонтали составляет $l = 10\text{ см}$. Считая смачивание полным, определить:

1) высоту h , на которую поднимется вода в зазоре; 2) силу F , с которой пластины притягиваются друг к другу.

Дано:

$$d = 0,5 \text{ мм} = 0,5 \cdot 10^{-3} \text{ м}$$

$$l = 10 \text{ см} = 0,1 \text{ м}$$

$$\alpha = 0,073 \text{ Н/м}$$

$$\rho = 1000 \text{ кг/м}^3$$

$$g = 9,8 \text{ м/с}^2$$

$$h - ?$$

$$F - ?$$

Решение

Поскольку давление, создаваемое цилиндрически изогнутой поверхностью жидкости, в два раза меньше, чем сферической, то и подъем жидкости между двумя пластинами будет в 2 раза меньше, чем в трубке с диаметром, равным зазору между пластинами:

$$h = 2\alpha/\rho g d.$$

Краевой угол смачивания равен 0.

Рассчитаем высоту, на которую поднимется вода в зазоре:

$$h = \frac{2 \cdot 0,073}{1000 \cdot 9,8 \cdot 0,5 \cdot 10^{-3}} = 0,03 \text{ (м)}.$$

Сила притяжения пластин определяется произведением действующего на пластины капиллярного давления на площадь смоченной поверхности:

$$F = \Delta P l h;$$

$$\Delta P = 2\alpha/d.$$

Следовательно:

$$F = 4\alpha^2 l / \rho g d^2;$$

$$F = \frac{4 \cdot 0,073^2 \cdot 0,1}{1000 \cdot 9,8 \cdot (0,5 \cdot 10^{-3})^2} = 0,87 \text{ (Н)}.$$

Ответ: $h = 0,03 \text{ м}$, $F = 0,87 \text{ Н}$.

Задания для аудиторной самостоятельной работы

4.1. Один моль азота охлажден до температуры $-100 \text{ }^\circ\text{C}$. Определить давление газа, если занимаемый им объем равен: 1) 1,0 л; 2) 0,1 л. Сравнить с давлением, которое существовало бы в газе, если бы он сохранял свойства идеального.

4.2. Углекислый газ массой 6,6 кг при давлении 0,1 МПа занимает объем 3,75 м³. Определить температуру газа, если: 1) газ реальный; 2) газ идеальный. Поправки a и b в уравнении Ван-дер-Ваальса принять равными соответственно $a = 0,361 \text{ Н} \cdot \text{м}^4/\text{моль}^2$ и $b = 4,28 \cdot 10^{-5} \text{ м}^3/\text{моль}$.

4.3. Один моль азота расширяется адиабатически в пустоту от объема 1,0 л до объема 10,0 л. Найти приращение температуры газа (учитывая, что газ реальный).

4.4. Два моля азота расширяются в пустоту от объема 2,0 л до объема 10,0 л. Какое количество теплоты следует сообщить газу, чтобы его температура осталась прежней (газ – реальный).

4.5. Некое вещество при температуре T и давлении P претерпевает фазовый переход «жидкость – пар». Объем вещества меняется при этом от V_1 (жидкость в начале испарения) до V_2 (насыщенный пар). Известны масса m и удельная теплота испарения вещества q . Найти: 1) работу A , совершенную веществом в процессе фазового перехода; 2) количество теплоты Q , полученное в процессе перехода; 3) приращение внутренней энергии ΔU ; 4) приращение энтропии ΔS ; 5) приращение свободной энергии ΔF .

4.6. В тонкостенной пластиковой бутылке находится $m_0 = 1$ кг переохлажденной воды. В бутылку бросили сосульку массой $m_1 = 100$ г, имеющую ту же температуру, что и вода в бутылке. После установления теплового равновесия в бутылке оказалось $m_2 = 900$ г жидкости. Какую температуру имела переохлажденная вода? Теплоемкостью бутылки и потерями тепла пренебречь.

4.7. Определите количество теплоты, необходимое для нагревания 3 молей каменной соли от температуры 0 до 40,0 К (выполняется закон Дебая). Для каменной соли температура Дебая $\theta_D = 281$ К, коэффициент пропорциональности в законе Дебая $k = 1940 \text{ Дж}/(\text{моль} \cdot \text{К})$.

4.8. Водяной нагреватель может производить 8000 ккал/ч. Сколько воды сможет он нагреть в течение часа от 20 до 60 °С?

4.9. В стеклянную трубку с внутренним диаметром 20 мм соосно вставлена стеклянная палочка диаметром 19 мм. Считая смачивание полным, определить высоту капиллярного поднятия воды в зазоре между трубкой и палочкой.

4.10. Капля ртути объемом $22,5 \text{ мм}^3$ помещена между двумя параллельными стеклянными пластинами. С какой силой надо прижимать пластины друг к другу, чтобы установить между ними зазор в 3 мкм. Ртуть стекло не смачивает.

Вопросы для самоконтроля

1. От каких факторов зависит скорость испарения жидкости?
2. Почему испарение жидкости происходит при любой температуре?
3. Какой пар называется насыщенным, а какой – ненасыщенным?
4. Почему равновесие, наступающее между жидкостью и насыщенным паром, называют динамическим?
5. Каковы внешние признаки кипения? При каких условиях протекает это явление? Как можно наблюдать кипение?
6. Объясните механизм кипения.
7. Поясните разницу кипения при повышенном и пониженном давлении.
8. Каковы внешние признаки капиллярных явлений? Каковы условия, при которых они протекают? Как можно наблюдать капиллярные явления?
9. Объясните капиллярные явления на основе молекулярно-кинетической теории.
10. Расскажите о поверхностном натяжении по следующему плану:
 1. Что характеризует поверхностное натяжение жидкостей? От чего оно зависит?
 2. Каково определение данной величины?
 3. Какова формула для расчета поверхностного натяжения?
 4. В каких единицах выражается эта величина?

Практическое занятие 5
Первое начало термодинамики. Адиабатный процесс.
Полиτροпный процесс

Основные формулы

Внутренняя энергия идеального газа	$U = \frac{i}{2} \nu RT$
Первое начало термодинамики для изобарного процесса	$\Delta Q_{12} = \Delta U_{12} + A_{12},$ $A_{12} = \frac{m}{\mu} R \Delta T,$ $\Delta U_{12} = \frac{i}{2} \frac{m}{\mu} R \Delta T$
Первое начало термодинамики для изохорного процесса	$\Delta Q_{12} = \Delta U_{12}$
Первое начало термодинамики для изотермического процесса	$\Delta Q_{12} = A_{12}$
Первое начало термодинамики для адиабатного процесса	$A_{12} = U_1 - U_2$
Уравнение Майера	$C_{\mu V} + C_{\mu p} = R$
Коэффициент адиабаты	$\gamma = \frac{C_{\mu p}}{C_{\mu V}} = \frac{i + 2}{i}$
Уравнение политропы	$pV^n = \text{const},$ $TV^{n-1} = \text{const}$
Показатель политропы	$n = \frac{(C - C_p)}{(C - C_V)}$
Связь теплоемкости с показателем политропы	$C = \frac{(nC_V - C_p)}{n} - 1$

Методические указания

Первое начало термодинамики при решении задач необходимо рассматривать с энергетической точки зрения как два явления, наблюдающиеся при сообщении системе тепла. Во-первых, при сообщении тепла системе увеличивается ее температура, соответственно, увеличивается интенсивность теплового движения его молекул и их внутренняя энергия. Во-вторых, при нагревании система (газ) расширяется, то есть увеличивает свой объем, и при этом система совершает работу над внешними телами (атмосферный воздух), чтобы занять необходимое пространство при расширении. Существует две формы передачи энергии системе от внешних тел – это работа и теплота. Поэтому нельзя говорить о работе и количестве теплоты, которыми обладает система в данном состоянии. Величины энергии системы в начальном U_1 и конечном U_2 состоянии определяются только этими состояниями, а работа A и теплота Q зависят от особенностей процесса между этими состояниями. Поэтому можно говорить о приращении внутренней энергии U , но нельзя говорить о приращении работы или тепла.

При адиабатическом процессе работа, связанная с изменением объема газа, происходит за счет изменения внутренней энергии, то есть температуры, теплообмена с окружающей средой не происходит. При расширении газа работа совершается газом за счет внутренней энергии, поэтому его температура понижается. При сжатии газа работа совершается внешними силами, и за счет этой работы растет его внутренняя энергия, то есть и температура газа.

Политропные процессы описываются уравнением

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

где n – показатель политропы, который не зависит от температуры и изменяется в пределах от $-\infty$ до $+\infty$. Все многообразие процессов можно описать политропой с показателем $-\infty < n < +\infty$. Изохорный, изобарный, изотермический, адиабатный процессы являются частным случаем политропных процессов с определенным показателем n .

Примеры решения задач

Пример 5.1. Определите количество теплоты, поглощаемое водородом массой 0,2 кг при нагревании его от температуры 0 °С до температуры 100 °С при постоянном давлении. Найдите также изменение внутренней энергии газа и совершаемую им работу.

Дано:

$$m = 0,2 \text{ кг}$$

$$i = 5$$

$$\mu = 0,002 \text{ кг/моль}$$

$$T_1 = 0 \text{ °С} = 273 \text{ К}$$

$$T_2 = 100 \text{ °С} = 373 \text{ К}$$

$$R = 8,31 \text{ Дж/(моль} \cdot \text{ К)}$$

$$Q - ?$$

$$\Delta U - ?$$

$$A - ?$$

Решение

Количество теплоты, поглощаемое газом при изобарном нагревании:

$$Q = c_p m \Delta T, \quad (1)$$

где c_p — удельная теплоемкость нагреваемого газа при постоянном давлении; m — масса нагреваемого газа; ΔT — изменение температуры газа.

Как известно:

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

Подставив c_p в формулу (1), получим:

$$Q = \frac{i + 2 m}{2 \mu} R \Delta T.$$

Внутренняя энергия:

$$U = \frac{i m}{2 \mu} R T.$$

Следовательно, изменение внутренней энергии

$$\Delta U = \frac{i m}{2 \mu} R \Delta T.$$

Работу расширения газа определим из первого начала термодинамики:

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

Откуда

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

Произведя вычисления, найдем необходимые величины:

$$Q = \frac{5 + 2}{2} \cdot \frac{0,2 \cdot 8,31 \cdot (373 - 273)}{0,002} = 290,85 \cdot 10^3 \text{ (Дж)};$$

$$\Delta U = \frac{5}{2} \cdot \frac{0,2 \cdot 8,31 \cdot (373 - 273)}{0,002} = 207,75 \cdot 10^3 \text{ (Дж);}$$

$$A = 290,85 \cdot 10^3 - 207,75 \cdot 10^3 = 83,1 \cdot 10^3 \text{ (Дж).}$$

Ответ: $Q = 290,85$ кДж, $\Delta U = 207,75$ кДж, $A = 83,1$ кДж.

Пример 5.2. Идеальный двухатомный газ расширяется согласно уравнению $pV^n = \text{const}$, где $n = 1,2$. При расширении объем газа увеличивается в 2 раза. Определите изменение внутренней энергии газа и совершенную им работу, если в начале процесса объем газа был равен 6 л, а давление $2 \cdot 10^5$ Па. Чему равна молярная теплоемкость в этом процессе?

Дано:

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

$$i = 5$$

$$n = 1,2$$

$$V_1 = 6 \text{ л} = 6 \cdot 10^{-3} \text{ м}^3$$

$$V_2 = 2V_1$$

$$p_1 = 2 \cdot 10^5 \text{ Па}$$

$$\Delta U - ?$$

$$A - ?$$

$$C - ?$$

Решение

Процесс расширения газа является политропическим. Изменение внутренней энергии газа можно рассчитать по формуле

$$\Delta U = \frac{i}{2} \frac{m}{\mu} R(T_2 - T_1).$$

Используя уравнение Менделеева – Клапейрона, выразим T_1 и T_2 :

$$T_1 = \frac{P_1 V_1 \mu}{mR}, \quad T_2 = \frac{P_2 V_2 \mu}{mR}.$$

Получим:

$$\Delta U = \frac{i}{2} (p_2 V_2 - p_1 V_1). \quad (1)$$

Давление p_2 найдем, используя уравнение политропы:

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

откуда

$$p_1 V_1^n = p_2 V_2^n,$$

тогда

$$p_2 = p_1 \left(\frac{V_1}{V_2} \right)^n. \quad (2)$$

Из (2) и (1) следует, что

$$\Delta U = \frac{i}{2} p_1 \left[\left(\frac{V_1}{V_2} \right)^n \cdot V_2 - V_1 \right]. \quad (3)$$

Работу газа рассчитывают по формуле

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

Так как

$$pV^n = \text{const} = p_1 V_1^n,$$

то

$$p = \frac{p_1 V_1^n}{V^n}.$$

Подставим это выражение в формулу для работы:

$$A = p_1 V_1^n \int_{V_1}^{V_2} \frac{dV}{V^n} = p_1 V_1^n \cdot \frac{1}{n-1} \left(\frac{1}{V_1^{n-1}} - \frac{1}{V_2^{n-1}} \right) = \frac{1}{n-1} \left(\frac{p_1 V_1^n}{V_1^{n-1}} - \frac{p_1 V_1^n}{V_2^{n-1}} \right).$$

Учитывая, что

$$p_1 V_1^n = p_2 V_2^n,$$

получим:

$$A = \frac{1}{n-1} (p_1 V_1 - p_2 V_2) = \frac{p_1 V_1}{n-1} \left[1 - \left(\frac{V_1}{V_2} \right)^{n-1} \right]. \quad (4)$$

Молярная теплоемкость газа

$$C = \frac{1}{\nu} \frac{Q}{\Delta T} = \frac{1}{\nu} \frac{Q}{T_2 - T_1}. \quad (5)$$

С учетом выражений (1) и (4) первое начало термодинамики запишем в виде:

$$Q = \frac{i}{2} (p_2 V_2 - p_1 V_1) + \frac{1}{n-1} (p_1 V_1 - p_2 V_2)$$

или

$$Q = \left(\frac{i}{2} - \frac{1}{n-1} \right) (p_2 V_2 - p_1 V_1).$$

Используя уравнение Менделеева – Клапейрона, имеем:

$$Q = \nu \left(\frac{i}{2} - \frac{1}{n-1} \right) R (T_2 - T_1). \quad (6)$$

Подставим выражение (6) в (5):

$$C = \left(\frac{i}{2} - \frac{1}{n-1} \right) R. \quad (7)$$

Произведем вычисления по формулам (3), (4) и (7) и найдем необходимые величины:

$$\Delta U = \frac{5 \cdot 2 \cdot 10^5}{2} \cdot \left[\left(\frac{6 \cdot 10^{-3}}{2 \cdot 6 \cdot 10^{-3}} \right)^{1,2} \cdot 2 \cdot 6 \cdot 10^{-3} - 6 \cdot 10^{-3} \right] = -390 \text{ (Дж)};$$

$$A = \frac{2 \cdot 10^5 \cdot 6 \cdot 10^{-3}}{1,2 - 1} \left[1 - \left(\frac{6 \cdot 10^{-3}}{2 \cdot 6 \cdot 10^{-3}} \right)^{1,2-1} \right] = 780 \text{ (Дж)};$$

$$C = \left(\frac{5}{2} - \frac{1}{1,2 - 1} \right) \cdot 8,31 = -20,8 \left(\frac{\text{Дж}}{(\text{моль} \cdot \text{К})} \right).$$

Ответ: $\Delta U = -390 \text{ Дж}$; $A = 780 \text{ Дж}$; $C = -20,8 \text{ Дж}/(\text{моль} \cdot \text{К})$.

Задания для аудиторной самостоятельной работы

5.1. В цилиндрах карбюраторного двигателя внутреннего сгорания газ сжимается политропически так, что после сжатия температура газа становится равной $t_2 = 427 \text{ }^\circ\text{C}$. Начальная температура $t_1 = 140 \text{ }^\circ\text{C}$ газа. Степень сжатия $V_2/V_1 = 5,8$. Найти показатель политропы n .

5.2. Идеальный двухатомный газ, занимающий объем 4 л при давлении 300 кПа, расширяется адиабатно до объема 6 л. Затем в ходе изохорного охлаждения давление газа падает до 100 кПа. Определите работу газа, изменение внутренней энергии и количество теплоты, отданное газом. Изобразите процесс графически.

5.3. При адиабатном расширении объем азота увеличился в пять раз, а внутренняя энергия уменьшилась на 4 кДж. Определите массу азота, если начальная температура его была 400 К.

5.4. Идеальный двухатомный газ, занимающий объем 4 л при давлении 300 кПа, расширяется адиабатно до объема 6 л. Затем в ходе изохорного охлаждения давление газа падает до 100 кПа. Определите работу газа, изменение внутренней энергии и количество теплоты, отданное газом. Изобразите процесс графически.

5.5. 10 г кислорода находятся под давлением 300 кПа при температуре $10 \text{ }^\circ\text{C}$. После нагревания при $p = \text{const}$ газ занял объем 10 л. Найдите количество теплоты, полученное газом, изменение внутренней энергии газа и работу, совершенную газом при расширении.

5.6. Определить значение молярной теплоемкости при постоянном давлении, число и характер степеней свободы молекул газа, для которых показатель адиабаты равен: 1) 1,40; 2) 1,29.

5.7. Газ расширяется адиабатически так, что его давление падает от 200 до 100 кПа. Затем нагревается при постоянном объеме до первоначальной температуры, причем его давление возрастает до 122 кПа. Определить показатель адиабаты.

5.8. В качестве газонаполнителя в лампах накаливания используется смесь, состоящая по массе из 86 % аргона ($\mu_{\text{Ar}} = 40 \cdot 10^{-3}$ кг/моль) и 14 % азота ($\mu_{\text{N}_2} = 28 \cdot 10^{-3}$ кг/моль). Температура газа в лампе $T = 400$ К. Найти показатель адиабаты для этой смеси.

5.9. Объем газа увеличился в два раза: один раз изотермически, другой раз изобарически. В каком из двух этих случаев газ совершит большую работу?

5.10. Идеальный газ с показателем адиабаты γ совершает процесс, при котором его внутренняя энергия зависит от объема по закону $U = bV^a$, где b и a – положительные константы. Найти: работу, которую произведет газ, и количество теплоты, которое надо сообщить ему, чтобы внутренняя энергия испытала приращение; молярную теплоемкость газа в этом процессе.

Вопросы для самоконтроля

1. Сформулируйте первое начало термодинамики.
2. Какой процесс называется адиабатным? Какая величина сохраняется в этом процессе?
3. Как изменятся температура и давление газа, если происходит:
а) адиабатное расширение; б) адиабатное сжатие?
4. Как зависит удельная теплоемкость вещества от массы тела?
5. Чему равна теплоемкость адиабатического процесса?
6. По какой формуле вычисляется количество теплоты при нагревании тела?
7. Изобразите изотермический и адиабатический процессы на диаграммах P – V .
8. Чему равна работа газа в адиабатическом процессе? Как можно найти работу из диаграммы P – V ?
9. Какие процессы являются политропными? Запишите уравнение политропы.
10. Дайте понятие показателя политропы. В чем его физический смысл?

Практическое занятие 6

Круговые процессы. Термический КПД. Цикл Карно

Основные формулы

Термический коэффициент полезного действия (КПД) цикла в общем случае	$\eta = \frac{Q_1 - Q_2}{Q_1},$ <p>где Q_1 – количество теплоты, полученное рабочим телом (газом) от нагревателя; Q_2 – количество теплоты, переданное рабочим телом охладителю</p>
Эффективность холодильной машины	$\eta' = \frac{Q_2}{A'} = \frac{Q_2}{Q_1 - Q_2},$ <p>где Q_2 – отнятое от охлаждаемого тела тепло; A' – работа, затрачиваемая на приведение машины в действие</p>
КПД цикла Карно	$\eta = \frac{T_1 - T_2}{T_1},$ <p>где T_1 – абсолютная температура нагревателя; T_2 – абсолютная температура охладителя</p>
КПД цикла холодильной машины Карно	$\eta' = \frac{T_2}{T_1 - T_2},$ <p>где T_1 и T_2 – абсолютные температуры нагревателя и охладителя соответственно</p>

Методические указания

Тепловыми машинами (двигателями) называют устройства, которые превращают теплоту (внутреннюю энергию топлива) в механическую работу. Тепловые машины получают тепло $Q_{\text{нагр}}$ от нагревателя (внешнего источника тепла), совершают работу A , неизбежно отдавая при этом тепло $Q_{\text{хол}}$ холодильнику (окружающей среде). Работа тепловых машин представляет собой повторяющийся процесс, который называется циклическим (или круговым). Начало и конец цикла совпадают, поэтому цикл изображается на диаграмме процессов замкнутой кривой. Цикл может пройти как по часовой стрелке, так и против часовой стрелки. Направление цикла обязательно указывают стрелками, буквами или цифрами.

Суммарная работа в циклическом процессе всегда по модулю равна площади, охватываемой замкнутой кривой. При расчетах необходимо учитывать знак этой работы. При обходе цикла по часовой стрелке в систему поступает большее количество теплоты, чем отходит от нее, а работа газа при этом будет положительной. Если тепловую машину включить в обратном направлении, то машина будет холодильной (в быту она и называется холодильником).

Максимальный коэффициент полезного действия (КПД) достигается в процессе цикла Карно, состоящего из двух адиабат и двух изотерм. КПД такого цикла ($\eta_{\text{Карно}}$) зависит только от температуры нагревателя и холодильника:

$$\eta_{\text{Карно}} = 1 - \frac{T_{\text{хол}}}{T_{\text{нагр}}} = \frac{T_{\text{нагр}} - T_{\text{хол}}}{T_{\text{нагр}}}.$$

В задачах на цикл Карно обычно предлагается найти максимально возможный КПД при заданных температурах холодильника и нагревателя. Или предлагается найти КПД заданного цикла.

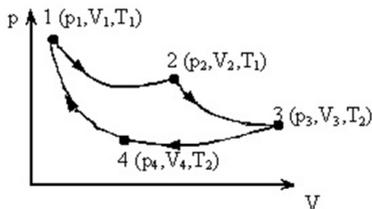
Примеры решения задач

Пример 6.1. Трехатомный идеальный газ совершает цикл Карно. Определите КПД цикла, если при адиабатическом расширении объем газа увеличивается в 8 раз.

Дано:
 $V_3 / V_2 = 8$
 $i = 6$
 $\eta = ?$

Решение

Построим график цикла:



КПД цикла Карно:

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

Для определения абсолютных температур T_1 (нагревателя) и T_2 (холодильника) воспользуемся уравнением адиабаты:

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

откуда

$$T_1 V_2^{\gamma-1} = T_2 V_3^{\gamma-1}$$

или

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

где

$$\gamma - 1 = \frac{2}{i} = \frac{1}{3}.$$

Тогда

$$\frac{T_1}{T_2} = \left(\frac{V_3}{V_2}\right)^{1/3} = 8^{1/3} = \sqrt[3]{8},$$

то есть

$$T_1 = 2T_2. \quad (2)$$

Подставим (2) в (1) и определим КПД цикла:

$$\eta = \frac{2T_2 - T_2}{2T_2} = 0,5.$$

Ответ: $\eta = 0,5 = 50\%$.

Пример 6.2. Идеальный двухатомный газ ($\nu = 1$ моль), занимающий объем 10 л под давлением 250 кПа, подвергают изохорному нагреванию до температуры 400 К. Затем газ изотермически расширяется до начального давления. После чего путем изобарного сжатия газ возвращают в первоначальное состояние. Постройте график цикла и определите его КПД.

Дано:

$$\nu = 1 \text{ моль}$$

$$i = 5$$

$$p_1 = 250 \text{ кПа} = 250 \cdot 10^3 \text{ Па}$$

$$V_1 = V_2 = 10 \text{ л} = 0,01 \text{ м}^3$$

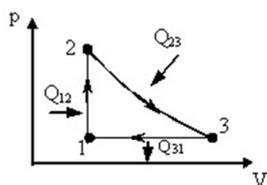
$$T_2 = T_3 = 400 \text{ К}$$

$$R = 8,31 \text{ Дж}/(\text{моль} \cdot \text{К})$$

$$\eta = ?$$

Решение

Построим график цикла, состоящего из изохоры, изотермы и изобары:



Термический КПД цикла:

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

Количество теплоты Q_1 , полученное газом за цикл, складывается из количеств теплоты, сообщенных газу на участках $1 \rightarrow 2$ и $2 \rightarrow 3$, то есть

$$Q_1 = Q_{12} + Q_{23}. \quad (2)$$

Количество теплоты:

$$Q_{12} = C_V \nu (T_2 - T_1),$$

где

$$C_V = \frac{i}{2} R.$$

Тогда

$$Q_{12} = \frac{i}{2} R \nu (T_2 - T_1). \quad (3)$$

Температуру T_1 определим из уравнения Менделеева – Клапейрона:

$$T_1 = \frac{p_1 V_1}{\nu R}. \quad (4)$$

Объединив формулы (4) и (3), получим:

$$Q_{12} = \frac{i}{2} R \nu \left(T_2 - \frac{p_1 V_1}{\nu R} \right). \quad (5)$$

Из первого начала термодинамики:

$$Q_{23} = A_{23} = \nu R T_2 \ln \left(\frac{V_3}{V_2} \right). \quad (6)$$

Учитывая, что при $p = \text{const}$ по закону Гей-Люссака

$$\frac{V_3}{V_1} = \frac{T_3}{T_1},$$

а также

$$V_1 = V_2;$$

$$T_3 = T_2,$$

преобразуем выражение (6):

$$Q_{23} = \nu R T_2 \ln \left(\frac{\nu R T_2}{p_1 V_1} \right). \quad (7)$$

Объединив (5), (7) и (2), найдем количество теплоты Q_1 :

$$Q_1 = \frac{i}{2} R \nu \left(T_2 - \frac{p_1 V_1}{\nu R} \right) + \nu R T_2 \ln \left(\frac{\nu R T_2}{p_1 V_1} \right). \quad (8)$$

Количество теплоты, отданное газом при изобарном сжатии:

$$Q_2 = |Q_{31}| = C_p \nu (T_3 - T_1),$$

где

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

отсюда

$$Q_2 = \frac{i + 2}{2} R \nu \left(T_2 - \frac{p_1 V_1}{\nu R} \right). \quad (9)$$

Окончательно получим:

$$\eta = 1 - \frac{(i + 2) \left(T_2 - \frac{p_1 V_1}{\nu R} \right)}{i \left(T_2 - \frac{p_1 V_1}{\nu R} \right) + 2 T_2 \ln \frac{T_2 \nu R}{p_1 V_1}}. \quad (10)$$

Произведем вычисления по формуле (10) и определим КПД:

$$\eta = 1 - \frac{(5 + 2) \cdot \left(400 - \frac{250 \cdot 10^3 \cdot 0,01}{1 \cdot 8,31} \right)}{5 \cdot \left(400 - \frac{250 \cdot 10^3 \cdot 0,01}{1 \cdot 8,31} \right) + 2 \cdot 400 \cdot \ln \frac{400 \cdot 1 \cdot 8,31}{250 \cdot 10^3 \cdot 0,01}} = 0,041.$$

Ответ: $\eta = 0,041 = 4,1 \%$.

Задания для аудиторной самостоятельной работы

6.1. Идеальный газ совершает цикл, состоящий из процессов изобарного расширения (1→2), адиабатического расширения (2→3) и изотермического сжатия (3→1). Определите коэффициент полезного действия цикла, если при изобарном процессе газ нагревается от 200 до 400 К.

6.2. Холодильная машина работает по циклу Карно в интервале температур $t_1 = 27^\circ \text{C}$ и $t_2 = -3^\circ \text{C}$. Рабочее тело – азот, масса которого $m = 0,2$ кг. Определите: 1) количество теплоты, отбираемое от охлаждаемого тела; 2) количество теплоты, отдаваемое рабочим телом в окружающую среду; 3) работу внешних сил за цикл; 4) холодильный коэффициент, если отношение максимального объема к минимальному равно 5.

6.3. Идеальная холодильная машина, работающая по обратному циклу Карно, совершает за один цикл работу $A = 37$ кДж. При этом она берет тепло от тела с температурой $t_2 = -10^\circ \text{C}$ и передает тепло

телу с температурой $t_1 = 17^\circ\text{C}$. Найти КПД цикла, количество теплоты Q_2 , отнятое у холодного тела за один цикл, и количество теплоты Q_1 , переданное более горячему телу за один цикл.

6.4. Идеальная холодильная машина, работающая по обратному циклу Карно, передает тепло от холодильника с водой при температуре $t_2 = 0^\circ\text{C}$ кипяильнику с водой при температуре $t_1 = 100^\circ\text{C}$. Какую массу m_2 воды нужно заморозить в холодильнике, чтобы превратить в пар массу $m_1 = 1$ кг воды в кипяильнике?

6.5. Трехатомный идеальный газ совершает цикл Карно. Определите КПД цикла, если при адиабатическом расширении объем газа увеличивается в 8 раз.

6.6. Идеальный газ совершает цикл Карно. Температура нагревателя равна 470 К, температура холодильника 280 К. При изотермическом расширении газ совершает работу $A = 100$ Дж. Определить термический КПД цикла, а также количество теплоты Q_2 , которое газ отдает холодильнику при изотермическом сжатии.

6.7. Водород совершает цикл Карно. Найти КПД цикла, если при адиабатическом расширении: 1) объем газа увеличивается в $n = 2$ раза; 2) давление уменьшается в $n = 2$ раза.

6.8. Идеальный газ совершает цикл Карно. Газ получил от нагревателя количество теплоты $Q_1 = 5,5$ кДж и совершил работу 1,1 кДж. Найти: 1) КПД цикла; 2) отношение температур нагревателя и холодильника.

6.9. Идеальная тепловая машина, работающая по циклу Карно, получает за цикл от нагревателя 600 Дж теплоты. Температура нагревателя 400 К, температура холодильника 300 К. Найти: 1) работу, совершаемую машиной за 1 цикл; 2) количество теплоты, отдаваемое холодильнику за 1 цикл.

6.10. В результате кругового процесса газ совершил работу A и передал охладителю количество теплоты Q_2 . Определить термический КПД цикла. Решить задачу для: 1) $A = 1$ Дж; $Q_2 = 4$ Дж; 2) $A = 2$ Дж; $Q_2 = 4,2$ Дж; 3) $A = 1$ Дж; $Q_2 = 4$ Дж; 4) $A = 1$ Дж; $Q_2 = 5$ Дж.

Вопросы для самоконтроля

1. Назовите виды теплоемкости и запишите соотношения между ними.
2. Какие процессы называют круговыми, обратимыми и необратимыми?
3. Нарисуйте график цикла Карно в координатах $p - V$ и $T - S$.
4. Запишите формулы для расчета КПД произвольного цикла и цикла Карно. Какие величины в них входят и что они характеризуют?
5. Дайте определение тепловой машины. Из каких основных частей она состоит?
6. Почему в тепловых двигателях в качестве рабочего тела используется газ или пар, а не жидкость или твердое тело?
7. Сформулируйте первую и вторую теоремы Карно.
8. Как рассчитывается максимальный КПД идеальной тепловой машины? Сравните КПД идеального и реального тепловых двигателей. Укажите пути повышения КПД тепловых двигателей.
9. Обратный цикл. Принцип действия холодильной машины.
10. Запишите неравенство Клаузиуса, сформулируйте его. Где оно используется в технике?

Практическое занятие 7

Второе начало термодинамики. Энтропия

Основные формулы

Элементарное приращение энтропии в равновесном процессе	$dS = \frac{\partial Q}{T},$	(1)
	где ∂Q – элементарная теплота, полученная системой	
Конечное приращение энтропии системы	$\Delta S \geq \int \frac{\partial Q}{T},$	(2)
	где знак « \geq » соответствует равновесному процессу, знак « $>$ » – неравновесному; T – температура тела, отдающего тепло	
Связь между энтропией и статистическим весом состояния термодинамической системы	$S = k \ln(W)$	(3)
Изменение энтропии идеального газа в изобарическом процессе	$\Delta S_{1 \rightarrow 2} = \frac{m}{\mu} \left(C_V \ln \frac{T_2}{T_1} + R \ln \frac{V_2}{V_1} \right)$	(4)
Изменение энтропии при адиабатном процессе	$\partial Q = 0,$	(5)
	следовательно, $\Delta S = 0$	
Изменение энтропии при изотермическом процессе	$\Delta S = \frac{m}{\mu} R \ln \frac{V_2}{V_1}$	(6)
Изменение энтропии при изохорическом процессе	$\Delta S = \frac{m}{\mu} C_V \ln \frac{T_2}{T_1}$	(7)

Методические указания

При решении задач часто бывает нужно рассчитать изменение (приращение или убыль) энтропии. Для равновесных (обратимых) термодинамических процессов расчет производится по формулам (1) и (2).

При расчете изменения энтропии идеального газа в произвольном процессе используют формулы (4–7).

Если процесс происходит в несколько стадий (например, плавление, потом нагревание и т. д.), то рассчитывается изменение энтропии на каждой из стадий, а затем ищется алгебраическая сум-

ма этих изменений. Для расчета энтропии больших систем используется свойство аддитивности энтропии: энтропия системы равна сумме энтропий ее частей.

Для расчета изменения энтропии при необратимых процессах используется тот факт, что энтропия является функцией состояния термодинамической системы и ее изменение не зависит от вида процесса. Поэтому для расчета необратимый процесс можно мысленно заменить на любой обратимый с теми же начальными и конечными состояниями. Изменение энтропии системы в таком процессе будет тем же самым. Так же можно поступать и в тех случаях, когда прямой расчет по обратимому процессу, указанному в условии задачи, неудобен или нецелесообразен.

Примеры решения задач

Пример 7.1. Определите изменение энтропии при изотермическом расширении кислорода массой $m = 10$ г от объема $V_1 = 25$ л до объема $V_2 = 100$ л.

Дано:

$$m = 10 \text{ г} = 10^{-2} \text{ кг}$$

$$\mu = 0,032 \text{ кг/моль}$$

$$V_1 = 25 \text{ л} = 25 \cdot 10^{-3} \text{ м}^3$$

$$V_2 = 100 \text{ л} = 0,1 \text{ м}^3$$

$$R = 8,31 \text{ Дж/(моль} \cdot \text{К)}$$

$$\Delta S - ?$$

Решение

Для изотермического процесса изменение энтропии запишем как

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

Количество теплоты Q , полученное газом, найдем из первого начала термодинамики:

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

Для изотермического процесса: $\Delta U = 0$.

Следовательно:

$$Q = A. \quad (2)$$

Работу определим по формуле

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

С учетом выражений (2) и (3) равенство (1) примет вид:

$$\Delta S = \frac{\frac{m}{\mu} RT \ln \frac{V_2}{V_1}}{T} = \frac{m}{\mu} R \ln \frac{V_2}{V_1}. \quad (4)$$

Подставим в выражение (4) числовые значения, найдем изменение энтропии:

$$\Delta S = \frac{10^{-2} \cdot 8,31 \ln \frac{0,1}{0,025}}{0,032} = 36,1 \text{ (Дж/К)}.$$

Ответ: $\Delta S = 36,1$ Дж/К.

Пример 7.2. Найти изменение энтропии ΔS при переходе массы $m = 8$ г кислорода от объема $V_1 = 10$ л при температуре $t_1 = 80$ °С к объему $V_2 = 40$ л при температуре $t_2 = 300$ °С.

Дано:

$$\begin{aligned} m &= 8 \text{ г} = 8 \cdot 10^{-3} \text{ кг} \\ \mu &= 0,032 \text{ кг/моль} \\ R &= 8,31 \text{ Дж/(моль} \cdot \text{К)} \\ i &= 5 \\ V_1 &= 10 \text{ л} = 10^{-2} \text{ м}^3 \\ T_1 &= 80 \text{ }^\circ\text{С} = 353 \text{ К} \\ V_2 &= 40 \text{ л} = 4 \cdot 10^{-2} \text{ м}^3 \\ T_2 &= 300 \text{ }^\circ\text{С} = 573 \text{ К} \end{aligned}$$

$\Delta S - ?$

Решение

Изменение энтропии при переходе вещества из состояния 1 в состояние 2:

$$\Delta S = \int_1^2 \frac{\partial Q}{T},$$

где, согласно первому началу термодинамики:

$$dQ = dU + dA.$$

Изменение внутренней энергии идеального газа:

$$dU = \frac{m}{\mu} C_V dT.$$

Элементарная работа газа при изменении его объема:

$$dA = p dV.$$

Следовательно:

$$dQ = \frac{m}{\mu} C_V dT + p dV.$$

Так как из уравнения Менделеева – Клапейрона давление

$$p = \frac{m RT}{\mu V},$$

то

$$dQ = \frac{m}{\mu} C_V dT + \frac{m RT}{\mu V} dV.$$

Тогда

$$\Delta S = \int_1^2 \frac{m}{\mu} C_V \frac{dT}{T} + \int_1^2 \frac{m RT}{\mu VT} dV;$$

$$\Delta S = \frac{m}{\mu} C_V \ln \frac{T_2}{T_1} + \frac{m}{\mu} R \ln \frac{V_2}{V_1};$$

$$C_V = \frac{i}{2} R.$$

Окончательно получим:

$$\Delta S = \frac{mR}{\mu} \left(\frac{i}{2} \ln \frac{T_2}{T_1} + \ln \frac{V_2}{V_1} \right). \quad (1)$$

Подставив в выражение (1) числовые значения, найдем изменение энтропии:

$$\Delta S = \frac{0,008 \cdot 8,31}{0,032} \cdot \left(\frac{5}{2} \ln \frac{573}{353} + \ln \frac{4 \cdot 10^{-2}}{10^{-2}} \right) = 5,38 \text{ (Дж/К)}.$$

Ответ: $\Delta S = 5,38$ Дж/К.

Задания для аудиторной самостоятельной работы

7.1. При изотермическом расширении идеального газа в количестве 5 молей его энтропия увеличилась на 57,5 Дж/К. Во сколько раз при этом увеличился его объем?

7.2. При нагревании двухатомного идеального газа в количестве 3 молей его термодинамическая температура увеличилась в 2 раза. Определить приращение энтропии, если нагревание происходит: 1) изохорно; 2) изобарно.

7.3. Азот массой 28 г адиабатически расширили в 2 раза, а затем изобарно сжали до первоначального объема. Определить приращение энтропии газа в ходе указанных процессов.

7.4. Определить приращение энтропии при изотермическом расширении азота массой 10 г, если давление газа уменьшилось от 0,1 МПа до 50 кПа.

7.5. Найти приращение энтропии при превращении 10 г льда при $-20\text{ }^{\circ}\text{C}$ в пар при $100\text{ }^{\circ}\text{C}$.

7.6. Найти приращение энтропии при плавлении 1 кг льда, находящегося при $0\text{ }^{\circ}\text{C}$.

7.7. Найти приращение энтропии при переходе 8 г кислорода от объема 10 л при температуре $80\text{ }^{\circ}\text{C}$ к объему 40 л при температуре $300\text{ }^{\circ}\text{C}$.

7.8. Найти приращение энтропии при переходе 6 г водорода от объема 20 л под давлением $1,5 \cdot 10^5\text{ Н/м}^2$ к объему 60 л под давлением $1 \cdot 10^5\text{ Н/м}^2$.

7.9. 6,6 г водорода расширяются изобарически до удвоения объема. Найти приращение энтропии при этом расширении.

7.10. Идеальный газ, расширяясь при постоянной температуре $T = 373\text{ К}$, совершает работу $A = 600\text{ Дж}$. Определить изменение энтропии газа в этом процессе.

Вопросы для самоконтроля

1. Что характеризует энтропия? Как связаны изменение энтропии и количество теплоты?
2. Дайте формулировки первого и второго начала термодинамики.
3. Почему нельзя передать теплоту от менее нагретого тела более нагретому телу?
4. Запишите выражения для изменения энтропии в изопроцессах.
5. Давление любого газа может возрасти при изотермическом, адиабатическом и изохорическом процессах. При каком из перечисленных процессов энтропия не изменяется?
6. Почему невозможен вечный двигатель?
7. Дайте описание обратимых и необратимых процессов. Приведите примеры из практики.
8. Сформулируйте теорему Нернста.
9. Поясните смысл закона возрастания энтропии.
10. Объясните вероятностный подход к понятию энтропии.

Практическое занятие 8

Подготовка к итоговому тестированию

Итоговой формой контроля по курсу «Общая и экспериментальная физика. Молекулярная физика и термодинамика» является зачет. Результат освоения студентом теоретического материала по курсу физики определяется с помощью тестирования, которое проводится по расписанию учебного семестра.

Итоговый тест по курсу «Общая и экспериментальная физика. Молекулярная физика и термодинамика» состоит из 50 заданий. В итоговом тесте имеются задания разных форм:

- 1) с выбором одного верного ответа;
- 2) с выбором нескольких верных ответов;
- 3) на упорядочение ответов;
- 4) на соответствие понятий;
- 5) с открытой формой ответа.

Структура теста:

- определения физических величин, формулировки законов и теорем – 10 заданий;
- единицы измерения физических величин – 10 заданий;
- формулы – 10 заданий;
- графические задачи – 10 заданий;
- расчетные задачи – 10 заданий.

Максимальный балл за итоговый тест – 100.

При подготовке к итоговому тестированию студенту необходимо самостоятельно повторить теоретический материал изучаемого курса, основные методы расчета физических величин, применяемых при решении задач этого курса, приемы решения графических задач, применяемые для ускорения решения, а также проверить степень готовности к итоговому тестированию.

Для самопроверки подготовленности к итоговому тестированию студенту предлагается пройти примерный тест-тренинг по курсу «Общая и экспериментальная физика. Молекулярная физика и термодинамика».

В конце занятия обсуждаются результаты прохождения студентами примерного теста, разбираются самые проблемные задания.

Авторы выражают уверенность, что самостоятельная работа студентов с примерным тестом-тренингом по изученному курсу будет способствовать более глубокому освоению теоретического и практического материала данного раздела курса общей физики.

**Пример теста-тренинга по курсу
«Молекулярная физика и термодинамика»**

1. Неравенство Клаузиуса гласит

- 1) энтропия замкнутой системы может либо возрасть (в случае необратимых процессов), либо оставаться постоянной (в случае обратимых процессов)
- 2) энтропия замкнутой системы всегда возрастает
- 3) энтропия замкнутой системы всегда остается неизменной
- 4) энтропия замкнутой системы может либо возрасть (в случае обратимых процессов), либо оставаться постоянной (в случае необратимых процессов)

2. Теплоемкостью вещества называется

- 1) величина, равная количеству теплоты, необходимому для нагревания 1 кг вещества на 1 К
- 2) величина, равная количеству теплоты, необходимому для нагревания 1 моля вещества на 1 К
- 3) величина, равная количеству теплоты, необходимому для нагревания вещества на 1 К
- 4) величина, равная изменению внутренней энергии 1 моля газа при повышении его температуры на 1 К

3. Работа газа для изотермического процесса определяется соотношением

- 1) $A = p(V_2 - V_1)$
- 2) $A = 0$
- 3) $A = \frac{m}{\mu} RT \ln \frac{V_2}{V_1}$
- 4) $A = \frac{m}{\mu} C_V (T_1 - T_2)$

4. Укажите правильное соотношение между физическими величинами и их формулами.

1) теплоемкость вещества $1) C = \frac{\delta Q}{v \cdot dT}$

2) удельная теплоемкость $2) C = \frac{\delta Q}{dT}$

3) молярная теплоемкость $3) c = \frac{\delta Q}{m \cdot dT}$

5. Единицей измерения показателя адиабаты является

1) Дж/К

2) безразмерная величина;

3) Дж/кг

4) Дж/моль

6. Единицей измерения внутренней энергии является

1) Дж

2) Н · м

3) Н · м²

4) Н/м

7. Укажите верную формулу связи между термодинамическими параметрами P , V , T .

1) $P = \frac{V}{T}$

2) $V = \frac{P}{T}$

3) $T = \frac{V}{P}$

4) $\frac{PV}{T} = \text{const}$

8. Укажите верную формулу, выражающую уравнение Менделеева – Клапейрона.

1) $PV = \text{const}$

2) $P = \frac{V}{T}$

3) $PV = \frac{m}{\mu} RT$

4) $V = \frac{P}{T}$

9. Укажите верную формулу, выражающую закон Бойля – Мариотта.

1) $PV = \text{const}$

2) $V = \frac{P}{T}$

3) $\frac{PV}{T} = \text{const}$

4) $T = \frac{V}{P}$

10. Укажите верную формулу, выражающую закон Дальтона.

1) $P = P_1 + P_2 + \dots + P_n$

2) $P = P_1 - P_2 - \dots - P_n$

3) $T = \frac{V}{P}$

4) $\frac{PV}{T} = \text{const}$

11. Укажите верную формулу связи между давлением, концентрацией и термодинамической температурой.

1) $P = nkT$

2) $PV = \text{const}$

3) $PV = NkT$

4) $\frac{PV}{T} = \text{const}$

12. Укажите верную формулу связи между универсальной газовой постоянной (R), постоянной Больцмана (k) и числом Авогадро (N_A).

1) $k = N_A R$

2) $k = \frac{R}{N_A}$

3) $R = N_A k$

4) $N_A = kR$

13. Укажите верную формулу связи между массой одной молекулы (m_0), числом Авогадро (N_A) и молярной массой (μ).

1) $\mu m_0 = N_A$

2) $\mu = \frac{m_0}{N_A}$

3) $\mu = m_0 N_A$

4) $N_A = \mu m_0$

14. Укажите верную формулу, выражающую закон Гей-Люссака.

- 1) $PV = \text{const}$
- 2) $\frac{V}{T} = \text{const}$
- 3) $T = \frac{V}{P}$
- 4) $\frac{P}{T} = \text{const}$

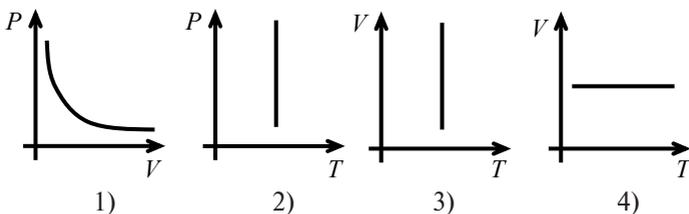
15. Укажите для изохорного процесса верную формулу связи между термодинамическими параметрами P , V , T .

- 1) $PV = \text{const}$
- 2) $V = \frac{P}{T}$
- 3) $T = \frac{V}{P}$
- 4) $\frac{P}{T} = \text{const}$

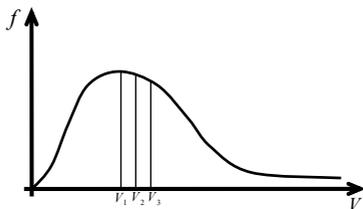
16. Укажите верную формулу связи между температурой по шкале Кельвина и температурой по шкале Цельсия.

- 1) $T = t + 273$
- 2) $T = t - 273$
- 3) $t = T + 273$
- 4) $t = T - 273$

17. Изотермический процесс изображен на рисунке



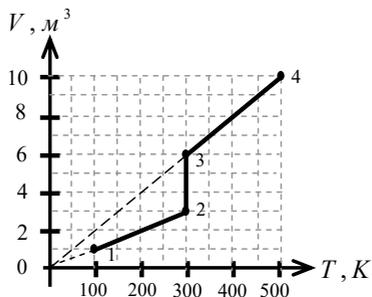
18. Укажите номер скорости, задающей правильное расположение на графике $f(V)$ наиболее вероятной скорости V_b .



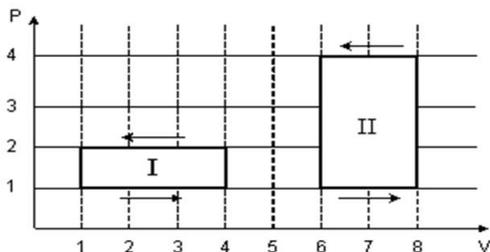
19. Число степеней свободы молекул кислорода равно _____

_____.

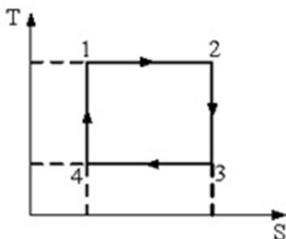
20. 1 кмоль одноатомного идеального газа расширяется при нагревании, как показано на рисунке. Давление газа в точке 1, выраженное с точностью до сотых долей МПа, равно _____.



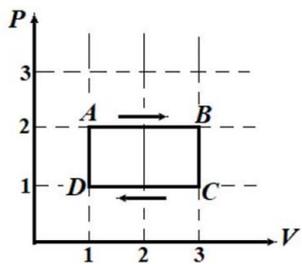
21. На диаграмме PV изображены два циклических процесса. Отношение работ, совершенных в каждом цикле A_I/A_{II} , равно _____.



22. На рисунке изображен цикл Карно в координатах (T, S) , где S — энтропия. Адиабатное сжатие происходит на этапе _____.



23. На диаграмме PV изображен циклический процесс. Как изменяется температура на участке BC – CD ?



РЕКОМЕНДУЕМАЯ ЛИТЕРАТУРА

1. Савельев, И. В. Курс физики. Учебное пособие. Том 1. Механика. Молекулярная физика / И. В. Савельев. — Изд. 10-е, стер. — Санкт-Петербург [и др.] : Лань, 2023. — 350, [1] с. — (Классическая учебная литература по физике). — URL: e.lanbook.com/book/324407 (дата обращения: 16.11.2023). — Режим доступа: по подписке. — ISBN 978-5-507-47075-4.
2. Савельев, И. В. Сборник вопросов и задач по общей физике = A collection of tasks and exercises in general physics : учеб. пособие для студентов вузов / И. В. Савельев. — Изд. 11-е, стер. — Санкт-Петербург [и др.] : Лань, 2023. — 288 с. — (Классическая учебная литература по физике). — URL: e.lanbook.com/book/297674 (дата обращения: 16.11.2023). — Режим доступа: по подписке. — ISBN 978-5-507-46106-6.
3. Открытая физика 2.6. Учебник. Часть 2 : полный интерактивный курс физики для учащихся школ, лицеев, гимназий, колледжей, студентов технических вузов / С. М. Козел, В. А. Орлов, А. Ф. Кавтрев [и др.] ; под ред. С. М. Козела. — Москва : Новый диск, 2005. — 1 CD-ROM. — ISBN 4607108472836.
4. Калашников, Н. П. Основы физики. Упражнения и задачи : учеб. пособие / Н. П. Калашников, М. А. Смондырев. — Москва : Дрофа, 2001. — 531 с.
5. Трофимова, Т. И. Курс физики : учеб. пособие для инженерно-технических специальностей вузов / Т. И. Трофимова. — 20-е изд., стер. — Москва : Академия, 2014. — 557, [1] с. — (Высшее профессиональное образование). — ISBN 978-5-4468-0627-0.
6. Чертов, А. Г. Задачник по физике / А. Г. Чертов, А. А. Воробьев. — 7-е изд., перераб. и доп. — Москва : Физматлит, 2001. — 640 с. — ISBN 5-94052-032-4.
7. Иродов, И. Е. Задачи по общей физике = Exercises in general physics : учеб. пособие для студентов вузов / И. Е. Иродов. — Изд. 18-е, стер. — Санкт-Петербург [и др.] : Лань, 2021. — 416 с. — (Классическая учебная литература по физике). — URL: e.lanbook.com/book/152437 (дата обращения: 16.11.2023). — Режим доступа: по подписке. — ISBN 978-5-8114-6779-2.

ГЛОССАРИЙ

Абсолютная влажность — парциальное давление водяных паров, содержащихся в воздухе, или количество водяных паров, содержащихся в 1 м^3 воздуха, выраженное в граммах.

Абсолютный ноль температур — температура, при которой прекращается тепловое движение молекул.

Агрегатное состояние вещества — состояния одного и того же вещества, переходы между которыми сопровождаются скачкообразным изменением ряда физических свойств.

Броуновское движение — беспорядочное движение малых частиц, взвешенных в жидкости или газе, происходящее под действием молекул.

Влажность — содержание водяного пара в воздухе.

Внутренняя энергия идеального одноатомного газа — суммарная кинетическая энергия теплового движения атомов газа.

Внутренняя энергия тела — сумма энергии хаотического (теплого) движения всех микрочастиц тела (молекул, атомов, ионов и т. д.) и энергии взаимодействия этих частиц.

Динамическое равновесие — процесс, при котором скорость парообразования равна скорости конденсации.

Диффузия — взаимное проникновение соприкасающихся веществ друг в друга вследствие теплового движения частиц.

Жидкость — агрегатное состояние вещества, промежуточное между твердым и газообразным. Жидкости сохраняют свой объем и принимают форму сосуда.

Закон Бойля — Мариотта. Для газа данной массы произведение давления на его объем постоянно, если его температура не меняется.

Закон Гей-Люссака. Для данной массы газа отношение его объема к абсолютной температуре постоянно, если давление газа не меняется.

Закон Шарля. Для данной массы газа отношение его давления к абсолютной температуре постоянно, если его объем не меняется.

Идеальный газ — модель, в которой не учитывается взаимодействие частиц и их собственный объем. Соударение частиц происходит по закону упругого взаимодействия.

Изобарический процесс — процесс изменения состояния термодинамической системы макроскопических тел при постоянном давлении.

Изопроцесс — процесс, протекающий в термодинамической системе с неизменной массой при постоянном значении одного из параметров состояния.

Изотермический процесс — процесс изменения состояния термодинамической системы макроскопических тел при постоянной температуре.

Изохорический процесс — процесс изменения состояния термодинамической системы при постоянном объеме.

Испарение — парообразование со свободной поверхности жидкости при любой температуре.

Кипение — процесс парообразования внутри и с поверхности жидкости при температуре кипения.

Количество вещества — отношение числа молекул в данном теле к числу атомов в 0,012 кг углерода.

Коэффициент полезного действия теплового двигателя — физическая величина, определяемая отношением работы A , совершенной тепловым двигателем за один цикл, к количеству теплоты Q_1 , полученной от нагревателя.

Критическая температура — температура, при которой исчезают различия в физических свойствах между жидкостью и ее насыщенным паром.

Молекула — наименьшая частица данного вещества, обладающая его основными химическими свойствами.

Молекулярно-кинетическая теория — теория, которая объясняет свойства макроскопических тел и тепловых процессов, протекающих в них, на основе представлений о том, что все тела состоят из отдельных беспорядочно движущихся частиц.

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

Молярная масса — масса одного моля вещества.

Молярная теплоемкость — физическая величина, показывающая, какое количество теплоты требуется для изменения температуры 1 моля вещества на 1 °С (1 К).

Насыщенный пар — пар, находящийся в термодинамическом равновесии с жидкостью того же состава.

Ненасыщенный пар — пар, находящийся при давлении ниже давления насыщенного пара.

Необратимый термодинамический процесс — процесс, который самопроизвольно может протекать только в одном направлении.

Обратимый термодинамический процесс — термодинамический процесс, который может происходить как в прямом, так и в обратном направлении, причем система возвращается в исходное положение, а в окружающей среде и самой системе не происходит никаких изменений.

Относительная влажность — отношение парциального давления p водяного пара, содержащегося в воздухе, к парциальному давлению P_0 насыщенного пара при той же температуре, выраженное в процентах.

Парообразование — процесс перехода вещества из жидкого или твердого состояния в газообразное.

Первый закон термодинамики (первая формулировка). Изменение внутренней энергии тела (системы) при переходе из одного состояния в другое равно сумме совершенной над телом работы и полученного им количества теплоты.

Первый закон термодинамики (вторая формулировка). Количество тепла, полученного телом (системой), расходуется на изменение внутренней энергии системы и на работу против внешних сил.

Постоянная Авогадро — физическая константа, численно равная количеству структурных элементов (атомов, молекул, ионов или других частиц) в одном моле вещества.

Температура — величина, характеризующая состояние термодинамического равновесия макроскопической системы и пропорциональная средней кинетической энергии частиц системы.

Температура кипения — температура жидкости, при которой давление ее насыщенного пара равно или превышает внешнее давление.

Тепловое движение — беспорядочное (хаотическое) движение микрочастиц, из которых состоят все тела.

Тепловой двигатель — устройство, в котором осуществляется преобразование внутренней энергии топлива в механическую.

Теплоемкость тела — количество теплоты, которое нужно сообщить данному телу, чтобы повысить его температуру на один градус.

Теплопередача — процесс изменения внутренней энергии без совершения работы над телом или самим телом.

Теплопроводность — передача тепла в телах, не сопровождаемая перемещением составляющих их частиц. При теплопроводности перенос энергии осуществляется в результате непосредственной передачи энергии от частиц (молекул, атомов, электронов), обладающих большей энергией, частицам с меньшей энергией.

Термодинамические параметры — физические величины, которые служат в термодинамике для характеристики состояния рассматриваемой системы.

Термодинамическое равновесие — состояние термодинамической системы, в которое она самопроизвольно приходит через достаточно большой промежуток времени в условиях изоляции от окружающей среды.

Термометр — прибор для измерения температуры посредством контакта его с исследуемой средой.

Удельная теплоемкость — физическая величина, показывающая, какое количество теплоты требуется для изменения температуры вещества массой 1 кг на 1 °С.

Удельная теплота парообразования — величина, показывающая, какое количество теплоты необходимо, чтобы обратить жидкость массой 1 кг в пар без изменения температуры.

Уравнение состояния идеального газа. Для данной массы газа произведение давления на объем, деленное на абсолютную температуру, есть величина постоянная.