

Министерство транспорта Российской Федерации
Федеральное агентство железнодорожного транспорта
Федеральное государственное бюджетное образовательное
учреждение высшего образования
«Дальневосточный государственный
университет путей сообщения»

Кафедра «Физика и теоретическая механика»

Н.А. Дейнекина, О.В. Кравченко

ФИЗИКА: ТЕРМОДИНАМИКА

Сборник задач

Рекомендовано
методическим советом
по качеству образовательной деятельности ДВГУПС
в качестве учебного пособия

Хабаровск
Издательство ДВГУПС
2017

УДК 536(075.8)
ББК В317.1 я73
Д 271

Рецензенты:

Кафедра «Физика, математика и информатика» ФГБОУ ВО ДВГМУ
(заведующий кафедрой кандидат физико-математических наук, доцент
А.С. Стукалова)

Кандидат физико-математических наук, доцент кафедры
«Общая физика» ФГБОУ ВО «КнАГТУ»
Н.А. Калугина

Дейнекина, Н.А.

Д 271 Физика: термодинамика : сборник задач. – Хабаровск : Изд-во
ДВГУПС, 2017. – 72 с.

Сборник задач соответствует рабочей программе дисциплины «Общая физика».

Включены основные положения и формулы из теории, примеры решения задач, задачи для самостоятельной работы и тесты для проверки освоения материала на итоговых контрольных работах, при защите расчетно-графических работ и экзаменах, литература по семи основным темам курса молекулярной физики и термодинамики.

Предназначается для аудиторной и самостоятельной работы студентов 1-го и 2-го курсов всех форм обучения технических специальностей вузов.

УДК 536(075.8)
ББК В317.1 я73

© ДВГУПС 2017

ВВЕДЕНИЕ

В вузовском образовании важным элементом является самостоятельная работа студентов, осуществляемая под руководством преподавателей.

Существующие сборники задач, как правило, охватывают все разделы Курса общей физики, и количество задач по отдельным разделам ограничено. В предлагаемом сборнике задач по основным темам данного курса подобрано не менее 30 задач. Сборник можно использовать как методическое пособие для расчетно-графических работ раздела «Термодинамика», для аудиторной работы, самостоятельной работы студентов, а также для проведения контроля знаний студентов.

В сборник включены разделы молекулярно-кинетической теории, так как для решения задач по термодинамике студентам необходимы знания основных законов молекулярно-кинетической теории.

Цель настоящего учебного пособия – оказать помощь студентам в самостоятельном изучении курса «Молекулярная физика и термодинамика» и приобретении навыков при решении физических задач.

В каждой главе приведены основные формулы раздела, примеры решения задач и перечень задач для самостоятельного решения. Для ориентации студента в изучаемом материале, при самостоятельной работе, в учебном пособии приведена рабочая программа по курсу «Молекулярная физика и термодинамика».

ОБЩИЕ МЕТОДИЧЕСКИЕ УКАЗАНИЯ К РЕШЕНИЮ ЗАДАЧ

Самостоятельное решение физических задач способствует формированию умений практического применения знаний, развитию у студентов инженерного мышления, без которого невозможна творческая работа на транспорте, промышленных предприятиях.

Прежде чем приступить к решению задачи, студент должен изучить данный раздел, используя учебные пособия и конспект лекций, дать ответы на вопросы по самоконтролю, разобрать примеры решения задач.

Самостоятельное решение задач целесообразно проводить в такой последовательности:

1. Внимательно прочитать условие задачи и сделать рисунок или схему, поясняющие сущность рассматриваемого физического явления.

2. Выяснить, каким законам подчиняется явление или процесс, о которых говорится в задаче. Составить план решения.

3. Решить задачу в общем виде, т. е. выразить искомую величину через буквенные обозначения величин, заданных в условии.

4. Подставить в правую часть полученной формулы вместо обозначения величин наименование их величин и проверить, получается ли в результате единица искомой величины.

5. Выразить числовые значения величин в СИ, подставить их в расчетную формулу и произвести вычисления. При этом надо соблюдать правила приближенных вычислений.

6. Оценить правдоподобность полученных результатов.

При оформлении типового расчета необходимо соблюдать следующие требования:

- номер задачи типового расчета определяется преподавателем;
- типовой расчет выполняется на отдельных листах;
- титульный лист типового расчета оформляется по образцу титульного листа к лабораторной работе;
- условие задачи в типовом расчете переписывается полностью;
- решение задачи начинается с краткой записи условия, где все физические величины записываются в СИ;
- решение задачи должно сопровождаться краткими, но исчерпывающими пояснениями.

1. ЗАКОНЫ ИДЕАЛЬНЫХ ГАЗОВ. МОЛЕКУЛЯРНО-КИНЕТИЧЕСКАЯ ТЕОРИЯ ГАЗОВ

1.1. Основные формулы и соотношения

- Уравнение Менделеева-Клапейрона (уравнение состояния идеального газа)

$$PV = \frac{m}{M}RT, \quad (1)$$

где P – давление газа; V – объем газа, m – масса газа; M – молекулярная масса газа; $R = 8,31 \frac{\text{Дж}}{\text{моль} \cdot \text{К}}$ – универсальная газовая постоянная;

T – абсолютная температура; $\nu = \frac{m}{M} = \frac{N}{N_A}$ – количество вещества, где

N – число молекул, $N_A = 6,02 \cdot 10^{23} \frac{1}{\text{моль}}$ – постоянная Авогадро.

- Закон Дальтона

$$P = \sum_{i=1}^n P_i, \quad (2)$$

где P – давление смеси газов, P_i – парциальное давление газов составляющих смесь.

- Плотность газа

$$\rho = \frac{m}{V}, \quad (3)$$

где m – масса газа, V – объем газа.

- Давление газа

$$P = nkT, \quad (4)$$

где $n = \frac{N}{V}$ – концентрация молекул, $k = 1,38 \cdot 10^{-23} \frac{\text{Дж}}{\text{К}}$ – постоянная

Больцмана.

- Кинетическая энергия одной молекулы

$$E_n = \frac{i}{2}kT, \quad (5)$$

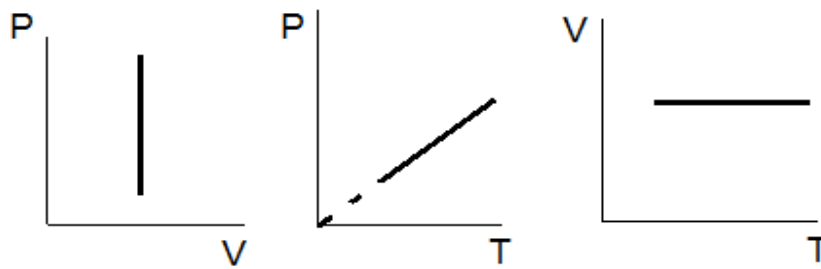
где i – число степеней свободы.

Изопроцессы:

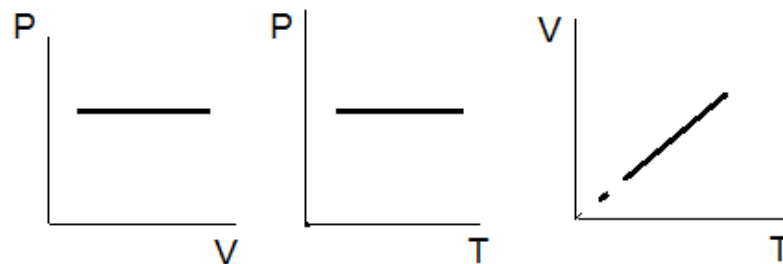
1) Изотермический ($T = const$), закон Бойля-Мариотта $PV = const$.



2) Изохорный ($V = const$), закон Шарля $\frac{P}{T} = const$.



3) Изобарный ($P = const$), закон Гей-Люссака $\frac{V}{T} = const$.



1.2. Примеры решения задач

Пример 1. Определить плотность смеси газов водорода массой 8 г и кислорода массой 64 г при температуре 290 К и давлении 0,1 Мпа. Газы считать идеальными.

Дано:

$$M_1 = 21 \cdot 10^{-3} \text{ кг/моль}$$

$$M_2 = 32 \cdot 10^{-3} \text{ кг/моль}$$

$$T = 290 \text{ К}$$

$$P = 10^5 \text{ Па}$$

$$m_1 = 8 \cdot 10^{-3} \text{ кг}$$

$$m_2 = 64 \cdot 10^{-3} \text{ кг}$$

$$\rho = ?$$

Решение. Плотность газа определяется по формуле

$$\rho = \frac{m}{V}, \quad (1)$$

где масса смеси определяется их суммой

$$m = m_1 + m_2.$$

Количество вещества смеси равно

$$V = V_1 + V_2 = \frac{m_1}{M_1} + \frac{m_2}{M_2}, \quad (2)$$

где M_1 и M_2 – молярные массы соответственно водорода и кислорода.

Уравнение Менделеева-Клапейрона для смеси газов

$$PV = \left(\frac{m_1}{M_1} + \frac{m_2}{M_2} \right) RT. \quad (3)$$

Определим объем смеси газов из уравнения (3)

$$V = \left(\frac{m_1}{M_1} + \frac{m_2}{M_2} \right) \frac{RT}{P}, \quad (4)$$

Подставив в формулу (1) значение объема (4), получим:

$$\rho = \frac{m}{V} = \frac{(m_1 + m_2)P}{\left(\frac{m_1}{M_1} + \frac{m_2}{M_2}\right)RT}$$

Проверим размерность:

$$[\rho] = \left[\frac{\text{кг} \cdot \text{Па}}{\text{моль} \cdot \text{К} \frac{\text{Дж}}{\text{моль} \cdot \text{К}}} \right] = \left[\frac{\text{кг} \cdot \text{Па}}{\text{Дж}} \right] = \left[\frac{\text{Н} \cdot \text{кг}}{\text{м}^2 \cdot \text{Н} \cdot \text{м}} \right] = \left[\frac{\text{кг}}{\text{м}^3} \right].$$

Произведем вычисления:

$$\rho = \frac{(8 \cdot 10^{-3} + 64 \cdot 10^{-3})10^5}{\left(\frac{8 \cdot 10^{-3}}{2 \cdot 10^{-3}} + \frac{64 \cdot 10^{-3}}{32 \cdot 10^{-3}}\right)8,31 \cdot 290} = 0,498 \frac{\text{кг}}{\text{м}^3}.$$

Ответ: плотность смеси $0,498 \frac{\text{кг}}{\text{м}^3}$.

Пример 2. В сосуде вместительностью 0,3 л при температуре 290 К находится некоторый газ. На сколько понизится давление газа в сосуде, если из него в результате утечки выйдет 10^{19} молекул?

Дано: $V = 310^{-4} \text{ м}^3$ *Решение.* Запишем уравнение Менделеева-Клапейрона для двух состояний газа

$T = 290 \text{ К}$
 $N = 10^{19}$

 $\Delta P = ?$

$$P_1 V = \frac{m_1}{M} RT, \quad P_2 V = \frac{m_2}{M} RT.$$

Определим давление газа в первом и во втором состояниях

$$P_1 = \frac{m_1 RT}{MV} \quad \text{и} \quad P_2 = \frac{m_2 RT}{MV}.$$

Изменение давления

$$\Delta P = P_1 - P_2 = \frac{(m_1 - m_2)RT}{MV}.$$

Число молекул покинувших сосуд

$$N = \frac{(m_1 - m_2)N_A}{M},$$

где $N_A = 6,02 \cdot 10^{23} \frac{1}{\text{моль}}$ – число Авогадро.

Следовательно $(m_1 - m_2) = \frac{NM}{N_A}$, подставив, это значение в формулу

изменения давления, получим

$$\Delta P = \frac{MNRT}{N_A MV} = \frac{NRT}{VN_A} = \frac{NkT}{V}.$$

Проверим размерность:

$$[\Delta P] = \left[\frac{NkT}{V} \right] = \left[\frac{\text{Дж} \cdot \text{К}}{\text{К} \cdot \text{м}^3} \right] = \left[\frac{\text{Н} \cdot \text{м}}{\text{м}^3} \right] = \text{Па}.$$

Произведем вычисления:

$$\Delta P = \frac{1,38 \cdot 10^{-23} \cdot 10^{19} \cdot 290}{3 \cdot 10^{-4}} = 133 \text{ Па}.$$

Ответ: давление газа понизилось на 133 Па.

Пример 3. В баллоне объемом 10 л находится гелий под давлением 1 МПа при температуре 300 К. После того как из баллона было израсходовано 10 г гелия, температура понизилась до 290 К. Определить давление гелия, оставшегося в баллоне.

Дано:

$$V = 10^{-2} \text{ м}^3$$

$$P_1 = 10^6 \text{ Па}$$

$$T_1 = 300 \text{ К}$$

$$\Delta m = 10^{-2} \text{ кг}$$

$$T_2 = 290 \text{ К}$$

$$P_2 = ?$$

Решение. Запишем уравнение Менделеева-Клапейрона для первого и второго состояний газа

$$P_1 V = \frac{m_1}{M} RT_1 \quad \text{и} \quad P_2 V = \frac{m_2}{M} RT_2.$$

Выразим массу газа в первом и во втором состояниях

$$m_1 = \frac{P_1 V M}{RT_1} \quad \text{и} \quad m_2 = \frac{P_2 V M}{RT_2}.$$

Масса израсходованного гелия:

$$\Delta m = m_1 - m_2 = \frac{P_1 V M}{RT_1} - \frac{P_2 V M}{RT_2},$$

Из этого уравнения выразим искомое давление:

$$P_2 = \left(\frac{P_1 V M}{RT_1} - \Delta m \right) \frac{RT_2}{V M} = \frac{P_1 T_2}{T_1} - \frac{\Delta m RT_2}{V M}.$$

Проверим размерность:

$$\left[\frac{mRT_2}{MV} \right] = \left[\frac{\frac{\text{кг} \cdot \frac{\text{Дж}}{\text{К} \cdot \text{моль}} \cdot \text{К}}{\frac{\text{кг}}{\text{моль}} \cdot \text{м}^3}} \right] = \left[\frac{\text{Дж}}{\text{м}^3} \right] = \left[\frac{\text{Н} \cdot \text{м}}{\text{м}^3} \right] = \text{Па}.$$

Произведем вычисления:

$$P_2 = \frac{290}{300} \cdot 10^6 - \frac{10^{-2} \cdot 8,31 \cdot 290}{4 \cdot 10^{-3} \cdot 10^{-2}} = 3,67 \cdot 10^5 \text{ Па}.$$

Ответ: давление газа, оставшегося в сосуде равно $3,67 \cdot 10^5 \text{ Па}$.

1.3. Задачи

101. Баллон емкостью 0,5 л, содержащий воздух при нормальных условиях, герметически закрывают, после чего нагревают до температуры 400 °С. Определить давление воздуха в баллоне при этой температуре. На сколько процентов увеличится давление газа в нагретом сосуде, если перед герметизацией в него попадает 99 г воды? ($2,4 \cdot 10^5$ Па; 220 %).

102. В баллоне емкостью V_1 находится азот, а в баллоне емкостью V_2 – водород. Давление и температура газов соответственно равна $P_1, T_1; P_2, T_2$. Баллоны соединяют трубкой пренебрежимо малого объема. Считая оба газа идеальными, найти установившееся давление P смеси после того, как в обоих баллонах газ примет температуру T окружающей среды. ($P = (\frac{P_1 V_1}{T_1} + \frac{P_2 V_2}{T_2}) \cdot \frac{T}{(V_1 + V_2)}$).

103. Плотность газа при давлении 96 кПа и температуре 0 °С равна $1,35 \frac{\text{г}}{\text{л}}$. Найти молярную массу газа. Какой это газ? Определить массу одной молекулы. ($32 \cdot 10^{-3} \frac{\text{кг}}{\text{моль}}$; $5,32 \cdot 10^{-26}$ кг).

104. Какой объем занимает смесь азота массой 1 кг и гелия массой 1 кг при нормальных условиях? ($6,48 \text{ м}^3$).

105. В баллоне объемом 15 л находится смесь, содержащая 10 г водорода, 54 г водяного пара и 60 г окиси углерода. Температура смеси 27 °С. Определить давление. ($1,56 \cdot 10^6$ Па).

106. В цилиндр длиной 1,6 м, заполненный воздухом, при нормальном атмосферном давлении начинают медленно вдвигать поршень площадью основания 200 см^2 . Определить силу, действующую на поршень, если его остановить на расстоянии 10 см от дна цилиндра. ($3 \cdot 10^4 \text{ Н}$).

107. Баллон объемом 20 л заполнен азотом при температуре 400 К. Когда часть газа израсходовали, давление в баллоне понизилось на 200 кПа. Определить массу израсходованного газа. Процесс изотермический. ($3,3 \cdot 10^{-2}$ кг).

108. В баллоне объемом 15 л находится аргон под давлением 600 кПа и при температуре 300 К. Когда из баллона взяли некоторое количество газа, давление в баллоне понизилось до 400 кПа, а температура установилась 260 К. Определить массу аргона, взятого из баллона. (0,28 кг).

109. Вычислить плотность азота, находящегося в баллоне под давлением 2 МПа и имеющего температуру 400 К. Чему равна масса одной молекулы азота? ($16,8 \frac{\text{кг}}{\text{м}^3}$; $4,65 \cdot 10^{-26}$ кг).

110. В сосуде объемом 40 л находится кислород при температуре 300 К. Когда часть газа израсходовали, давление в баллоне понизилось на 100 кПа. Определить массу израсходованного кислорода. Процесс считать изотермическим. Какое количество молекул кислорода вышло из сосуда. ($5 \cdot 10^{-2}$ кг; $9,4 \cdot 10^{23}$).

110. Один баллон объемом 10 л содержит кислород под давлением 1,5 МПа, другой баллон объемом 22 л содержит азот под давлением 0,6 МПа. Когда баллоны соединили между собой, оба газа смешались, образовав однородную смесь (без изменения температуры). Найти парциальные давления обоих газов и полное давление смеси. ($0,47 \cdot 10^6$ Па; $0,41 \cdot 10^6$ Па; $0,88 \cdot 10^6$ Па).

112. Смесь водорода и азота общей массой 290 г при температуре 600 К и давлении 2,46 МПа занимает объем 30 л. Определить массу водорода и азота. (0,01 кг; 0,28 кг).

113. В баллоне объемом $22,4 \cdot 10^{-3} \text{ м}^3$ находится водород при нормальных условиях. После того как в баллон было дополнительно введено некоторое количество гелия, давление в баллоне возросло до 0,2 МПа, а температура не изменилась. Определить массу гелия, введенного в баллон. ($1,9 \cdot 10^{-3}$ кг).

114. Смесь состоит из $\frac{1}{9}$ доли водорода и $\frac{8}{9}$ доли кислорода. Найти плотность такой смеси газов при температуре 300 К и давлении 0,2 МПа. ($1,35 \frac{\text{кг}}{\text{м}^3}$)

115. Смесь кислорода и азота находится в сосуде под давлением 1,2 МПа. Определить парциальные давления газов, если массовая доля кислорода в смеси равна 20 %. ($0,22 \cdot 10^6$ МПа; $0,98 \cdot 10^6$ МПа).

116. Азот массой 7 г находится под давлением 0,1 МПа и температуре 290 К. Вследствие изобарного нагревания азот занял объём 10 л. Определить: объём газа до расширения; температуру газа после расширения; плотность газа до и после расширения. ($6,02 \cdot 10^{-3} \text{ м}^{-3}$; 481К; $1,16 \text{ кг/м}^3$; $0,7 \text{ кг/м}^3$).

117. 10 г кислорода находится под давлением 3 атм. при температуре 0 °С. После расширения вследствие нагревания при постоянном давлении кислород занял объем 10 л. Найти: 1) объем газа до расширения; 2) температуру газа после расширения; 3) плотность газа до расширения; 4) плотность газа после расширения. ($2,4 \cdot 10^{-3} \text{ м}^3$; 1170К; $4,14 \frac{\text{кг}}{\text{м}^3}$; $1 \frac{\text{кг}}{\text{м}^3}$).

118. В запаянном сосуде находится вода, занимающая объем, равный половине объема сосуда. Найти давление и плотность водяных паров при температуре $400\text{ }^{\circ}\text{C}$, зная, что при этой температуре вся вода обращается в пар. ($1,55 \cdot 10^6\text{ Па}$; $500 \frac{\text{кг}}{\text{м}^3}$).

119. В запаянном сосуде объемом 1 м^3 находится $0,9\text{ кг}$ воды и $1,6\text{ кг}$ кислорода. Найти давление в сосуде при температуре $500\text{ }^{\circ}\text{C}$, зная, что при этой температуре вся вода превращается в пар. ($6,4 \cdot 10^3\text{ Па}$).

120. В сосуде объемом $V_1 = 3\text{ л}$ находится газ под давлением $P_1 = 0,2\text{ МПа}$. В сосуде объемом $V_2 = 4\text{ л}$ находится тот же газ под давлением $P_2 = 0,1\text{ МПа}$. Температура в обоих сосудах одинакова. Под каким давлением будет находиться газ, если сосуда соединить трубкой? ($1,4 \cdot 10^5\text{ Па}$).

121. В сосуде находится 14 г азота и 9 г водорода при температуре $10\text{ }^{\circ}\text{C}$ и давлении 1 МПа . Найти: 1) молярную массу смеси; 2) объем сосуда. ($4,6 \cdot 10^{-3} \frac{\text{кг}}{\text{моль}}$; $11,7 \cdot 10^{-3}\text{ м}^3$).

122. В сосуде объемом $0,5\text{ л}$ находится 1 г парообразного йода. При температуре $1000\text{ }^{\circ}\text{C}$ давление в сосуде оказалось равным 700 мм рт. ст. Найти степень диссоциации молекул йода J_2 на атомы J при этих условиях. Молярная масса йода $M_2 = 0,254 \frac{\text{кг}}{\text{моль}}$. ($0,12$).

123. Считая, что в воздухе содержится $23,6\%$ кислорода и $76,4\%$ азота, найти плотность воздуха при давлении 750 мм рт. ст. и температуре $13\text{ }^{\circ}\text{C}$. Найти парциальное давление кислорода и азота при этих условиях. ($1,2 \frac{\text{кг}}{\text{м}^3}$; 21 кПа ; 79 кПа).

124. Вертикально расположенный цилиндр, закрытый с обеих сторон, разделен тяжелым теплонепроницаемым поршнем на две части; обе части сосуда содержат одинаковое количество воздуха. При одинаковой температуре воздуха в обеих частях $T_1 = 400\text{ К}$ давление P_2 в нижней части сосуда вдвое больше давления P_1 в верхней части. До какой температуры T_2 надо нагреть воздух в нижней части сосуда, что бы объемы верхней и нижней частей стали одинаковыми? (700 К).

125. Идеальный одноатомный газ в количестве $\nu = 0,09\text{ моль}$ находится в равновесии в вертикальном цилиндре под поршнем массой $m = 5\text{ кг}$. Трение между поршнем и стенками цилиндра отсутствует. Внешнее атмосферное давление $P_0 = 100\text{ кПа}$. В результате нагревания

газа поршень поднялся на высоту $\Delta h = 4$ см, а температура газа повысилась на $\Delta T_1 = 16$ К. Чему равна площадь поршня? (25 см^2).

126. Поршни двух одинаковых цилиндров связаны между собой жесткой тягой так, что объемы под поршнями равны. Под поршнями находится одинаковое количество газа при температуре T_0 . Каково будет давление в цилиндрах, если один из них нагреть до температуры T_1 , а второй охладить до температуры T_2 ? Чему будет равно при этом относительное изменение объема газа в каждом цилиндре? Весом поршней и тяги пренебречь, трение не учитывать, атмосферное давление P_0 .

$$\left(x = \frac{2T_0 - T_1 - T_2}{2T_0} \right).$$

127. По газопроводной трубе идет углекислый газ под давлением $P = 392$ кПа при температуре $T = 280$ К. Какова средняя скорость движения газа в трубе, если через поперечное сечение трубы, равное $S = 5 \text{ см}^2$, за $t = 10$ мин протекает газ массой $m = 20$ кг? (9 м/с).

128. Если давление, под которым находится газ, изменить на 200 Па, то объем газа изменится на 3 л. Если давление изменить на 500 Па, то объем изменится на 5 л. Каковы были начальный объем и давление газа? Температура газа во время опыта не менялась. ($P_0 = 400$ кПа; $V_0 = 9$ л).

129. В U-образную манометрическую трубку с сечением 1 см^2 налита ртуть; уровни ртути в обоих коленах одинаковы. Объем воздуха в запаянном колене 10 см^3 . Сколько ртути нужно налить в открытое колено, чтобы его наполнить? Атмосферное давление равно $1,01$ кПа, оба колена манометра одинаковы. (150 г).

130. Давление воздуха внутри плотно закупоренной бутылки при температуре 280 К было равно 100 кПа. На сколько нужно нагреть бутылку, чтобы из нее вылетела пробка, если известно, что из холодной бутылки без нагревания пробку можно вынуть силой 10 Н? Сечение пробки 4 см^2 . (70 К).

131. Теплоизолированный сосуд разделен теплопроводящей перегородкой на две камеры. Камеры заполняют одинаковыми газами, начальные температуры и давления которых соответственно T_1, P_1 и T_2, P_2 . Каково будет отношение давлений газа в камерах после того, как процесс теплообмена закончится? Теплоемкостью сосуда и перегородки пренебречь.

$$\left(n = \frac{P_1 T_2}{P_2 T_1} \right).$$

132. Сколько баллонов водорода емкостью 50 л при давлении $40,5$ МПа и температуре 300 К потребуется для наполнения аэростата объемом 1000 м^3 , если давление в нем при температуре 280 К должно

быть равно 98 кПа? Изменится ли ответ, если водород выпускать не сразу из всех баллонов, а поочередно, сначала из одного баллона, потом из другого и т. д.? ($N = 530$).

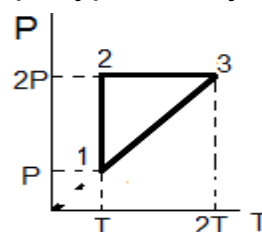
133. Запаянная с одного конца трубка длиной l опущена в воду так, что над поверхностью воды выступает $1/5$ ее длины и уровень воды в трубке совпадает с уровнем ее в сосуде. До какой температуры нужно нагреть воздух в трубке, чтобы из нее вышла вся вода? Атмосферное давление P_0 . Начальная температура T_1 . Изменением уровня воды в сосуде пренебречь. $\left(T = \frac{(5P_0 + 4\rho g l)T_1}{P_0} \right)$.

134. Вертикальный цилиндр, закрытый с обоих торцов, разделен поршнем. По обе стороны поршня находится по одному молю воздуха при температуре 300 К. Отношение объема верхней части цилиндра к объему нижней равно 4. При какой температуре отношение этих объемов равно 3? (420 К).

135. Нагревается или охлаждается газ, если он расширяется по закону $PV^2 = const$. ($T_2 < T_1$).

136. Баллон вместимостью 50 л наполнили воздухом до давления 10 Мпа. Какой объем воздуха можно вытеснить из цистерны подводной лодки с помощью этого баллона на глубине 40 м. Температура воздуха не меняется. (950 л).

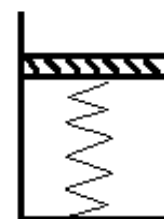
137. На рисунке показан цикл, совершаемый над газом. Определите отношение максимальной плотности газа к его минимальной плотности, достигаемых в ходе этого цикла. $\left(\frac{\rho_{\max}}{\rho_{\min}} = 2 \right)$.



К задаче 137

138. Вертикально расположенный замкнутый цилиндрический сосуд высотой 50 см разделен подвижным поршнем весом 110 Н на две части, в каждой из которых содержится одинаковое количество водорода при температуре 361 К. Сколько молей газа находится в каждой части цилиндра, если поршень находится на высоте 20 см от дна сосуда? Толщиной поршня пренебречь. (0,022 моль).

139. В вертикально расположенном цилиндре находится кислород массой 64 г, отделенный от атмосферы поршнем, который соединен с дном цилиндра пружиной жесткостью 8300 Н/м. При температуре 300 К поршень располагается на расстоянии 1 м от дна цилиндра. До какой температуры надо нагреть кислород, чтобы поршень расположился на высоте 1,5 м от дна цилиндра? (487 К).



К задаче 139

140. В горизонтально расположенной трубке постоянного сечения, запаянной с одного конца, помещен столбик ртути длиной 15 см, который отделяет воздух в трубке от атмосферы. Трубку расположили вертикально запаянным концом вниз. На сколько градусов следует нагреть воздух в трубке, что бы объем, занимаемый воздухом, стал прежним? Температура воздуха в лаборатории 300 К, а атмосферное давление 750 мм.рт.ст (60 К).

1.4. Контрольный тест

1. К основным положениям молекулярно-кинетической теории относятся следующие положения:

а) все тела состоят из мельчайших частиц – атомов, молекул или ионов, находящихся в непрерывном хаотическом движении, которое называется тепловым движением;

б) тепловое движение частиц вещества в различных агрегатных состояниях не одинаково. Оно зависит от сил притяжения и отталкивания, действующих между атомами, молекулами и ионами;

в) совокупность огромного множества молекул имеет такие свойства, каких нет у каждой молекулы в отдельности;

г) в любом агрегатном состоянии тела не являются сплошными. Тело нельзя разделить на сколь угодно малые части.

д) между частицами тела действуют силы гравитации.

2. Указать критерии идеальности газа:

а) при соударении молекулы такого газа ведут себя как абсолютно упругие шарики исчезающе малых размеров;

б) между молекулами такого газа отсутствуют силы взаимного притяжения;

в) плотность такого газа столь мала, что средняя длина свободного пробега его молекул может быть сравнима с линейными размерами d сосуда, в котором находится газ;

г) молекулы такого газа изменяют свои импульсы только при взаимодействии со стенками сосуда, в котором этот газ находится;

д) это газ без примесей.

3. Уравнение состояния идеального газа:

а) $P = \frac{1}{3} m_0 n v^2$; б) $PV = \frac{m}{M} RT$; в) $PV = const$; г) $P = \rho gh$.

4. Основное уравнение молекулярно-кинетической теории газов:

а) $P = \frac{1}{3} m_0 n v^2$; б) $PV = \frac{m}{M} RT$; в) $PV = const$; г) $P = \rho gh$.

5. Выберите макроскопические параметры, которые необходимы для записи уравнения состояния идеального газа:

а) P, N, m ; б) P, V, T ; в) n, V, T .

6. Связь между термодинамическими параметрами при изохорическом процессе выглядит:

а) $PV = const$; б) $\frac{P}{T} = const$; в) $\frac{V}{T} = const$.

7. Связь между термодинамическими параметрами при изобарическом процессе выглядит:

а) $PV = const$; б) $\frac{P}{T} = const$; в) $\frac{V}{T} = const$.

8. Связь между термодинамическими параметрами при изотермическом процессе выглядит:

а) $PV = const$; б) $\frac{P}{T} = const$; в) $\frac{V}{T} = const$.

9. Термодинамическими параметрами (параметрами состояния) термодинамической системы являются:

- а) температура; б) плотность; в) давление; г) удельный объем;
д) теплоемкость.

10. Изотермическим процессом термодинамической системы называют процесс перехода из одного состояния в другое при каком-то одном постоянном параметре:

а) $P = const$; б) $T = const$; в) $V = const$.

11. Изохорным процессом термодинамической системы называют процесс перехода системы из одного состояния в другое при какой-то одной постоянной величине:

а) $P = const$; б) $T = const$; в) $V = const$.

12. Изобарным процессом термодинамической системы называют процесс перехода системы из одного состояния в другое при какой-то одной постоянной величине:

а) $P = const$; б) $T = const$; в) $V = const$.

13. При повышении температуры идеального газа обязательно увеличится:

- а) давление газа;
б) концентрация молекул;
в) число молей газа.

14. Как изменится давление идеального одноатомного газа при увеличении его объёма в 3 раза и уменьшении температуры в 2 раза.

- а) увеличится в 6 раз;
б) уменьшится в 6 раз;
в) останется прежним.

15. Абсолютная температура тела равна 300 К. По шкале Цельсия она равна

а) $-27\text{ }^{\circ}\text{C}$; б) $27\text{ }^{\circ}\text{C}$; в) $300\text{ }^{\circ}\text{C}$; г) $573\text{ }^{\circ}\text{C}$.

16. Температура твердого тела понизилась на $17\text{ }^{\circ}\text{C}$. По абсолютной шкале температур это изменение составило

а) 290 K ; б) 256 K ; в) 17 K ; г) 0 K .

17. Отношение молярной массы к массе молекулы вещества – это:

а) число Авогадро;

б) газовая постоянная;

в) число электронов в атоме вещества;

г) число атомов в молекуле вещества.

18. В баллоне находится газ, количество вещества которого равно 6 моль. Сколько примерно молекул газа находится в баллоне?

а) $6 \cdot 10^{23}$; б) $12 \cdot 10^{23}$; в) $36 \cdot 10^{23}$; г) $36 \cdot 10^{26}$.

19. В периодической системе элементов Д. И. Менделеева в клеточке, где указан гелий, стоят числа 2 и $4,00$. На основе этих данных определите, чему примерно равна масса $6 \cdot 10^{23}$ атомов гелия.

а) 2 г ; б) 4 кг ; в) $0,004\text{ кг}$; г) $24 \cdot 10^{23}\text{ г}$.

20. Молярная масса неона $0,02\text{ кг/моль}$, масса атома аргона в 2 раза больше массы атома неона. На основе этих данных определите, чему равна молярная масса аргона.

а) не может быть вычислена;

б) равна $0,01\text{ кг/моль}$;

в) равна $0,04\text{ кг/моль}$;

г) равна $0,24 \cdot 10^{23}\text{ кг/моль}$.

21. В результате нагревания газа средняя кинетическая энергия теплового движения его молекул увеличилась в 4 раза. Как изменилась при этом абсолютная температура газа?

а) увеличилась в 4 раза;

б) увеличилась в 2 раза;

в) уменьшилась в 4 раза;

г) не изменилась

22. При неизменной абсолютной температуре концентрация молекул идеального газа была увеличена в 4 раза. При этом давление газа:

а) увеличилось в 4 раза;

б) увеличилось в 2 раза;

в) уменьшилось в 4 раза;

г) не изменилось.

23. При неизменной концентрации молекул гелия средняя кинетическая энергия теплового движения его молекул увеличилась в 4 раза. При этом давление газа:

а) увеличилось в 16 раз;

б) увеличилось в 2 раза;

в) увеличилось в 4 раза;

г) не изменилось.

24. Кислород находится в сосуде вместимостью $0,4 \text{ м}^3$ под давлением $8,3 \cdot 10^5 \text{ Па}$ и при температуре 320 К . Чему равна масса кислорода?

- а) 2 кг ; б) $0,4 \text{ кг}$; в) 4 кг ; г) $2 \cdot 10^{-23} \text{ кг}$.

25. Азот массой $0,3 \text{ кг}$ при температуре 280 К оказывает давление на стенки сосуда, равное $8,3 \cdot 10^4 \text{ Па}$. Чему равен объем газа?

- а) $0,3 \text{ м}^3$; б) $3,3 \text{ м}^3$; в) $0,6 \text{ м}^3$; г) 60 м^3 .

26. На V - T -диаграмме приведены графики изменения состояния идеального газа. Изохорному процессу соответствует линия графика

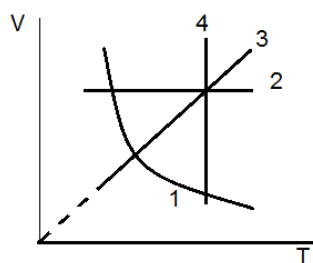
- а) 1; б) 2; в) 3; г) 4.

27. На рисунке показаны графики четырех процессов изменения состояния идеального газа. Изотермическим расширением является процесс

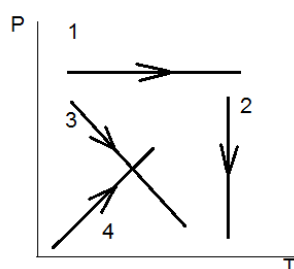
- а) 1; б) 3; в) 2; г) 4.

28. На рисунке показаны графики четырех процессов изменения состояния идеального газа. Изохорным охлаждением является процесс

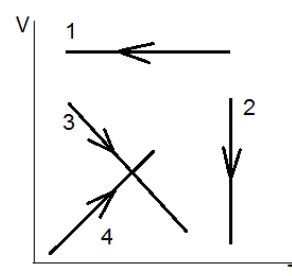
- а) 1; б) 3; в) 2; г) 4.



К тесту 26



К тесту 27



К тесту 28

29. Определите плотность азота при температуре $27 \text{ }^\circ\text{C}$ и давлении 100 кПа . Газовая постоянная $R = 8,31 \frac{\text{Дж}}{\text{мольК}}$, молярная масса азота

$$\mu = 28 \cdot 10^{-3} \frac{\text{кг}}{\text{моль}}.$$

- а) $113 \frac{\text{кг}}{\text{м}^3}$; б) $12,5 \frac{\text{кг}}{\text{м}^3}$; в) $1,12 \frac{\text{кг}}{\text{м}^3}$; г) $1,3 \frac{\text{кг}}{\text{м}^3}$.

30. Приведите в соответствие формулы и их смысл:

Количество вещества	N/V
Концентрация молекул	m/V
Масса молекулы	m/μ
Плотность вещества	μ/N_a

2. СТАТИСТИЧЕСКИЕ ЗАКОНОМЕРНОСТИ

2.1. Основные формулы

При своем движении молекулы идеального газа, сталкиваясь друг с другом, беспорядочно меняют как величину, так и направление своей скорости. Тем не менее, для характеристики состояния движения всей совокупности огромного числа молекул, пользуются понятиями:

1) наиболее вероятной скорости v_B ; 2) средней арифметической скорости v_{cp} ; 3) средней квадратичной скорости $v_{кв}$.

- Наиболее вероятная скорость

$$v_B = \sqrt{\frac{2RT}{M}} = \sqrt{\frac{2kT}{m_0}}.$$

- Средняя арифметическая скорость

$$v_{cp} = \sqrt{\frac{8RT}{\pi \cdot M}} = \sqrt{\frac{8kT}{\pi \cdot m_0}}.$$

- Средняя квадратичная скорость

$$v_{кв} = \sqrt{\frac{3RT}{M}} = \sqrt{\frac{3kT}{m_0}},$$

где R – универсальная газовая постоянная; T – абсолютная температура газа; M – масса одного моля газа; $k = 1,38 \cdot 10^{-23} \frac{\text{Дж}}{\text{К}}$ – постоянная Больцмана, m_0 – масса одной молекулы газа.

- Средняя длина свободного пробега молекул газа

$$\lambda_{cp} = \frac{v_{cp}}{z_{cp}} = \frac{1}{\sqrt{2}\pi d^2 n},$$

где v_{cp} – средняя арифметическая скорость молекул; z_{cp} – среднее число столкновений молекулы с остальными в единицу времени; d – эффективный диаметр молекулы; n – число молекул в единице объема.

- Закон Максвелла распределения молекул по скоростям:

$$\Delta N = \frac{4}{\sqrt{\pi}} N U^2 e^{-U^2} \Delta U,$$

где ΔN – число молекул относительные скорости которых находятся в интервале от U до $U + \Delta U$, N – общее число молекул, $U = \frac{v}{v_B}$ – относительная скорость, отношение скорости молекулы v к наиболее вероятной скорости v_B .

2.2. Примеры решения задач

Пример 1. Средняя длина свободного пробега молекулы углекислого газа при нормальных условиях равна 40 нм. Какова средняя арифметическая скорость молекул. Сколько столкновений в секунду испытывает молекула?

Дано: *Решение.* Средняя арифметическая скорость v_{cp} молекулы определяется по формуле

$$P_0 = 1,01 \cdot 10^5 \text{ Па}$$

$$T = 273 \text{ К}$$

$$\lambda_{cp} = 40 \cdot 10^{-9} \text{ м}$$

$$v_{cp} = \sqrt{\frac{8RT}{M\pi}},$$

$v_{cp} = ?$, $Z = ?$ где $R = 8,31 \frac{\text{Дж}}{\text{моль} \cdot \text{К}}$ – универсальная газовая постоянная,

$M = 44 \cdot 10^{-3} \frac{\text{кг}}{\text{моль}}$ – молярная масса углекислого газа.

Проверим размерность

$$[v_{cp}] = \sqrt{\frac{\text{Дж}}{\text{моль} \cdot \text{К}} \cdot \text{К} \cdot \frac{\text{моль}}{\text{кг}}} = \sqrt{\frac{\text{кг} \cdot \text{м}^2}{\text{с}^2 \cdot \text{кг}}} = \frac{\text{м}}{\text{с}}.$$

Выполним расчет

$$[v_{cp}] = \frac{\sqrt{8 \cdot 8,31 \cdot 273}}{3,14 \cdot 44 \cdot 10^{-3}} = 362 \frac{\text{м}}{\text{с}}.$$

Число столкновений молекулы в секунду Z_{cp} определим по формуле

$$Z_{cp} = \frac{v_{cp}}{\lambda_{cp}}, \text{ где } \lambda_{cp} \text{ – средняя длина свободного пробега молекулы.}$$

Подставим значения величин в формулу и получим

$$Z_{cp} = \frac{362}{40 \cdot 10^{-9}} = 9,05 \cdot 10^9 \text{ с}^{-1}.$$

Ответ: средняя арифметическая скорость молекул углекислого газа $362 \frac{\text{м}}{\text{с}}$. Молекула испытывает $9,05 \cdot 10^9$ столкновений в секунду.

Дано:

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

$$m = 0,3 \text{ кг} = 3 \cdot 10^{-4} \text{ кг}$$

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

$$v_{kv} = ?$$

Пример 2. Колба объемом 2 л содержит некоторый газ, массой 0,3 г под давлением 200 кПа. Определить среднюю квадратичную скорость молекул газа.

Решение. Средняя квадратичная скорость может быть найдена из уравнения

$$v_{kv} = \sqrt{\frac{3RT}{M}}. \quad (1)$$

Для нахождения температуры воспользуемся уравнение Менделеева-Клапейрона $PV = \frac{m}{M}RT$, из которого определим

$$T = \frac{PVM}{mR}. \quad (2)$$

Подставив выражение (2) в уравнение средней квадратичной скорости (1), получим

$$v_{кв} = \sqrt{\frac{3PV}{m}}.$$

Проверим размерность $[v] = \left[\sqrt{\frac{\text{Па} \cdot \text{м}^3}{\text{кг}}} \right] = \left[\sqrt{\frac{\text{кг} \cdot \text{м} \cdot \text{м}^3}{\text{с}^2 \cdot \text{м}^2 \cdot \text{кг}}} \right] = \left[\frac{\text{м}}{\text{с}} \right].$

Произведем расчет

$$v_{кв} = \sqrt{\frac{3 \cdot 2 \cdot 10^5 \cdot 2 \cdot 10^{-3}}{3 \cdot 10^{-4}}} = 2 \cdot 10^3 \frac{\text{м}}{\text{с}}.$$

Ответ: средняя квадратичная скорость равна 2000 м/с.

Дано:

$$v_{кв} = 500 \frac{\text{м}}{\text{с}}$$

$$v_{ср} = ?$$

Пример 3. Определить среднюю арифметическую скорость молекул газа, если их средняя квадратичная скорость $v_{кв} = 500 \frac{\text{м}}{\text{с}}$.

Решение. Для определения средней арифметической скорости воспользуемся выражением

$$v_{ср} = \sqrt{\frac{8RT}{\pi M}}. \quad (1)$$

Поскольку средняя квадратичная скорость равна

$$v_{кв} = \sqrt{\frac{3RT}{M}}, \text{ то } \sqrt{\frac{RT}{M}} = \frac{v_{кв}}{\sqrt{3}}.$$

Подставим это выражение в формулу средней скорости (1)

$$v_{ср} = v_{кв} \sqrt{\frac{8}{3\pi}}.$$

Произведем вычисления: $v_{ср} = 0,92 \cdot 500 = 460 \text{ (м/с)}$.

Ответ: средняя скорость равна 460 м/с.

2.3. Задачи

201. Найти плотность газа, давление которого на стенки сосуда равно $1,01 \cdot 10^5 \text{ Па}$, а средняя квадратичная скорость его молекул равна $1,92 \cdot 10^3 \frac{\text{м}}{\text{с}}$. ($0,082 \frac{\text{кг}}{\text{м}^3}$).

202. Вычислить концентрацию молекул кислорода, если их средняя квадратичная скорость $400 \frac{\text{м}}{\text{с}}$, а давление газа 760 мм рт.ст. ($3,6 \cdot 10^{23} \text{м}^{-3}$).

203. Чему равна масса газа, заключенного в сосуде объемом 2 л, под давлением 300 кПа, если средняя квадратичная скорость молекул газа равна $2 \cdot 10^3 \text{м/с}$? ($3 \cdot 10^{-4} \text{кг}$).

204. В азоте взвешены мельчайшие пылинки, массой 10^{-10}г , которые движутся как крупные молекулы. Температура газа $20 \text{ }^\circ\text{С}$. Определить наиболее вероятные скорости молекул азота и пылинки. (417м/с ; $2,8 \cdot 10^{-4} \text{м/с}$).

205. Найти наиболее вероятную скорость молекул газа, если средняя арифметическая скорость этих молекул при данных условиях равна 500м/с . ($221,5 \text{м/с}$).

206. При нагревании кислорода средняя арифметическая скорость молекул увеличилась от $350 \frac{\text{м}}{\text{с}}$ до $400 \frac{\text{м}}{\text{с}}$. До какой температуры нагрели газ? На сколько увеличилась температура газа? ($241,8 \text{К}$; $56,68 \text{К}$).

207. Определить массу молекулы газа, если наиболее вероятная скорость молекулы при температуре $22 \text{ }^\circ\text{С}$ равна $1,05 \cdot 10^3 \frac{\text{м}}{\text{с}}$. ($1,4 \cdot 10^{-26} \text{кг}$).

208. При изобарическом охлаждении средняя арифметическая скорость молекул газа уменьшилась вдвое. Как при этом изменилась наиболее вероятная скорость? ($v_{1в} = 2v_{2в}$).

209. Определить среднюю квадратичную скорость молекулы газа, заключенного в сосуд объемом 2 л под давлением 200 кПа. Масса газа 0,3 г. ($2 \cdot 10^3 \text{м/с}$).

210. Средняя арифметическая скорость молекул кислорода увеличилась от $500 \frac{\text{м}}{\text{с}}$ до $700 \frac{\text{м}}{\text{с}}$. Во сколько раз изменилась температура газа? ($T_2 = 2,25 T_1$).

211. Смесь гелия и аргона находится при температуре 1200 К. Определить среднюю квадратичную скорость атомов гелия и аргона. ($2734 \frac{\text{м}}{\text{с}}$; $864 \frac{\text{м}}{\text{с}}$).

212. В азоте взвешены мельчайшие частички, которые движутся так, как если бы они были очень крупными молекулами. Масса каждой пылинки равна $6 \cdot 10^{-10} \text{г}$. Газ находится при температуре 400 К. Определить средние квадратичные скорости движения молекулы азота и пылинки, а также во сколько раз наиболее вероятная скорость азота больше пылинки? ($5,97 \cdot 10^2 \text{м/с}$; $1,66 \cdot 10^{-4} \text{м/с}$; $1,14 \cdot 10^6 \text{Дж}$).

213. Какое давление надо создать внутри сферического сосуда, диаметр которого равен: 1) 1 см; 2) 10 см и 3) 100 см, чтобы молекулы не сталкивались друг с другом? Диаметр молекулы газа принять равным $3 \cdot 10^{-8}$ см, а температуру газа равной 0°C . (931 МПа; 93,1 МПа; 9,31 МПа).

214. Средняя квадратичная скорость молекул некоторого газа при нормальных условиях равна $480 \frac{\text{М}}{\text{с}}$. Сколько молекул содержится в 1 г этого газа? ($2,04 \cdot 10^{22}$).

215. Определить давление оказываемое газом на стенки сосуда, если его плотность равна $0,01 \frac{\text{кг}}{\text{м}^3}$, а средняя квадратичная скорость молекул газа составляет $480 \frac{\text{М}}{\text{с}}$. (768 Па).

216. Определить наиболее вероятную скорость молекул газа, плотность которого при давлении 40 кПа составляет $0,35 \frac{\text{кг}}{\text{м}^3}$. ($478 \frac{\text{М}}{\text{с}}$).

217. В сферической колбе объемом в 1 л находится азот. При какой плотности азота средняя длина свободного пробега молекул азота больше размеров сосуда? ($9,4 \cdot 10^{-7} \frac{\text{кг}}{\text{м}^3}$).

218. При какой температуре средняя квадратичная скорость молекул кислорода больше их наиболее вероятной скорости на $100 \frac{\text{М}}{\text{с}}$. (381 К).

219. В сосуде объемом 5 л находится водород под давлением 1 атм при температуре 300 К. Найти число молекул газа, скорости которых отличаются от наиболее вероятной скорости не больше чем на $5 \frac{\text{М}}{\text{с}}$. ($6 \cdot 10^{20}$).

220. Используя закон распределения молекул идеального газа по скоростям, найти формулу наиболее вероятной скорости. ($v_e = \sqrt{\frac{2KT}{m_0}}$).

221. Используя закон распределения молекул по скоростям найти формулу средней квадратичной скорости. ($v_{кв} = \sqrt{\frac{3KT}{m_0}}$).

222. При какой температуре средняя квадратичная скорость атомов гелия станет равной второй космической скорости. ($20,1 \cdot 10^3 \text{ К}$).

223. При температуре 0°C и некотором давлении средняя длина свободного пробега молекул кислорода равна $9,5 \cdot 10^{-8}$ м. Чему равно среднее число столкновений в 1 секунду молекул кислорода, если сосуд

откачать до 0,01 первоначального давления? Температура остается неизменной. ($4,5 \cdot 10^7 \text{ с}^{-1}$).

224. При изохорном нагревании давление водорода увеличилось в 1,44 раза. Как и во сколько раз увеличилась средняя квадратичная скорость молекул водорода? ($V_2 = 1,2 V_1$).

225. Найти среднее время между двумя последовательными столкновениями молекул азота при температуре 10°C и давлении 1 мм рт. ст. ($1,6 \cdot 10^{-7} \text{ с}$).

226. На сколько изменится импульс молекулы водорода, если температура газа увеличивается от 300 К до 600 К? ($2,67 \cdot 10^{-24} \frac{\text{КГ} \cdot \text{М}}{\text{С}}$).

227. Определить массу частицы, имеющей импульс, равный $3,95 \cdot 10^{-18} \frac{\text{КГ} \cdot \text{М}}{\text{С}}$, движущейся со скоростью, равной скорости молекул кислорода при температуре 300 К. ($0,8 \cdot 10^{-20} \text{ КГ}$).

228. Определить импульс пылинки массой 10^{-18} г , движущейся со скоростью, равной средней квадратичной скорости молекул углекислого газа при температуре -23°C . ($3,68 \cdot 10^{-17} \frac{\text{КГ} \cdot \text{М}}{\text{С}}$).

229. Плотность некоторого газа равна $6 \cdot 10^{-2} \frac{\text{КГ}}{\text{М}^3}$, а средняя квадратичная скорость молекул этого газа равна $500 \frac{\text{М}}{\text{С}}$. Найти давление газа на стенки сосуда. ($5 \cdot 10^5 \text{ Па}$).

230. Колба емкостью 4 л содержит 0,6 г водорода под давлением $2 \cdot 10^5 \text{ Па}$. Определить среднюю квадратичную скорость молекул газа. ($2 \cdot 10^3 \frac{\text{М}}{\text{С}}$).

231. Сосуд с воздухом откачан до давления $10^{-6} \text{ мм рт. ст.}$ Чему равны при этом плотность воздуха в сосуде, число молекул в 1 см^3 сосуда и средняя длина свободного пробега молекул? Диаметр молекул воздуха считать равным $3 \cdot 10^{-8} \text{ см}$ и массу одного моля $M = 29 \cdot 10^{-3} \frac{\text{КГ}}{\text{Моль}}$. Температура воздуха равна 17°C . ($1,6 \cdot 10^{-9} \frac{\text{КГ}}{\text{М}^3}$; $3,3 \cdot 10^{16} \text{ м}^{-3}$; 76 м).

232. Найти среднюю длину свободного пробега молекул водорода при давлении 0,1 Па и температуре 100 К. Чему равна наиболее вероятная скорость молекул. $\left(6,4 \text{ см}; 910 \frac{\text{м}}{\text{с}}\right)$.

233. При каком давлении средняя длина свободного пробега молекул азота равна 1 м, если температура газа 300 К? Какова скорость молекул азота? $\left(3,5 \cdot 10^{-3} \text{ Па}; 517 \frac{\text{м}}{\text{с}}\right)$.

234. Баллон емкостью 10 л содержит водород массой 1 г. Определить концентрацию, среднюю длину свободного пробега молекул и количество молекул в баллоне. $\left(3,01 \cdot 10^{25} \text{ м}^{-3}; 1,4 \cdot 10^{-7} \text{ м}; 3,01 \cdot 10^{23}\right)$.

235. Какое предельное число молекул газа может находиться в 1 см³ сферического сосуда, диаметр которого равен 15 см, чтобы молекулы не сталкивались друг с другом? Диаметр молекулы газа принять равным $3 \cdot 10^{-8} \text{ см}$. $\left(1,7 \cdot 10^{19}\right)$.

236. Найти среднюю длину свободного пробега атомов гелия в условиях, когда плотность гелия $\rho = 2,1 \cdot 10^2 \frac{\text{кг}}{\text{м}^3}$. $\left(1,8 \text{ мкм}\right)$.

237. Чему равна средняя длина свободного пробега молекул водорода при давлении $P = 10^{-3} \text{ мм рт. ст.}$ и температуре 50 °С? $\left(14,2 \text{ см}\right)$.

238. При некоторых условиях средняя длина свободного пробега молекул газа равна $1,6 \cdot 10^{-7} \text{ м}$ и средняя арифметическая скорость его молекул равна $1,95 \frac{\text{км}}{\text{сек}}$. Чему будет равно среднее число столкновений в 1 сек молекул этого газа, если при той же температуре давление газа уменьшить в 1,27 раза? $\left(9,5 \cdot 10^9 \text{ с}^{-1}\right)$.

239. В колбе объемом 100 см³ находится 0,5 г азота. Найти среднюю длину свободного пробега молекул азота при этих условиях. $\left(23 \text{ нм}\right)$.

240. В сосуде находится углекислый газ, плотность которого $\rho = 1,7 \frac{\text{кг}}{\text{м}^3}$; средняя длина свободного пробега его молекул при этих условиях равна $\lambda_{\text{ср}} = 7,9 \cdot 10^{-6} \text{ см}$. Найти диаметр молекул углекислого газа. $\left(0,35 \text{ нм}\right)$.

2.4. Контрольный тест

1. Число степеней свободы i двухатомного газа равно:

а) $i = 2$; б) $i = 3$; в) $i = 5$; г) $i = 6$; д) $i = 7$.

2. Число степеней свободы i трехатомного газа равно:

а) $i = 2$; б) $i = 3$; в) $i = 5$; г) $i = 6$; д) $i = 7$.

3. Число степеней свободы i одноатомного газа равно:

а) $i = 2$; б) $i = 3$; в) $i = 5$; г) $i = 6$; д) $i = 7$.

4. Какая энергия приходится на каждую степень свободы?

а) $\langle \varepsilon_0 \rangle = \frac{1}{3} kT$; б) $\langle \varepsilon_0 \rangle = \frac{1}{2} kT$; в) $\langle \varepsilon_0 \rangle = kT$; г) $\langle \varepsilon_0 \rangle = \frac{3}{2} kT$.

5. Средняя энергия молекулы определяется....

а) $\langle \varepsilon_0 \rangle = \frac{i}{2} kT$; б) $\langle \varepsilon_0 \rangle = \frac{i}{3} kT$; в) $\langle \varepsilon_0 \rangle = \frac{3}{2} kT$; г) $\langle \varepsilon_0 \rangle = \frac{i}{2} kT$.

6. Средняя длина свободного пробега молекул газа

а) $\lambda_{cp} = \frac{1}{\sqrt{2}\pi d^2 n}$; б) $\lambda_{cp} = \frac{1}{d^2 n}$; в) $\lambda_{cp} = \frac{1}{\sqrt{2}n}$; г) $\lambda_{cp} = \frac{1}{\sqrt{2}d^2}$.

7. Приведите в соответствие формулы и их смысл:

Наиболее вероятная скорость молекулы	$\langle v \rangle = \sqrt{\frac{8RT}{\pi\mu}}$
Средняя квадратичная скорость молекулы	$\langle \varepsilon_0 \rangle = \frac{3}{2} kT$
Средняя арифметическая скорость молекулы	$v_{кв} = \sqrt{\frac{3RT}{\mu}}$
Средняя кинетическая энергия поступательного движения молекулы	$v_{с} = \sqrt{\frac{2RT}{\mu}}$

8. Приведите в соответствие формулы и их смысл:

Средняя кинетическая энергия вращательного движения двухатомной молекулы	$\varepsilon = \frac{3}{2} kT$
Средняя кинетическая энергия поступательного движения, приходящаяся на одну степень свободы молекулы	$\varepsilon = \frac{i}{2} kT$
Средняя кинетическая энергия поступательного движения молекулы	$\varepsilon = \frac{1}{2} kT$
Средняя энергия молекулы	$\varepsilon = kT$

9. Средняя длина свободного пробега молекул газа

а) $\lambda_{cp} = \frac{1}{\sqrt{2}\pi d^2 n}$; б) $\lambda_{cp} = \frac{1}{d^2 n}$; в) $\lambda_{cp} = \frac{1}{\sqrt{2}n}$; г) $\lambda_{cp} = \frac{1}{\sqrt{2}d^2}$.

10. Закон Максвелла распределения молекул по скоростям:

а) $\Delta N = \frac{4}{\sqrt{\pi}} e^{-U^2} \Delta U$; в) $\Delta N = \frac{4}{\sqrt{\pi}} NU$;

б) $\Delta N = \frac{4}{\sqrt{\pi}} NU^2 e^{-U^2} \Delta U$; г) $\Delta N = \frac{4}{\sqrt{\pi}} NU^2 \Delta U$.

3. ПЕРВОЕ НАЧАЛО ТЕРМОДИНАМИКИ

3.1. Основные формулы

- Первое начало термодинамики:

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

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

- Работа, совершаемая газом:

- ✓ при изобарическом процессе ($P = \text{const}$)

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

- ✓ при изотермическом процессе ($T = \text{const}$)

$$A = \frac{m}{M} \cdot RT \ln(V_2 / V_1).$$

- ✓ при адиабатическом процессе ($Q = 0$)

$$A = \frac{i}{2} \frac{m}{M} R(T_1 - T_2) \text{ или } A = \frac{RT_1}{\gamma - 1} \left[1 - \left(\frac{V_1}{V_2} \right)^{\gamma - 1} \right],$$

где i – число степеней свободы молекул, T_1 – начальная температура, T_2 – конечная температура, $\gamma = \frac{i+2}{i}$ – показатель адиабаты;

- ✓ при изохорическом процессе ($V = \text{const}$)

$$A = 0.$$

- Внутренняя энергия идеального газа

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

• Связь между начальными и конечными значениями параметров состояний газа при адиабатическом процессе

$$\frac{P_2}{P_1} = \left(\frac{V_1}{V_2} \right)^\gamma; \quad \frac{T_2}{T_1} = \left(\frac{V_1}{V_2} \right)^{\gamma-1}; \quad \frac{T_2}{T_1} = \left(\frac{P_2}{P_1} \right)^{\frac{\gamma-1}{\gamma}},$$

где $\gamma = \frac{i+2}{i}$ показатель адиабаты.

3.2. Примеры решения задач

Пример 2. Кислород занимает объем $V_1 = 1 \text{ м}^3$ и находится под давлением $P_1 = 200 \text{ кПа}$. Газ нагрели сначала при постоянном давлении до объема $V_2 = 3 \text{ м}^3$, а затем при постоянном объеме до давления $P_2 = 500 \text{ кПа}$. Построить график процесса и найти: изменение внутренней энергии ΔU газа, совершенную им работу A и количество теплоты Q , переданное газу.

Дано:

$$V_1 = 1 \text{ м}^3$$

$$V_2 = 3 \text{ м}^3$$

$$P_1 = 200 \text{ кПа}$$

$$P_2 = 500 \text{ кПа}$$

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

Решение: 1) Построим график процесса. На графике рисунок точками 1, 2, 3 обозначены состояния газа, характеризующиеся параметрами (P_1, V_1, T_1) , (P_2, V_2, T_2) и (P_3, V_3, T_3)

2) Изменение внутренней энергии газа при переходе из состояния 1 в 3 выражается формулой.

$$\Delta U = C_V m(T_3 - T_1), \quad (1)$$

где $C_V = \frac{i R}{2 M}$ – удельная теплоёмкость при постоянном объеме, T_1 и T_3 – температуры, соответственно, начального и конечного состояния газа, i – число степеней свободы газа (для кислорода $i = 5$).

Температуры T_1 и T_3 выразим из уравнения Менделеева–Клапейрона

$$PV = \frac{m}{M} RT.$$

$$T_1 = \frac{MP_1V_1}{mR}, \quad T_3 = \frac{MP_2V_2}{mR}.$$

С учётом этого уравнения (1) переписывается в виде

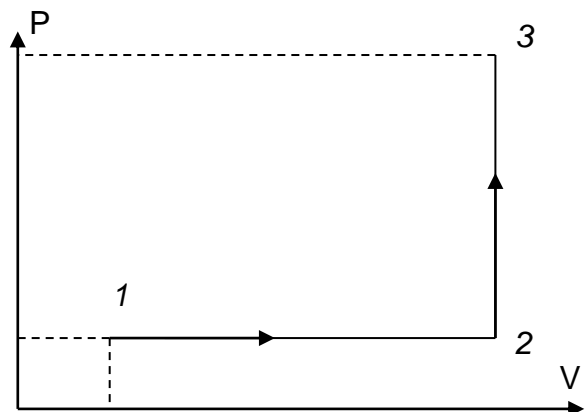
$$\Delta U = \frac{i R}{2 M} \left(\frac{MP_2V_2}{mR} - \frac{MP_1V_1}{mR} \right) \cdot m = \frac{i}{2} (P_2V_2 - P_1V_1).$$

Проверим размерность

$$[\Delta U] = \left[\text{Па} \cdot \text{м}^3 = \frac{\text{Н}}{\text{м}^2} \cdot \text{м}^3 \right] = \text{Дж}.$$

Произведём вычисления

$$\Delta U = \frac{5}{2} (5 \cdot 10^5 \cdot 3 - 2 \cdot 10^5) \text{ Па} \cdot \text{м}^3 = 3,25 \cdot 10^6 \text{ Дж}.$$



3) Полная работа, совершаемая газом равно

$$A = A_1 + A_2,$$

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

На участке 1-2 процесс изобарический, значит $A_1 = P_1(V_2 - V_1)$, на участке 2-3 процесс изохорический ($\Delta V = 0$), значит $A_2 = 0$.

Таким образом

$$A = A_1 = P_1(V_2 - V_1).$$

Произведём вычисления работы A

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

4) Согласно первому закону термодинамики

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

Произведём вычисления работы количества теплоты Q

$$Q = 3,25 \cdot 10^6 + 0,4 \cdot 10^6 = 3,65 \cdot 10^6 \text{ Дж}.$$

Ответ: изменение внутренней энергии $3,25 \cdot 10^6$ Дж; совершаемая работа $4 \cdot 10^5$ Дж; количество теплоты переданное газу $3,65 \cdot 10^6$ Дж.

Пример 3. В закрытом сосуде находится смесь азота массой 56 г и кислорода массой 64 г. Определить изменение внутренней энергии этой смеси, если ее охладили на 20°C .

Дано:

$$m_1 = 0,056 \text{ кг}$$

$$m_2 = 0,064 \text{ кг}$$

$$M_1 = 28 \cdot 10^{-3} \text{ кг/моль}$$

$$M_2 = 32 \cdot 10^{-3} \text{ кг/моль}$$

$$\Delta T_2 = 20 \text{ К}$$

$$\Delta U = ?$$

Решение. Изменение внутренней энергии определяется по формуле

$$\Delta U = \nu \cdot C_V \cdot \Delta T,$$

где ν – число молей вещества, $C_V = \frac{i}{2} R$ – молярная теплоемкость вещества.

Количество вещества смеси газов равно

$$\nu = \nu_1 + \nu_2, \text{ где } \nu_1 = \frac{m_1}{M_1} - \text{число молей азота и}$$

$$\nu_2 = \frac{m_2}{M_2} - \text{число молей кислорода.}$$

Тогда изменение внутренней энергии смеси газов определим по формуле

$$\Delta U = \Delta U_1 + \Delta U_2 = \frac{m_1}{M_1} C_{1V} \cdot \Delta T + \frac{m_2}{M_2} C_{2V} \cdot \Delta T.$$

Число степеней свободы у молекул азота и кислорода одинаково и равно 5, следовательно, $C_{1V} = C_{2V}$.

Проверим размерность:

$$[\Delta U] = \left[\frac{\text{кг} \cdot \text{Дж} \cdot \text{моль} \cdot \text{К}}{\text{кг} \cdot \text{моль} \cdot \text{К}} \right] = \text{Дж}$$

Подставим в формулу числовые значения величин и вычислим изменение внутренней энергии

$$\Delta U = \left(\frac{56}{28} + \frac{64}{32} \right) \frac{5}{2} \cdot 8,31 \cdot 20 = 1660 \text{ Дж.}$$

Ответ: изменение внутренней энергии 1660 Дж.

Пример 4. Азот, находившийся при температуре 400 К, подвергли адиабатному расширению, в результате которого его объем увеличился в $n = 5$ раз, а его внутренняя энергия уменьшилась на 4 кДж. Определить массу азота.

Дано:

$$M = 28 \cdot 10^{-3} \frac{\text{кг}}{\text{моль}}$$

$$i = 5$$

$$T_1 = 400 \text{ К}$$

$$V_2 = 5V_1$$

$$\Delta U = -4 \text{ кДж}$$

$$m = ?$$

Решение. Согласно первому закону термодинамики $Q = \Delta U + A$, но при адиабатическом процессе $Q = 0$. Следовательно для адиабатического процесса

$$A = -\Delta U. \quad (1)$$

Работа при адиабатическом процессе может быть определена по формуле:

$$A = \frac{m}{M} \frac{RT_1}{\gamma - 1} \left[1 - \left(\frac{V_1}{V_2} \right)^{\gamma - 1} \right], \quad (2)$$

где $\gamma = \frac{i+2}{i} = 1,4$ – показатель адиабаты для азота.

Подставив (2) в (1), получим выражение

$$\frac{m}{M} \frac{RT_1}{(\gamma - 1)} \left[1 - \left(\frac{V_1}{V_2} \right)^{\gamma - 1} \right] = -\Delta U. \quad (3)$$

Из формулы (3) выразим массу азота

$$m = - \frac{M(\gamma - 1)\Delta U}{RT_1 \left[1 - \left(\frac{V_1}{V_2} \right)^{\gamma - 1} \right]} = - \frac{M(\gamma - 1)\Delta U}{RT_1 \left[1 - \left(\frac{1}{n} \right)^{\gamma - 1} \right]}. \quad (4)$$

Проверим размерность: $[m] = \left[\frac{\text{кг} \cdot \text{Дж} \cdot \text{К} \cdot \text{моль}}{\text{Дж} \cdot \text{К} \cdot \text{моль}} \right] = [\text{кг}]$.

Подставим в формулу (4) числовые значения и вычислим массу азота.

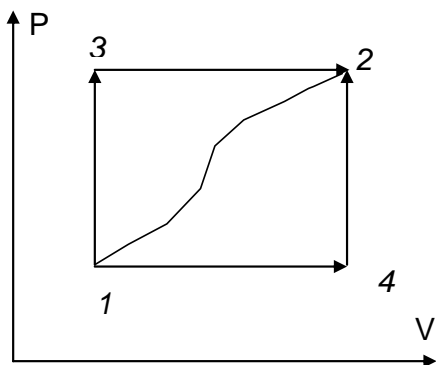
$$m = \frac{28 \cdot 10^{-3} (1,4 - 1) 4 \cdot 10^3}{8,31 \cdot 400 \left[1 - \left(\frac{1}{5} \right)^{1,4-1} \right]} = 28 \cdot 10^{-3} \text{ кг}.$$

Ответ: масса азота $28 \cdot 10^{-3}$ кг.

3.3. Задачи

301–330. В цилиндре с подвижным поршнем, объёмом V_1 содержится газ, под давлением P_1 и температуре T_1 . Первоначально газ переводят в состояние, с параметрами P_2 , V_2 и T_2 , а затем в состояние с параметрами P_3 , V_3 и T_3 . Определить изменение внутренней энергии газа ΔU , работу совершаемую газом A и количество полученной теплоты Q в результате этих двух процессов. Построить диаграмму этих процессов в осях $P-V$. Данные к задаче, по своему варианту, взять в *табл. 1*. *Примечание:* $\Delta U_1, A_1, Q_1$ – соответственно изменение внутренней энергии, работа и количество теплоты, полученное газом при совершении первого процесса. $\Delta U_2, A_2, Q_2$ – соответственно изменение внутренней энергии, работа и количество теплоты, полученное газом при совершении второго процесса.

331. Смешано 4,032 г водорода с 32 г кислорода. Определить уменьшение внутренней энергии этой смеси при охлаждении ее на 20°C при постоянном объеме. (1,25 кДж).



К задаче 332

332. На диаграмме изображенной на рисунке, показаны различные обратимые процессы изменения состояния некоторой термодинамической системы. Известно, что когда система переходит из состояния 1 в состояние 2 по пути 132, то она получает 80 Дж тепла и при этом совершает работу 30 Дж. Какое количество тепла получит система, переходя из состояния 1 в состояние 2 по пути 142, если известно, что при этом она совершает работу 10 Дж? (60 Дж).

333. Некоторую массу азота сжали в 5 раз (по объему) один раз адиабатически, другой раз изотермически. Начальное состояние газа в

обоих случаях одинаково. Найти отношение соответствующих работ, затраченное на сжатие. $\left(\frac{A_1}{A_2} = 3,6\right)$.

Таблица 1

№ варианта	Газ	Масса газа (г)	V ₁ (л)	P ₁ (Па)	T ₁ (К)	V ₂ (л)	P ₂ (Па)	T ₂ (К)	V ₃ (л)	P ₃ (Па)	T ₃ (К)	ΔU ₁ (Дж)	ΔU ₂ (Дж)	ΔU (Дж)	A ₁ (Дж)	A ₂ (Дж)	A (Дж)	Q ₁ (Дж)	Q ₂ (Дж)	Q ₃ (Дж)
1	H ₂	2	10	2,43·10 ⁵	293	10	–	303	20	–	–	–	0	?	–	–	?	–	–	?
2	O ₂	4	3	8·10 ⁴	–	–	10 ⁵	–	–	10 ⁴	–	0	–	?	–	0	?	–	–	?
3	N ₂	7	–	–	300	–	10 ⁵	350	–	10 ⁵	400	–	–	?	0	–	?	–	–	?
4	H _e	4	10	20,78·10 ⁴	–	8	20,78·10 ⁴	200	–	10 ⁵	–	–	0	?	–	–	?	–	–	?
5	CO	14	–	–	273	–	–	313	–	–	300	–	–	?	0	–	?	–	0	?
6	CO ₂	11	5	4·10 ⁵	240,7	6	10 ⁵	–	–	3·10 ⁵	–	–	–	?	–	0	?	0	–	?
7	H ₂	1	1	2·10 ⁵	–	4	2·10 ⁵	200	6	–	–	–	–	?	–	–	?	–	0	?
8	O ₂	8	–	–	273	–	8,31·10 ⁵	200	3	8,31·10 ⁵	–	–	–	?	–	–	?	0	–	?
9	N ₂	4	–	–	400	3	8,31·10 ⁵	300	6	–	–	–	0	?	–	–	?	0	–	?
10	H _e	2	–	–	293	–	10 ⁵	353	–	10 ⁵	300	–	–	?	–	–	?	0	–	?
11	CO	7	6	10 ⁵	–	4	10 ⁵	–	–	5·10 ⁴	–	–	–	?	–	0	?	–	–	?
12	CO ₂	4	–	–	293	2	14,13·10 ⁵	340	4	–	–	–	0	?	–	–	?	0	–	?
13	H ₂	2	4	10 ⁵	–	2	2,64·10 ⁵	100	–	–	200	–	–	?	–	0	?	0	–	?
14	O ₂	16	5	10 ⁵	–	4	1,25·10 ⁵	–	2	1,25·10 ⁵	–	0	–	?	–	–	?	–	–	?
15	N ₂	28	6	10 ⁵	–	–	2·10 ⁵	–	3	5,28·10 ⁵	–	–	–	?	0	–	?	–	0	?
16	H _e	1	8	10 ⁵	–	4	2·10 ⁵	100	–	–	273	–	–	?	–	–	?	–	0	?
17	CO	28	2	10 ⁵	–	4	–	–	–	2·10 ³	–	0	–	?	–	0	?	–	–	?
18	CO ₂	44	–	10 ⁵	273	–	10 ⁵	373	–	–	300	–	–	?	–	0	?	–	–	?
19	H ₂	2	20	1,22·10 ⁵	–	40	2,44·10 ⁵	–	60	2,44·10 ⁵	–	0	–	?	–	–	?	–	–	?
20	O ₂	32	–	–	293	–	–	273	–	–	323	–	–	?	–	0	?	0	–	?
21	N ₂	28	1	4·10 ⁵	–	2	2·10 ⁵	–	4	7,58·10 ⁴	–	0	–	?	–	–	?	–	0	?
22	H _e	4	6	10 ⁵	–	4	–	150	–	–	300	0	–	?	–	–	?	–	0	?
23	CO	2	4	2·10 ⁵	–	–	10 ⁵	–	2	10 ⁵	–	–	–	?	0	–	?	–	–	?
24	CO ₂	2	1	4·10 ⁵	–	–	10 ⁶	–	–	–	300	–	–	?	0	0	?	–	–	?
25	H ₂	1	–	–	273	–	–	313	–	–	300	–	–	?	0	–	?	–	0	?
26	O ₂	8	–	–	273	2	8,31·10 ⁵	200	–	8,31·10 ⁵	400	–	–	?	–	–	?	0	–	?
27	N ₂	28	–	–	293	–	10 ⁵	353	–	10 ⁵	300	–	–	?	0	–	?	–	–	?
28	H _e	4	6	10 ⁵	–	4	10 ⁵	–	–	5·10 ⁴	–	–	–	?	–	0	?	–	–	?
29	CO	2	1	24,35·10 ⁵	293	1	–	303	2	12,59·10 ⁵	–	–	0	?	–	–	?	–	–	?
30	CO ₂	4	–	10 ⁵	273	–	10 ⁵	373	–	–	300	–	–	?	–	0	?	–	–	?

334. Идеальный одноатомный газ количеством вещества 1 моль совершает процесс, при котором давление растет пропорционально объему по закону $P = \alpha V$. Газу сообщили количество теплоты 33,2 Дж. На сколько изменяется температура газа? ($\Delta T = 2\text{K}$)

335. В вакууме закреплен горизонтальный цилиндр с поршнем. В цилиндре находится 0,1 моль гелия. Поршень удерживается упорами и может скользить влево вдоль стенок цилиндра без трения. В поршень попадает пуля массой 10 г, летящая горизонтально со скоростью 400 м/с, и застревает в нем. Температура гелия в момент остановки поршня в крайнем левом положении возрастает на 64 К. Какова масса поршня? Считать, что за время движения поршня газ не успевает обменяться теплом с поршнем и цилиндром. (90 г).

336. В горизонтальном цилиндрическом сосуде, закрытом поршнем, находится одноатомный идеальный газ. Первоначальное давление газа $p_1 = 4 \cdot 10^5$ Па. Расстояние от дна сосуда до поршня равно L . Площадь поперечного сечения поршня $S = 25$ см². В результате медленного нагревания газ получил количество теплоты $Q = 1,65$ кДж, а поршень сдвинулся на расстояние $x = 10$ см. При движении поршня на него со стороны стенок сосуда действует сила трения величиной $F_{\text{тр}} = 3 \cdot 10^3$ Н. Найдите L . Считать, что сосуд находится в вакууме. ($L = 30$ см).

337. Газообразный водород массой $m = 1$ кг при начальной температуре $T_1 = 300$ К охлаждают изохорически так, что его давление падает в 3 раза. Затем газ расширяют при постоянном давлении. Найти произведенную газом работу, если в конечном состоянии его температура оказалась равной первоначальной. $\left(A = \frac{(\eta - 1)mRT_1}{\eta M} = 8,3 \cdot 10^5 \text{ Дж} \right)$.

3.4. Контрольный тест

1. Внутренняя энергия монеты увеличится, если ее

- а) нагреть;
- б) заставить двигаться с большей скоростью;
- в) поднять над поверхностью Земли;
- г) опустить в воду той же температуры.

2. Идеальный газ получил количество теплоты, равное 300 Дж, и совершил работу, равную 100 Дж. Как изменилась при этом внутренняя энергия газа?

- а) увеличилась на 400 Дж;
- б) увеличилась на 200 Дж;
- в) уменьшилась на 400 Дж;
- г) уменьшилась на 200 Дж.

3. Идеальный газ совершил работу, равную 100 Дж, и отдал количество теплоты, равное 300 Дж. При этом внутренняя энергия газа:

- а) увеличилась на 400 Дж;
- б) увеличилась на 200 Дж;
- в) уменьшилась на 400 Дж;
- г) уменьшилась на 200 Дж.

4. Идеальный газ совершил работу, равную 300 Дж. При этом внутренняя энергия его уменьшилась на 300 Дж. В этом процессе газ:

- а) отдал 600 Дж; в) получил 300 Дж;
- б) отдал 300 Дж; г) не отдавал и не получал теплоты.

5. Как изменяется внутренняя энергия идеального газа при его изотермическом расширении?

- а) увеличивается;
- б) увеличивается или уменьшается в зависимости от скорости изменения объема;
- в) уменьшается;
- г) не изменяется.

6. В каком тепловом процессе внутренняя энергия идеального газа постоянной массы не изменяется при переходе его из одного состояния в другое?

- а) в изобарном; в) в адиабатном;
- б) в изохорном; г) в изотермическом.

7. В герметично закрытом сосуде находится одноатомный идеальный газ. Как изменится внутренняя энергия газа при понижении его температуры?

- а) увеличится;
- б) уменьшится;
- в) увеличится или уменьшится в зависимости от атмосферного давления;
- г) не изменится.

8. Записать первое начало термодинамики для изобарического процесса:

- а) $\delta Q = dU + \delta A$; в) $\delta Q = \delta A$;
- б) $dU = -\delta A$; г) $\delta A = dU + \delta Q$.

9. Записать первое начало термодинамики для изохорического процесса:

- а) $\delta Q = dU + \delta A$; в) $\delta Q = \delta A$;
- б) $dU = -\delta A$; г) $\delta A = dU + \delta Q$.

10. Записать первое начало термодинамики для адиабатического процесса:

- а) $\delta Q = dU + \delta A$; в) $\delta Q = \delta A$;
- б) $dU = -\delta A$; г) $\delta A = dU + \delta Q$.

11. Сформулировать и записать первое начало термодинамики:

- а) нельзя построить периодически действующий двигатель, который совершал бы работу без подвода энергии извне или совершал бы работу, большую, чем количество сообщенной ему извне энергии (вечный двигатель первого рода невозможен);

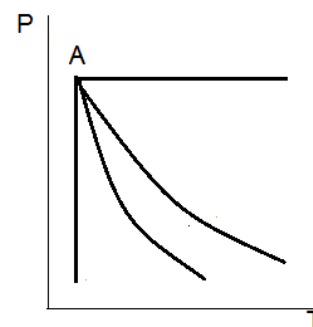
б) изменение полной энергии системы при переходе ее из одного состояния в другое равно сумме, совершенной над системой (затраченной) работы и сообщенной ей теплоты Q ;

в) теплота, сообщаемая системе, расходуется на изменение ее внутренней энергии и на совершение ею работы против внешних сил;

г) изменение полной энергии системы при переходе ее из одного состояния в другое равно разности совершенной над системой (затраченной) работы A' и сообщенной ей теплоты Q ;

д) теплота, сообщаемая системе, и совершение системой работы против внешних сил расходуются на изменение ее внутренней энергии.

12. 1 моль идеального газа можно перевести из начального состояния A в различные конечные состояния путём различных процессов – изобарического, изотермического, адиабатического и изохорического (см. рисунок). Максимальная работа будет совершена газом в случае



К тесту 12

- а) изобарического процесса;
- б) изотермического процесса;
- в) адиабатического процесса;
- г) изохорического процесса.

13. Над газом внешние силы совершили работу 300 Дж, а его внутренняя энергия увеличилась на 100 Дж. В этом процессе газ

- а) получил количество теплоты 400 Дж;
- б) получил количество теплоты 200 Дж;
- в) отдал количество теплоты 100 Дж;
- г) отдал количество теплоты 200 Дж.

14. Изменение внутренней энергией газа определяется...

- а) $dU = \frac{1}{3} \cdot \frac{m}{M} R dT$;
- б) $dU = \frac{i}{3} \cdot \frac{m}{M} R dT$;
- в) $dU = \frac{1}{2} \cdot \frac{m}{M} R dT$;
- г) $dU = \frac{i}{2} \cdot \frac{m}{M} R dT$.

15. Работа, совершаемая газом, при изотермическом процессе равна:

- а) $A = \frac{m}{M} R \ln \frac{V_2}{V_1}$;
- б) $A = \frac{m}{M} R T \ln \frac{V_1}{V_2}$;
- в) $A = \frac{m}{M} R T \ln \frac{V_2}{V_1}$;
- г) $A = \frac{m}{M} R T \ln \frac{P_2}{P_1}$.

16. Работа, совершаемая газом, при изохорном процессе равна:

- а) $A = \frac{m}{M} R T \ln \frac{V_1}{V_2}$;
- б) $A = P(V_2 - V_1)$;
- в) $A = V(P_2 - P_1)$;
- г) $A = 0$.

17. Работа, совершаемая газом, при изобарном процессе равна:

а) $A = \frac{m}{M} RT \ln \frac{V_1}{V_2}$; б) $A = P(V_2 - V_1)$;

в) $A = V(P_2 - P_1)$; г) $A = 0$.

18. Привести в соответствие формулы работы и название процессов.

Формула работы	Название процесса
$A = \frac{m}{M} RT \ln \frac{V_2}{V_1}$	изобарный
$A = P(V_2 - V_1)$	изотермический
$A = 0$	адиабатный
$\Delta U = A'$	изохорный

19. Чему равно изменение внутренней энергии ΔU тела, если ему передано количество теплоты Q и внешние силы совершили работу A' ?

а) $\Delta U = Q + A'$; б) $\Delta U = Q - A'$;

в) $\Delta U = A' - Q$; г) $\Delta U = A'$.

20. Какое из приведенных условий выполняется при адиабатном расширении газа?

а) $Q = -A$; б) $\Delta U = 0$;

в) $Q = 0$; г) $A = 0$.

21. Какое из приведенных условий выполняется при изотермическом сжатии газа?

а) $Q = -A$; б) $\Delta U = 0$;

в) $Q = 0$; г) $A = 0$.

22. Какое из приведенных условий выполняется при изохорном расширении газа?

а) $Q = -A$; б) $\Delta U = 0$; в) $Q = 0$; г) $A = 0$.

23. Уравнение адиабатного процесса в координатах PV имеет вид...

а) $PV^\gamma = const$; б) $PV = const$;

в) $P^\gamma V = const$; г) $(PV)^\gamma = const$.

24. Уравнение адиабатного процесса в координатах TV имеет вид...

а) $(TV)^{\gamma-1} = const$; б) $T^\gamma V = const$;

в) $TV = const$; г) $TV^{\gamma-1} = const$.

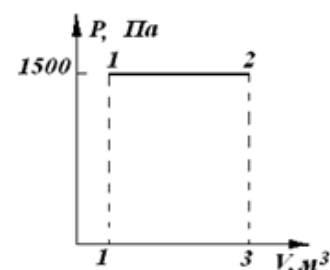
25. Уравнение адиабатного процесса в координатах TP имеет вид...

а) $TP^{\gamma-1} = const$; б) $T^\gamma P^{\gamma-1} = const$;

в) $T^\gamma P = const$; г) $(TP)^{\gamma-1} = const$.

26. Чему равна работа, совершенная газом при переходе газа из состояния 1 в состояние 2?

а) 3000 Дж; б) 4500 Дж; в) 1500 Дж; г) 1000 Дж.



К тесту 26

27. Чему равна работа, совершенная газом при переходе газа из состояния 1 в состояние 2? ($\ln 3 = 1,1$).

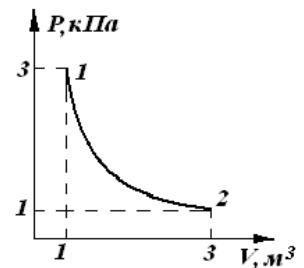
- а) 3000 Дж; б) 4500 Дж;
в) 3300 Дж; г) 1000 Дж.

28. Переход газа из состояния А в состояние В совершается различными способами: 1, 2, 3, 4. При каком способе работа газа имеет максимальное значение?

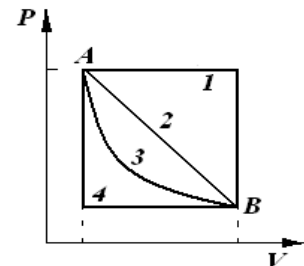
- а) 1; б) 2; в) 3; г) 4.

29. Переход газа из состояния А в состояние В совершается различными способами: 1, 2, 3, 4. При каком способе работа газа имеет минимальное значение?

- а) 1; б) 2; в) 3; г) 4.



К тесту 27



К тесту 28 и 29

4. ТЕПЛОЕМКОСТЬ ГАЗОВ

4.1. Основные формулы

Одной из важнейших физических характеристик газов является теплоемкость. Различают удельную и молярную теплоемкости.

- *Удельной теплоемкостью* (c) газов называется величина, равная количеству теплоты, которое необходимо сообщить единице массы газа, чтобы увеличить его температуру на 1 К:

$$c = \frac{Q}{m\Delta T}.$$

- *Молярной теплоемкостью* (C_μ) называется величина, численно равная количеству теплоты, которое необходимо сообщить одному молью газа, чтобы увеличить его температуру на 1 К:

$$C_\mu = \frac{Q}{\nu\Delta T}.$$

- Связь между молярной и удельной теплоемкостями:

$$C_\mu = Mc,$$

где M – молярная масса газа.

Удельная и молярная теплоемкости газа зависят от условий, при которых проводится нагревание, т. е. от характера термодинамического процесса. Например, можно проводить нагревание при постоянном объеме или при постоянном давлении. Тогда получим соответственно теплоемкость при постоянном объеме C_v или при постоянном давлении C_p . При этом всегда $C_p > C_v$.

- Молярная теплоемкость газа при постоянном объеме равна:

$$C_V = \frac{dU}{dT}$$

- Молярная теплоемкость газа при постоянном давлении равна:

$$C_p = \frac{dU}{dT} + R = C_V + R. \quad (1)$$

Формула (1) носит название уравнение Майера.

Из молекулярно-кинетической теории следует, что молярные и удельные теплоемкости зависят от числа степеней свободы молекул, из которых состоит газ.

- Молярные теплоемкости при постоянном объеме и постоянном давлении соответственно равны:

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

где i – число степеней свободы, R – молярная газовая постоянная.

- Удельные теплоемкости при постоянном, объеме и постоянном давлении соответственно равны:

$$c_v = \frac{i}{2} \frac{R}{M} \quad \text{и} \quad c_p = \frac{i+2}{2} \frac{R}{M}.$$

Число степеней свободы молекулы газа равно числу независимых координат, которые надо ввести для определения положения молекулы в пространстве. Молекула одноатомного газа имеет три степени свободы ($i = 3$), жесткая молекула двухатомного газа – пять ($i = 5$), трехатомного и многоатомного – шесть ($i = 6$).

- Отношение теплоемкостей газа C_p и C_V называется показателем адиабаты. Для идеального газа:

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

4.2. Примеры решения задач

Пример 1. Вычислить удельные теплоемкости неона и кислорода при постоянных объеме (c_v) и давлении (c_p), принимая эти газы за идеальные.

Решение. Удельные теплоемкости идеальных газов выражаются формулами

$$c_v = \frac{i}{2} \frac{R}{M}, \quad (1)$$

$$c_p = \frac{i + 2}{2} \frac{R}{M}. \quad (2)$$

Для неона (одноатомный газ) $i_1 = 3$, $M_1 = 20 \cdot 10^{-3}$ кг/моль, R – молярная газовая постоянная 8,31 Дж/моль·К. Подставив в формулы (1) и (2) значения i_1 , M_1 , R проводим вычисления

$$c'_v = 1,5 \cdot \frac{8,31 \text{ Дж}}{0,02 \text{ кг} \cdot \text{К}} = 623 \text{ Дж}/(\text{кг} \cdot \text{К}),$$

$$c'_p = 2,5 \cdot \frac{8,31 \text{ Дж}}{0,02 \text{ кг} \cdot \text{К}} = 1039 \text{ Дж}/(\text{кг} \cdot \text{К}).$$

Для кислорода (двухатомный газ) $i_2 = 5$, $M_2 = 32 \cdot 10^{-3}$ кг/моль. Вычисляя по тем же формулам (1) и (2), получим:

$$c''_v = 2,5 \cdot \frac{8,31 \text{ Дж}}{0,032 \text{ кг} \cdot \text{К}} = 649 \text{ Дж}/(\text{кг} \cdot \text{К}),$$

$$c''_p = 3,5 \cdot \frac{8,31 \text{ Дж}}{0,032 \text{ кг} \cdot \text{К}} = 909 \text{ Дж}/(\text{кг} \cdot \text{К}).$$

Пример 2. Найти отношение удельных теплоемкостей c_p/c_v для смеси газов, состоящей из 24 г окиси углерода (CO) и 36 г углекислого газа (CO₂).

Дано:

$$M_1 = 28 \cdot 10^{-3}$$

кг/моль

$$M_2 = 44 \cdot 10^{-3}$$

кг/моль

$$m_1 = 24 \cdot 10^{-3} \text{ кг}$$

$$m_2 = 36 \cdot 10^{-3} \text{ кг}$$

c_p/c_v –?

Решение. Количество теплоты Q_1 , Q_2 необходимые для нагрева каждого газа в отдельности на ΔT , выразится так:

$$Q_1 = m_1 c_1 \Delta T$$

$$Q_2 = m_2 c_2 \Delta T$$

где m_1 и m_2 – массы этих газов; c_1 и c_2 – удельные теплоемкости соответствующих газов.

Для нагрева смеси газов потребуется количество теплоты, равное сумме указанных теплот, т. е. $Q = Q_1 + Q_2$,

$$Q = (m_1 c_1 + m_2 c_2) \Delta T \quad (1)$$

Если обозначить удельную теплоемкость смеси газов через (c), то количество теплоты, необходимое для нагрева смеси газов на ΔT , будет

$$Q = (m_1 + m_2) c \cdot \Delta T \quad (2)$$

Приравнивая левые части (1) и (2), получим

$$(m_1 + m_2) c \cdot \Delta T = (m_1 c_1 + m_2 c_2) \Delta T,$$

откуда

$$c = \frac{m_1 c_1 + m_2 c_2}{m_1 + m_2}. \quad (3)$$

Если в формуле (3) c_1 и c_2 есть удельные теплоемкости при постоянном объеме, то соответственно и (c) будет удельной теплоемкостью смеси газов при постоянном объеме, т. е.

$$c_v = \frac{m_1 c'_v + m_2 c''_v}{m_1 + m_2}. \quad (4)$$

Теплоемкость смеси (c) будет при постоянном давлении, если c_1 и c_2 – соответствующие теплоемкости отдельных газов при постоянном давлении т. е.

$$c_p = \frac{m_1 c'_p + m_2 c''_p}{m_1 + m_2}. \quad (5)$$

Удельные теплоемкости c_v и c_p компонент смеси равны:

$$c'_v = \frac{i_1 R}{2 M_1} \quad \text{и} \quad c''_v = \frac{i_2 R}{2 M_2}, \quad (6)$$

$$c'_p = \frac{i_1 + 2}{2} \frac{R}{M_1} \quad \text{и} \quad c''_p = \frac{i_2 + 2}{2} \frac{R}{M_2}. \quad (7)$$

Подставив значения c_v и c_p с соответствующими индексами в формулы (4) и (5), получим:

$$c_v = \frac{\frac{i_1 m_1}{2 M_1} R + \frac{i_2 m_2}{2 M_2} R}{m_1 + m_2}, \quad (8)$$

$$c_p = \frac{\frac{i_1 + 2}{2} \frac{m_1}{M_1} R + \frac{i_2 + 2}{2} \frac{m_2}{M_2} R}{m_1 + m_2}. \quad (9)$$

Поделив (9) на (8), получим после сокращения на 2 и R

$$\frac{c_p}{c_v} = \frac{\frac{m_1}{M_1} (i_1 + 2) + \frac{m_2}{M_2} (i_2 + 2)}{\frac{m_1}{M_1} i_1 + \frac{m_2}{M_2} i_2} \quad (10)$$

Из выражения (10) следует, что $\frac{c_p}{c_v}$ – безразмерная величина.

Для окиси углерода (CO) $M_1 = 28 \cdot 10^{-3}$ кг/моль; $i_1 = 5$.

Для углекислого газа (CO₂) $M_2 = 44 \cdot 10^{-3}$ кг/моль; $i_2 = 6$.

Подставляя числовые значения в формулу (10), получим:

$$\frac{c_p}{c_v} = \frac{\frac{0,024}{0,028} \cdot 7 + \frac{0,036}{0,044} \cdot 8}{\frac{0,024}{0,028} \cdot 5 + \frac{0,036}{0,044} \cdot 6} = 1,36.$$

Ответ: отношение удельных теплоемкостей 1,36.

4.3. Задачи

401–415. Вычислить удельные теплоемкости газа или смеси газов c_p и c_v , определить число степеней свободы каждого газа. Данные к задаче, по своему варианту, взять в табл. 2.

416–430. Вычислить молярные теплоемкости газа или смеси газов C_v и C_p , число степеней свободы каждого газа. Данные к задаче, по своему варианту, взять в табл. 2.

Таблица 2

Номер вариант		Газ 1	Масса газа 1	Количество вещества газ 1	Газ 2	Масса газа 2	Количество вещества газ 2
1	16	O ₂	20 % смеси		N ₂	80 % смеси	
2	17	H ₂	50 % смеси		He	50 % смеси	
3	18	C ₃ H ₃ O	100 г		–	–	
4	19	O ₂		1 моль	N ₂		2 моль
5	20	O ₂	32 г		N ₂	102 г	
6	21	H ₂	50 % смеси		Ne	50 % смеси	
7	22	H ₂	40 % смеси		H	60 % смеси	
8	23	CO	28 г		–	–	
9	24	O ₂	50 % смеси		O	50 % смеси	
10	25	O ₂	2,5 г		Ar	10 г	
11	26	H ₂		2 моль	He		1 моль
12	27	H ₂	5 г		Ar	5 г	
13	28	O ₂	85 % смеси		O ₃	15 % смеси	
14	29	N ₂			He	4 г	
15	30	CO ₂		3 моль	–	–	

431. Смешанно 4,032 г водорода с 32 г кислорода их удельные теплоемкости $C_{PH} = 3,5$ кал/(г·°С) и $C_{PK} = 0,218$ кал/(г·°С). Определить изменение внутренней энергии этой системы при охлаждении ее на 20 °С при постоянном объеме. Для обеих газов показатель адиабаты равен 1,4. (1,25 кДж).

432. В сосуде емкостью 10 л находится кислород под давлением 10^5 Па. Стенки сосуда могут выдержать давление до 10^6 Па. Какое максимальное количество тепла можно сообщить газу? (22,5 кДж).

433. При температуре 207 °С 2,5 кг некоторого газа занимают объем 0,8 м³. Найти давление газа, если удельная теплоемкость $C_p = 519 \frac{\text{Дж}}{\text{кгК}}$ и $\gamma = 1,67$. ($3,12 \cdot 10^5$ Па).

434. Разность удельных теплоемкостей c_v и c_p некоторого двухатомного газа равна 260 Дж/(кг·К). Найти молярную массу и удельные теплоемкости c_v и c_p . (0,032 кг/моль; 910 Дж/(кг·К); 650 Дж/(кг·К)).

435. Степень диссоциации газообразного водорода равна 0,6. Найти удельную теплоемкость c_v такого частично диссоциированного водорода. (11200 Дж/(кг·К)).

436. Определить показатель адиабаты γ идеального газа, который при температуре 350 К и давлении 0,4 МПа занимает объем 300 л и имеет теплоемкость $C_v = 857$ Дж/К. (1,4)

437. В сосуде, объемом 6 л находится при нормальных условиях двухатомный газ. Определить теплоемкость этого газа при постоянном объеме. (5,4 Дж/К).

438. Трехатомный газ под давлением 240 кПа и температуре 20 °С занимает объем 10 л. Определить теплоемкость этого газа при постоянном давлении. (32,8 Дж/К).

439. Относительная молярная масса газа равна 30, показатель адиабаты равен 1,4 вычислить удельные теплоемкости c_p и c_v этого газа. (970 Дж/(кг·К); 693 Дж/(кг·К)).

440. Определить относительную молярную массу и молярную массу газа, если разность удельных теплоемкостей $c_p - c_v$ равна 2,08 гДж/(кг·К). (40; 0,04 кг/моль).

441. Какова молярная теплоемкость идеального газа, расширяющегося по закону $PV^2 = const$. (4,15 Дж/(К·моль)).

442. Какая часть молекул двухатомного газа распалась на атомы, если показатель адиабаты образовавшейся смеси равен 1,5? (0,33).

4.4. Контрольный тест

1. Дать определение удельной теплоемкости вещества:

а) удельной теплоемкостью C газов называется величина, численно равная количеству теплоты, которое необходимо сообщить единице объема газа, чтобы увеличить его температуру на 1 К;

б) удельной теплоемкостью C газов называется величина, численно равная количеству теплоты, которое необходимо сообщить одному молью газа, чтобы увеличить его температуру на 1 К;

в) удельной теплоемкостью C газов называется величина, численно равная количеству теплоты, которое необходимо сообщить единице массы газа, чтобы увеличить его температуру на 1 К;

г) удельной теплоемкостью C газов называется величина, численно равная количеству теплоты, необходимому для перехода единицы массы вещества из твердого состояния в жидкое при температуре плавления.

2. Дать определение молярной теплоемкости вещества:

а) удельной теплоемкостью C газов называется величина, численно равная количеству теплоты, которое необходимо сообщить единице объема газа, чтобы увеличить его температуру на 1 К;

б) удельной теплоемкостью C газов называется величина, численно равная количеству теплоты, которое необходимо сообщить одному молью газа, чтобы увеличить его температуру на 1 К;

в) удельной теплоемкостью C газов называется величина, численно равная количеству теплоты, которое необходимо сообщить единице массы газа, чтобы увеличить его температуру на 1 К;

г) удельной теплоемкостью C газов называется величина, численно равная количеству теплоты, необходимому для перехода единицы массы вещества из твердого состояния в жидкое при температуре плавления.

3. Дать определение удельной теплоемкости вещества:

а) удельной теплоемкостью C газов называется величина, численно равная количеству теплоты, которое необходимо сообщить единице объема газа, чтобы увеличить его температуру на 1 К;

б) удельной теплоемкостью C газов называется величина, численно равная количеству теплоты, которое необходимо сообщить одному молью газа, чтобы увеличить его температуру на 1 К;

в) удельной теплоемкостью C газов называется величина, численно равная количеству теплоты, которое необходимо сообщить единице массы газа, чтобы увеличить его температуру на 1 К;

г) удельной теплоемкостью C газов называется величина, численно равная количеству теплоты, необходимому для перехода единицы массы вещества из твердого состояния в жидкое при температуре плавления.

4. Записать и сформулировать уравнение Майера:

а) молярная теплоемкость идеального газа при постоянном давлении превышает его удельную молярную теплоемкость при постоянном объеме на величину универсальной газовой постоянной;

б) молярная теплоемкость идеального газа при постоянном объеме превышает его удельную молярную теплоемкость при постоянном давлении на величину универсальной газовой постоянной;

в) молярная теплоемкость идеального газа при постоянном давлении превышает его удельную молярную теплоемкость при постоянной температуре на величину универсальной газовой постоянной;

г) молярная теплоемкость идеального газа при постоянном объеме превышает его удельную молярную теплоемкость при постоянной температуре на величину универсальной газовой постоянной;

д) молярная теплоемкость идеального газа при постоянной температуре превышает его удельную молярную теплоемкость при постоянном давлении на величину универсальной газовой постоянной.

5. Какая физическая величина называется показатель адиабаты:

а) $\gamma = \frac{C_p}{C_v}$; б) $\gamma = \frac{C_v}{C_p}$; в) $\gamma = \frac{C_p}{i}$; г) $\gamma = \frac{i+2}{i}$.

6. Показатель адиабаты идеального газа можно определить по формуле

а) $\gamma = \frac{i+2}{i}$; б) $\gamma = \frac{C_p}{i}$; в) $\gamma = \frac{i}{i+2}$; г) $\gamma = \frac{i}{2}$.

5. КРУГОВЫЕ ПРОЦЕССЫ.

ВТОРОЕ НАЧАЛО ТЕРМОДИНАМИКИ

5.1. Основные формулы

- Коэффициент полезного действия тепловой машины:

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

где Q_1 – теплота, получаемая рабочим телом от нагревателя; Q_2 – теплота, отданная рабочим телом холодильнику; A – полезная работа совершаемая тепловой машиной.

- Коэффициент полезного действия цикла Карно:

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

где T_1 и T_2 температуры нагревателя и холодильника соответственно.

5.2. Примеры решения задач

Пример 1. Нагреватель тепловой машины, работающей по циклу Карно, имеет температуру 200 °С. Определить температуру холодильника, если при получении от нагревателя количества тепла $Q_1 = 1$ Дж, машина совершает работу $A = 0,4$ Дж. Потери энергии не учитывать.

Дано: $Q_1 = 1$ Дж
 $A = 0,4$ Дж
 $T_1 = 473$ К
 $T_2 = ?$

Решение. Температуру холодильника определим, используя выражение термического КПД цикла Карно

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

отсюда получаем

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

По определению, КПД тепловой машины выражает отношение энергии превращенной в механическую работу к количеству энергии полученному рабочим телом от нагревателя, т. е.

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

Подставив (2) в (1), получаем выражение

$$T_2 = T_1 \left(1 - \frac{A}{Q_1} \right).$$

Произведем вычисления:

$$T_2 = \left(1 - \frac{0,4}{1} \right) = 284 \text{ К.}$$

Ответ: 284 К.

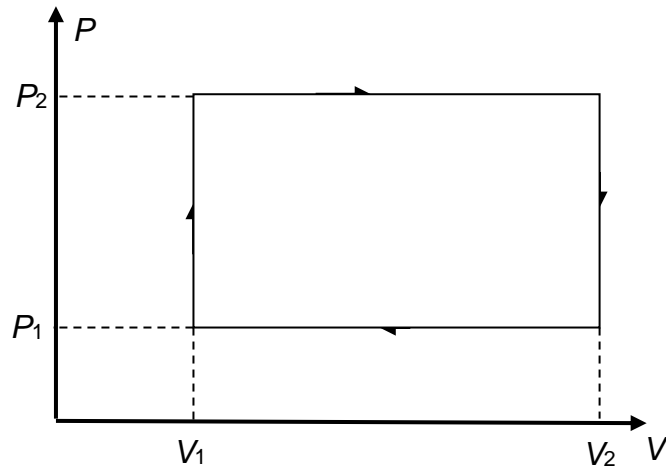
Пример 2. Двух атомный идеальный газ совершает прямой обратимый цикл состоящий из двух изобар и двух изохор. Определить КПД цикла, если при изохорическом нагреве температура изменилась от 200 К до 400 К, а при изобарическом расширении объем увеличился в 2 раза.

Решение. Построим диаграмму цикла (рисунок).

Коэффициент полезного действия обратимого цикла выражается формулой

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

где Q_1 – количество теплоты полученное газом, Q_2 – количество теплоты отданное газом холодильнику.



Согласно условия задачи и диаграммы процессов (рисунок), полученное количество теплоты равно

$$Q_1 = C_v \nu (T_2 - T_1) + C_p \nu (T_3 - T_2), \quad (2)$$

где ν – количество вещества, C_v и C_p молярные теплоемкости при изохорическом и изобарическом процессах соответственно.

Количество теплоты отданного холодильнику равно

$$Q_2 = C_v \nu (T_3 - T_4) + C_p \nu (T_4 - T_1). \quad (3)$$

Подставив (2) и (3) в (1) получим выражение КПД:

$$\eta = 1 - \frac{C_v (T_3 - T_4) + C_p (T_4 - T_1)}{C_v (T_2 - T_1) + C_p (T_3 - T_2)} = 1 - \frac{(T_3 - T_4) + \frac{C_p}{C_v} (T_4 - T_1)}{(T_2 - T_1) + \frac{C_p}{C_v} (T_3 - T_2)}. \quad (4)$$

Из рассмотрения изохорического нагревания и охлаждения газа вытекает

$$\frac{T_2}{T_1} = \frac{T_3}{T_4}, \quad \text{откуда} \quad T_4 = \frac{T_3}{T_2} T_1. \quad (5)$$

На основании закона изобарического процесса и условия задачи имеем

$$n = \frac{V_2}{V_1} = \frac{T_3}{T_2} \quad \text{тогда} \quad T_3 = T_2 n. \quad (6)$$

Подставив (5) и (6) в выражение КПД (4) и произведя преобразования, получаем:

$$\eta = 1 - \frac{\left(T_3 - \frac{T_3}{T_2} T_1 \right) + \frac{C_p}{C_v} \left(\frac{T_3}{T_2} T_1 - T_1 \right)}{(T_2 - T_1) + \frac{C_p}{C_v} (T_3 - T_2)} = 1 - \frac{n(T_2 - T_1) + \frac{C_p}{C_v} T_1 (n - 1)}{(T_2 - T_1) + \frac{C_p}{C_v} T_2 (n - 1)}. \quad (7)$$

В этом выражении $C_p = \frac{i+2}{2}R$ – молярная теплоемкость при постоянном давлении, $C_v = \frac{i}{2}R$ – молярная теплоемкость при постоянном объеме.

Подставим в конечное выражение формулы (7) числовые значения и вычислим коэффициент полезного действия

$$\eta = 1 - \frac{2(400 - 200) + 1,4 \cdot 200(2 - 1)}{(400 - 200) + 1,4 \cdot 400(2 - 1)} = 0,105.$$

Ответ: КПД цикла равен 0,105.

Пример 3. Тепловой двигатель совершает круговой процесс, отнимая тепло с нагревателем (температура $T_1 = 500$ К) и природным резервуаром воды (температура $T_2 = 290$ К). Полученная работа используется для приведения в действие холодильной машины, совершающей также круговой процесс. Холодильная машина забирает тепло от охлаждаемого резервуара (температура $T_3 = 250$ К) и передает тепло тому же природному резервуару воды. Найти минимальную мощность потока тепла от нагревателя Q_1 , если мощность потока тепла, отводимого от холодильника для поддержания его температуры постоянной, равна $Q_3 = 100$ Вт.

Дано:
 $T_1 = 500$ К
 $T_2 = 290$ К
 $T_3 = 250$ К
 $Q_3 = 100$ Вт
 $Q_1 = ?$

Решение. Обе машины – двигатель и холодильная машина – совершили круговой процесс, в результате которого нагреватель отдал тепло Q_1 , холодильник отдал тепло Q_3 , природный резервуар воды при работе двигателя получил тепло Q_2 и при работе холодильной машины получил тепло Q'_2 .

На основании неравенства Клаузиуса запишем

$$\frac{Q_1}{T_1} + \frac{Q_3}{T_3} - \frac{Q_2 + Q'_2}{T_2} \leq 0.$$

Работа совершаемая двигателем $Q_1 - Q_2$ должна быть не меньше работы, потребной для приведения в действие холодильной машины $Q'_2 - Q_3$, то есть $Q_1 - Q_2 \geq Q'_2 - Q_3$, откуда

$$Q'_2 + Q_2 \leq Q_1 + Q_3$$

Если в неравенстве Клаузиуса $Q'_2 + Q_2$ заменить на большую величину $Q_1 + Q_3$, то от этого неравенство только усилится. Таким образом, должно быть

$$\frac{Q_1}{T_1} + \frac{Q_3}{T_3} - \frac{Q_1 + Q_3}{T_2} \leq 0. \quad (1)$$

Из неравенства (1) выражаем

$$Q_1 \geq \frac{1/T_2 - 1/T_1}{1/T_3 - 1/T_2} Q_3$$

или

$$Q_1 \geq \left(\frac{T_1 - T_2}{T_2 - T_3} \right) \frac{T_3}{T_1} Q_3. \quad (2)$$

Неравенство (2) относится для реальных машин. Для идеальных машин, работающих по циклу Карно надо брать знак равенства.

Произведем вычисления:

$$Q_1 = \left(\frac{500 - 290}{290 - 250} \right) \frac{250}{500} 100 = 525 \text{ Вт.}$$

Ответ: минимальная мощность потока тепла от нагревателя потребляемая тепловым двигателем 525 Вт.

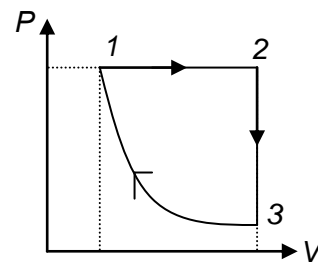
5.3. Задачи

501. Найти КПД цикла, состоящего из двух изотерм и двух изобар, рабочим веществом является одноатомный идеальный газ. При изобарном нагревании температура изменяется от 30 К до 100 К. При изотермическом расширении давление изменяется в 2 раза.

$$\left(\eta = \frac{(T_2 - T_1) \ln \frac{P_1}{P_2}}{\frac{i+2}{2} (T_2 - T_1) + T_2 n \frac{P_1}{P_2}} = 0,073 \right).$$

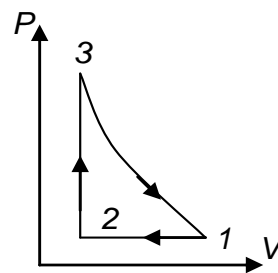
502. Холодильная машина Карно используется для поддержания температуры -3°C некоторого резервуара. Температура окружающего воздуха 27°C . Какая механическая работа потребуется для выполнения одного цикла, если при этом из резервуара отводится $Q_2 = 900$ Дж тепла? (100 Дж).

503. На рисунке изображена диаграмма обратного цикла, выполняемая одним молем одноатомного газа в тепловой машине. Найти КПД цикла и работу, совершаемую за цикл, если процесс 3-1 изотермический и протекает при температуре $T_1 = 300$ К, а температура $T_2 = 500$ К. (0,094; 388,5 Дж).



К задаче 503

504. На рисунке изображена диаграмма обратного цикла, выполняемого двумя молями одноатомного идеального газа в тепловой машине. Определить работу совершаемую машиной за цикл, а также КПД цикла, если процесс 3-1 изотермический совершаемый при температуре $T_1 = 400$ К, а температура $T_2 = 200$ К. (5439 Дж; 57 %).



К задаче 504

505. Тепловая машина имеет КПД $\eta = 40$ %. Каким станет КПД машины, если количество теплоты, потребляемое за цикл, увеличиться на 20 %, а количество теплоты, отдаваемое холодильнику, уменьшится на 10 %? ($\eta = 55$ %).

506. Водород совершает цикл Карно. Найти КПД цикла, если при адиабатическом расширении объем газа увеличивается в 2 раза. (24 %).

507. Водород совершает цикл Карно. Найти КПД цикла, если при адиабатическом расширении давление уменьшается в два раза. (18 %).

508. Найти КПД цикла, состоящего из двух адиабат и двух изохор, если в пределах цикла объем идеального газа изменяется в 10 раз. Рабочим веществом является азот. (60 %).

509. Найти КПД цикла, состоящего из двух изобар и двух адиабат, если в пределах цикла давление меняется в 2 раза. Рабочее вещество гелий. (24 %).

510. Идеальный одноатомный газ совершает цикл, состоящий из двух изохор и двух изобар. Найти КПД цикла, если абсолютная температура газа возрастает в 4 раза как при изохорическом нагреве, так и при изобарическом расширении. (18,2 %).

511. Идеальный двухатомный газ совершает цикл, состоящий из изохоры, адиабаты и изотермы. Причем, изотермический процесс происходит при минимальной температуре цикла. Найти КПД цикла, если температура в его пределах изменяется в 3 раза. (45 %).

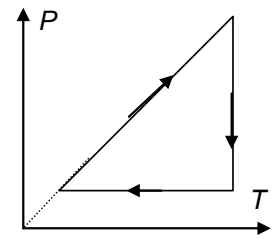
512. Идеальный газ совершает цикл Карно. Температура нагревателя 470 К, температура холодильника 280 К. При изотермическом расширении газ совершает работу равную 100 Дж. Определить КПД цикла и количество теплоты отдаваемое холодильнику. (40 %; 60 Дж).

513. Наименьший объем газа, совершающего цикл Карно 150 л. Определить наибольший объем, если объем в конце изотермического расширения 600 л, а в конце изотермического сжатия 200 л. (800 л).

514. Идеальный газ совершает цикл Карно. Работа изотермического расширения равна 50 Дж. Определить работу изотермического сжатия, если КПД цикла 20 %. (40 Дж).

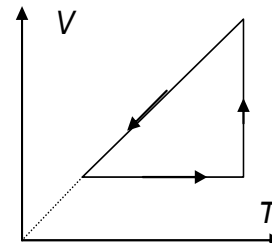
515. Идеальный газ, совершающий цикл Карно, 60% количества теплоты, полученного от нагревателя, передает холодильнику. Полезная работа совершаемая газом равна 1 кДж. Определить КПД цикла и количество теплоты полученной от нагревателя. (40 %; 2500 Дж).

516. Идеальный двухатомный газ совершает цикл рисунок, в пределах которого абсолютная температура изменяется в 2 раза. Найти КПД этого цикла (9,8 %).



К задаче 516

517. Двухатомный газ совершает цикл рисунок, в пределах которого абсолютная температура изменяется в 4 раза. Определить КПД этого цикла. (19,5 %).



К задаче 517

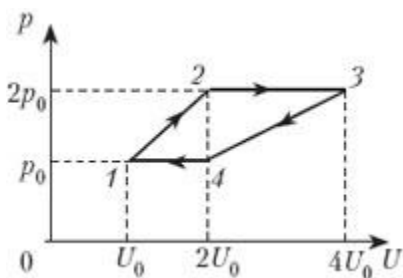
518. Один моль одноатомного газа совершает в тепловой машине цикл Карно между тепловыми резервуарами с температурами 127 °С и 27 °С. Наименьший объем газа в ходе цикла 5 л, наибольший – 20 л. Какую работу совершает эта машина за один цикл? Сколько тепла Q_1 берёт от нагревателя и сколько тепла отдаёт холодильнику? (1749,3 Дж; 6997,2 Дж; 5247,9 Дж).

519. Давление идеального одноатомного газа изохорно увеличивают в 4 раза, затем объем газа увеличивают в 2,5 раза так, что давление линейно зависит от объема и возрастает в 2 раза, после чего газ возвращают в исходное состояние в процессе, в котором давление линейно зависит от объема. Найдите КПД (в процентах) такого цикла. (6 %).

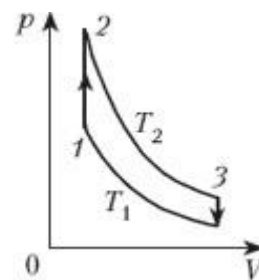
520. Найти КПД тепловой машины, работающей с 1 молем одноатомного идеального газа по циклу, состоящему из адиабатного расширения, изотермического сжатия и изохорного нагревания. Работа над газом в изотермическом процессе, равна A . разность максимальной и минимальной температур в цикле равна ΔT . $\left(\eta = 1 - \frac{2A}{3\nu R \Delta T} \right)$.

521. Тепловая машина работает по циклу, состоящему из изохоры 1-2, изобары 2-3 и участка 3-1 прямо пропорциональной зависимости давления от объёма. Найти КПД цикла, если объём на изобаре изменяется в два раза. Рабочее вещество – одноатомный идеальный газ.

522. 1 моль идеального одноатомного газа совершает цикл, изображённый на рисунке, в координатах p, U , где p – давление, U – внутренняя энергия газа. Определите КПД цикла. (15 %).



К задаче 522

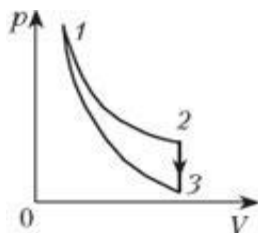


К задаче 523

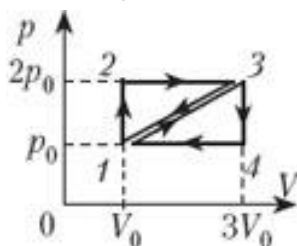
524. КПД тепловой машины, работающей по циклу, состоящему из изотермы 1–2, изохоры 2–3, адиабаты 3–1, равен η , разность между максимальной и минимальной температурами газа в цикле равна ΔT . Найдите работу, совершённую ν молями одноатомного идеального газа в изотермическом процессе. ($A = \frac{3\nu R \Delta T}{2(1-\eta)}$).

525. Найдите КПД тепловой машины, работающей по циклам 1–2–3–1; 1–3–4–1. рабочим телом является одноатомный идеальный газ. (8,7 %; 9,5 %).

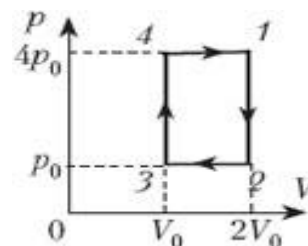
526. Найдите КПД тепловой машины, работающей по циклам 1–2–3–4–1. рабочим телом является молекулярный водород. (14 %).



К задаче 524



К задаче 525

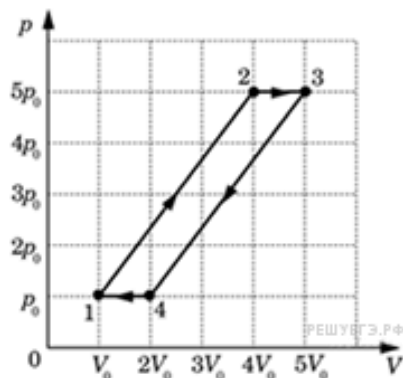


К задаче 526

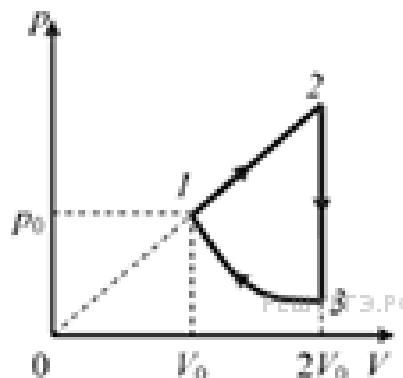
527. С одним молем идеального одноатомного газа совершают циклический процесс 1–2–3–4–1 (см. рисунок). Во сколько раз η КПД данного цикла меньше, чем КПД идеальной тепловой машины, работающей при тех же максимальной и минимальной температурах? (12 %).

528. Над одноатомным идеальным газом проводится циклический процесс, показанный на рисунке. На участке 1–2 газ совершает работу $A_{12} = 1000$ Дж. Участок 3–1 – адиабата. Количество теплоты, отданное газом за цикл холодильнику, равно $Q_{хол} = 3370$ Дж. Количество вещества газа в ходе процесса не меняется. Найдите работу A_{31} газа на адиабате. (370 Дж).

529. Цикл тепловой машины, рабочим веществом которой является ν молей идеального одноатомного газа, состоит из изотермического расширения, изохорного охлаждения и адиабатического сжатия. Работа, совершённая газом в изотермическом процессе, рав-



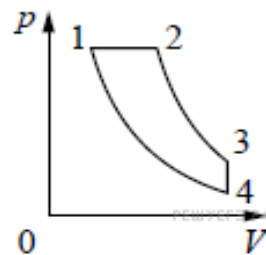
К задаче 527



К задаче 527

на A , а КПД тепловой машины равен η . Максимальная температура в этом цикле равна T_0 . Определите минимальную температуру T в этом циклическом процессе. $\left(T = T_0 - \frac{2A(1-\eta)}{3\nu R}\right)$.

530. Тепловой двигатель использует в качестве рабочего вещества 1 моль идеального одноатомного газа. Цикл работы двигателя изображён на pV -диаграмме и состоит из двух адиабат, изохоры, изобары. Модуль отношения изменения температуры газа при изобарном процессе ΔT_{12} к изменению его температуры ΔT_{34} при изохорном процессе равен 1,2. Определите КПД цикла. (50 %).



К задаче 530

531. Один моль идеального газа находится в цилиндре под поршнем при температуре T_1 . Газ при постоянном давлении нагревают до температуры T_2 , затем при постоянном объеме нагревают до температуры T_3 . Далее газ охлаждают при постоянном давлении, и его объем падает при этом до первоначального значения. Затем газ при постоянном объеме возвращают в начальное состояние. Какую работу совершил газ за цикл? $\left(A = \frac{\nu R(T_3 - T_2)(T_2 - T_1)}{T_2}\right)$.

532. На подъем груза весом 1000 кН на высоту 6 м пошло 80 % всей механической работы, полученной в результате работы идеальной тепловой машины, у которой разность температур нагревателя и холодильника равна 125 К, а отношение количества теплоты, полученной от нагревателя, к его абсолютной температуре равно 300 Дж/К. Сколько циклов было совершено за время подъема груза? (200).

533. Идеальный одноатомный газ совершает замкнутый цикл, состоящий из двух изохорных и двух изобарных процессов. При изохорном нагревании давление увеличивается в 2 раза, а при изобарном нагревании объем увеличивается на 70 %. Найдите КПД цикла. (14 %).

534. Идеальный одноатомный газ совершает циклический процесс, состоящий из изохорного нагревания, при котором давление газа возрастает на 40 %, затем изобарного расширения и, наконец, возвращения в исходное состояние в процессе, в котором давление изменяется прямо пропорционально объему. Найдите КПД цикла. (4 %).

535. Идеальная холодильная машина, работающая по обратному циклу Карно, используется для замораживания воды при 0 °С. Теплота отдается окружающему воздуху, температура которого 27 °С. Сколько минут потребуется для превращения в лед 420 г воды, если холодильная машина потребляет от сети мощность 25 Вт? Удельная теплота плавления льда 330 кДж/кг. (9 мин).

5.4. Контрольные тесты

1. Сформулировать второе начало термодинамики:

а) любой необратимый процесс в замкнутой системе происходит так, что энтропия системы при этом возрастает;

б) невозможен круговой процесс, единственным результатом которого является превращение теплоты, полученной от нагревателя, в эквивалентную ей работу;

в) невозможен круговой процесс, единственным результатом которого является передача теплоты от менее нагретого тела к более нагретому;

г) любой необратимый процесс в замкнутой системе происходит так, что энтропия системы при этом уменьшается;

д) любой необратимый процесс в замкнутой системе происходит так, что энтропия системы при этом остается неизменной.

2. Тепловая машина за цикл совершает работу 50 Дж и отдает холодильнику количество теплоты, равное 100 Дж. Чему равен КПД тепловой машины?

а) 100 %; б) 50 %; в) 33 %; г) 67 %.

3. Тепловая машина с КПД 60% за цикл работы отдает холодильнику количество теплоты, равное 100 Дж. Какое количество теплоты за цикл машина получает от нагревателя?

а) 600 Дж; б) 250 Дж; в) 150 Дж; г) 60 Дж.

4. КПД идеальной тепловой машины, работающей по циклу Карно, равен $\eta = 60\%$. Если температуру нагревателя увеличить в два раза, а температуру холодильника уменьшить в 2 раза, КПД тепловой машины будет равен

а) 35 %; б) 60 %; в) 75 %; г) 90 %.

5. КПД идеальной тепловой машины, работающей по циклу Карно, равен $\eta = 70\%$. КПД машины уменьшится до 40 %, если, не меняя количество подводимого тепла за один цикл, количество отведенного холодильником тепла за цикл

а) увеличить в 1,33 раза; в) увеличить в 1,75 раз;

б) увеличить в 2 раза; г) уменьшить в 1,75 раз.

6. Тепловая машина за цикл работы получает от нагревателя количество теплоты, равное 100 Дж, и отдает холодильнику количество теплоты, равное 40 Дж. Чему равен КПД тепловой машины?

а) 40 %; б) 60 %; в) 29 %; г) 43 %.

7. Тепловая машина за цикл совершает работу 50 Дж и отдает холодильнику количество теплоты, равное 100 Дж. Чему равен КПД тепловой машины?

а) 100 %; б) 50 %; в) 33 %; г) 67 %.

8. Тепловая машина с КПД 60 % за цикл работы отдает холодильнику количество теплоты, равное 100 Дж. Какое количество теплоты за цикл машина получает от нагревателя?

- а) 600 Дж; б) 250 Дж; в) 150 Дж; г) 60 Дж.

9. КПД идеальной тепловой машины, работающей по циклу Карно, равен $\eta = 60\%$. Если температуру нагревателя увеличить в два раза, а температуру холодильника уменьшить в 2 раза, КПД тепловой машины будет равен:

- а) 35 %; б) 60 %; в) 75 %; г) 90 %.

10. Термический КПД цикла Карно определяется

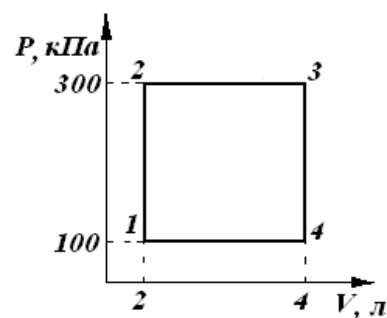
- а) $\eta = \frac{T_1 - T_2}{T_2}$; б) $\eta = \frac{T_2 - T_1}{T_2}$; в) $\eta = \frac{T_1 - T_2}{T_1}$; г) $\eta = \frac{T_2 - T_1}{T_1}$.

11. Термический коэффициент полезного действия для кругового процесса равен:

- а) $\eta = \frac{Q_1 - Q_2}{Q_2}$; б) $\eta = \frac{Q_1 - Q_2}{Q_1}$;
в) $\eta = \frac{Q_2 - Q_1}{Q_2}$; г) $\eta = \frac{Q_2 - Q_1}{Q_1}$.

12. На графике представлен цикл теплового двигателя. Определите работу, совершаемую газом.

- а) 400 Дж; б) 600 Дж; в) 200 Дж; г) 1200 Дж.



К тесту 12

6. УРАВНЕНИЕ ТЕПЛОВОГО БАЛАНСА

6.1. Основные формулы и соотношения

Количество теплоты, необходимое для нагрева тела массой m от температуры T_1 до температуры T_2 :

$$Q = cm(T_2 - T_1), \quad (1)$$

где c – удельная теплоемкость.

Количество теплоты, необходимое для превращения жидкости в пар при постоянной температуре:

$$Q = rm, \quad (2)$$

где r – удельная теплота парообразования. Она показывает количество теплоты, необходимое для превращения 1 кг жидкости в пар при постоянной температуре. При обратном процессе – конденсации пара теплота выделяется:

$$Q = -rm. \quad (3)$$

Количество теплоты, необходимое для плавления твердого тела, взятого при температуре плавления:

$$Q = \lambda m, \quad (4)$$

где λ – удельная теплота плавления. Она показывает количество теплоты, необходимое для превращения 1 кг кристаллического вещества в жидкость. При обратном процессе – кристаллизации теплота выделяется:

$$Q = -\lambda m. \quad (5)$$

В замкнутой системе при теплообмене между отдельными телами:

$$0 = Q_1 + Q_2 + Q_3 + \dots \quad (6)$$

где Q_1, Q_2, Q_3 – количество теплоты, полученные или отданные телами.

6.2. Примеры решения задач

Пример 1. В сосуд, содержащий 3,3 л воды при 24 °С, опустили комок мокрого снега массой 640 г при температуре 0 °С. Определите массу воды в снежном комке, если установившаяся температура равна 11 °С.

Дано:

$$V = 3,3 \text{ л} = 3,3 \cdot 10^{-3} \text{ кг}$$

$$m = 0,64 \text{ кг}$$

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

$$T_3 = 11 \text{ °С} = 284 \text{ К}$$

$$T_2 = 24 \text{ °С} = 297 \text{ К}$$

$$c = 4200 \frac{\text{Дж}}{\text{кг} \cdot \text{К}}$$

$$\lambda = 330 \frac{\text{кДж}}{\text{кг}}$$

$$m_{\text{е}} = ?$$

Решение. Рассмотрим тепловые процессы, происходящие с телами, участвующими в теплообмене:

Теплая вода массой $m = \rho V$ охлаждается от 24 до 11°С.

$$Q_1 = cm(T_3 - T_2) = c\rho V(T_3 - T_2).$$

Вода, содержащаяся в снежном комке, нагревается от 0 до 11°С.

$$Q_2 = cm_{\text{е}}(T_3 - T_1).$$

Лед, содержащийся в комке, плавится.

$$Q_3 = \lambda m_{\text{л}}.$$

Образовавшаяся из льда вода нагревается от 0 до 11 °С.

$$Q_4 = cm_{\text{л}}(T_3 - T_1).$$

Таким образом, происходит 4 тепловых процесса. Уравнение теплового баланса: $0 = Q_1 + Q_2 + Q_3 + Q_4$

$$0 = c\rho V(T_3 - T_2) + cm_{\text{е}}(T_3 - T_1) + \lambda m_{\text{л}} + cm_{\text{л}}(T_3 - T_1).$$

Масса мокрого снега $m = m_{\text{л}} + m_{\text{е}}$. Выразим массу льда $m_{\text{л}} = m - m_{\text{е}}$ и подставим в уравнение теплового баланса

$$0 = c\rho V(T_3 - T_2) + cm_{\text{е}}(T_3 - T_1) + \lambda(m - m_{\text{е}}) + c(m - m_{\text{е}})(T_3 - T_1).$$

Из полученного уравнения определим массу воды в комке снега

$$m = \frac{c_p V(T_3 - T_2) + cm(T_3 - T_1) + \lambda m}{\lambda}.$$

Проверим размерность:

$$[m] = \frac{\frac{\text{Дж}}{\text{кгК}} \cdot \frac{\text{кг}}{\text{м}^3} \text{м}^3 (\text{К} - \text{К}) + \frac{\text{Дж}}{\text{кгК}} \text{кг} (\text{К} - \text{К}) + \frac{\text{Дж}}{\text{кг}} \text{кг}}{\frac{\text{Дж}}{\text{кг}}} = \text{кг}.$$

Произведем вычисления:

$$m = \frac{4200 \cdot 1000 \cdot 3,3 \cdot 10^{-3} (284 - 294) + 4200 \cdot 0,64 (284 - 273) + 330 \cdot 10^3 \cdot 0,64}{330 \cdot 10^3} = 0,2.$$

Ответ: масса воды в комке снега 0,2 кг.

Пример 2. В теплоизолированном сосуде содержится смесь воды массой 200 г и льда массой 40 г при температуре 0 °С. Затем в сосуд ввели 10 г пара при температуре 100 °С. Определите температуру после установления теплового равновесия.

Дано:

$$m_e = 0,2 \text{ кг}$$

$$m_l = 0,04 \text{ кг}$$

$$m_n = 0,04 \text{ кг}$$

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

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

$$c = 4200 \frac{\text{Дж}}{\text{кг} \cdot \text{К}}$$

$$\lambda = 330 \frac{\text{кДж}}{\text{кг}}$$

$$r = 2,3 \frac{\text{МДж}}{\text{кг}}$$

$$T_3 = ?$$

Решение. В теплообмене участвуют вода, лед и пар. Происходят тепловые процессы:

Плавление льда: $Q_1 = \lambda m_l$

Нагревание воды массой 200 г и воды, полученной из льда 40 г от 0°С до T_3 :

$$Q_2 = c(m_e + m_l)(T_3 - T_1).$$

Конденсация пара $Q_3 = r m_n$.

Охлаждение воды, полученной из пара от 100 °С до t :

$$Q_4 = c m_n (T_3 - T_2).$$

Уравнение теплового баланса:

$$0 = Q_1 + Q_2 + Q_3 + Q_4.$$

$$0 = \lambda m_l + c(m_e + m_l)(T_3 - T_1) + r m_n + c m_n (T_3 - T_2).$$

Из полученного уравнения выражаем температуру в сосуде после установления теплового равновесия:

$$T_3 = \frac{-\lambda m_l + c(m_e + m_l)T_1 + r m_n + c m_n T_2}{(m_e + m_l + m_n)c}.$$

Проверим размерность:

$$[T_3] = \frac{-\frac{\text{Дж}}{\text{кг}} \cdot \text{кг} + \frac{\text{Дж}}{\text{кгК}} (\text{кг} + \text{кг}) \text{К} + \frac{\text{Дж}}{\text{кг}} \cdot \text{кг} + \frac{\text{Дж}}{\text{кгК}} \cdot \text{кг} \cdot \text{К}}{(\text{кг} + \text{кг} + \text{кг}) \frac{\text{Дж}}{\text{кгК}}} = \text{К}.$$

Произведем вычисления:

$$T_3 = \frac{-330 \cdot 10^3 \cdot 0,04 + 4200 \cdot (0,2 + 0,04) 273 + 2,3 \cdot 10^6 \cdot 0,01 + 4200 \cdot 0,01 \cdot 373}{(0,2 + 0,04 + 0,01) \cdot 4200} = \\ = 286 \text{ К} = 13 \text{ }^\circ\text{С}.$$

Ответ: температура в сосуде после установления теплового равновесия $13 \text{ }^\circ\text{С}$.

601. Какую массу воды при температуре $20 \text{ }^\circ\text{С}$ можно заморозить испарением 100 г серного эфира, имеющего начальную температуру $20 \text{ }^\circ\text{С}$. Удельная теплоемкость эфира $0,5 \frac{\text{кал}}{\text{г} \cdot \text{град}}$, а теплота испарения $90 \frac{\text{кал}}{\text{г}}$.

Считать теплоту испарения эфира не зависящей от температуры воды. (80 г).

602. Вода при соблюдении необходимых предосторожностей может быть переохлаждена до температуры $-10 \text{ }^\circ\text{С}$. Какая масса льда образуется из 1 кг такой воды, если бросить в нее кусочек льда и тем вызвать замерзание? Теплоемкость переохлажденной воды считать независимой от температуры и равной теплоемкости обычной воды. (125 г).

603. В калориметре смешали 2 кг воды при температуре 50°С и 3 кг воды при температуре $30 \text{ }^\circ\text{С}$. Найдите температуру смеси. Теплоемкость калориметра не учитывать. ($38 \text{ }^\circ\text{С}$).

604. В ванну налили 210 кг воды при $10 \text{ }^\circ\text{С}$. Сколько воды при $100 \text{ }^\circ\text{С}$ нужно добавить в ванну, чтобы тепловое равновесие установилось при $37 \text{ }^\circ\text{С}$? (90 кг).

605. Нужно смешать воду при температуре $50 \text{ }^\circ\text{С}$ и воду при температуре $10 \text{ }^\circ\text{С}$ так, чтобы температура смеси оказалась равной $20 \text{ }^\circ\text{С}$. Во сколько раз больше надо взять холодной воды, чем горячей? (3).

606. Горячее тело при $50 \text{ }^\circ\text{С}$ приведено в соприкосновение с холодным телом при $10 \text{ }^\circ\text{С}$. При достижении теплового равновесия установилась температура $20 \text{ }^\circ\text{С}$. Во сколько раз теплоемкость холодного тела больше теплоемкости горячего? (3).

607. Медное тело, нагретое до $100 \text{ }^\circ\text{С}$, опущено в воду, масса которой равна массе медного тела. Тепловое равновесие наступило при температуре $30 \text{ }^\circ\text{С}$. Определите начальную температуру воды. ($24 \text{ }^\circ\text{С}$).

608. Определите начальную температуру (в Кельвинах) олова массой 0,6 кг, если при погружении его в воду массой 3 кг при температуре 300 К вода нагрелась на 2 К. (470 К).

609. В сосуд налили 0,1 кг воды при температуре 60 °С, после чего температура воды понизилась до 55 °С. Считая, что теплоемкость сосуда 70 Дж/К, найдите начальную температуру (в °С) сосуда. (25 °С).

610. Для измерения температуры воды массой 20 г в нее погрузили термометр, который показал 32,4 °С. Какова действительная температура воды, если теплоемкость термометра 2,1 Дж/К и перед погружением в воду он показывал температуру помещения 8,4 °С? (33 °С).

611. После опускания в воду, имеющую температуру 10 °С, тела, нагретого до 100 °С, установилась температура 40 °С. Какой станет температура (в °С) воды, если, не вынимая первого тела, опустить в нее еще одно такое же тело, нагретое также до 100 °С? (55 °С).

612. Нагретое до 110 °С тело опустили в сосуд с водой, в результате чего температура воды повысилась от 20 °С до 30 °С. Какой стала бы температура (в °С) воды, если бы в нее одновременно с первым опустили еще одно такое же тело, но нагретое до 120 °С? (39 °С).

613. В литр воды при температуре 20 °С брошен ком снега массой 250 г, частично уже растаявший, т. е. содержащий некоторое количество воды при 0 °С. Температура воды в сосуде при достижении теплового равновесия оказалась равна 5 °С. Определите количество воды в коме снега. (75 г).

614. В сосуд, содержащий 4,6 кг воды при 20 °С, бросают кусок стали массой 10 кг, нагретый до 500 °С. Вода нагревается до 100 °С, и часть ее обращается в пар. Найдите массу образовавшегося пара. (128 г)

615. В двух сосудах имеется по 4,18 кг воды при одинаковых температурах. В первый сосуд вливают 0,42 кг воды при температуре 100 °С, во второй вводят столько же водяного пара при температуре 100 °С. На сколько градусов температура в одном сосуде будет больше, чем в другом, после установления в каждом из них теплового равновесия? (50 °С).

616. Некоторую массу воды с начальной температурой 50 °С нагревают до температуры кипения, пропуская через нее пар при температуре 100 °С. На сколько процентов увеличится при этом масса воды? (10 %).

617. Количество теплоты, выделяемое при конденсации 1 кг пара при температуре 100 °С и охлаждения получившейся воды до 0 °С, затрачивается на таяние некоторого количества льда, температура которого 0 °С. Определите массу растаявшего льда. (8 кг).

618. Смесь, состоящую из 2,51 кг льда и 7,53 кг воды при общей температуре 0 °С, нужно нагреть до температуры 50 °С, пропуская пар при температуре 100 °С. Определите необходимое для этого количество пара. (1,17 кг).

619. Из сосуда с небольшим количеством воды при $0\text{ }^{\circ}\text{C}$ откачивают воздух. При этом испаряется $6,6\text{ г}$ воды, а оставшаяся часть замерзает. Найдите массу образовавшегося льда. (50 г).

620. В закрытом медном колориметре массой $m_1 = 0,2\text{ кг}$ находится лед массой $m_2 = 1\text{ кг}$ при температуре $-10\text{ }^{\circ}\text{C}$. В колориметр впускают пар массой $m_3 = 0,2\text{ кг}$, имеющий температуру $110\text{ }^{\circ}\text{C}$. Какая температура установится в колориметре? Удельную теплоемкость паров воды в интервале от 100 до $110\text{ }^{\circ}\text{C}$ считать равной $1,7\text{ кДж}/(\text{кг}\cdot\text{K})$. ($37\text{ }^{\circ}\text{C}$).

621. При соблюдении необходимых предосторожностей вода может быть переохлаждена до температуры $-10\text{ }^{\circ}\text{C}$. Сколько льда образуется из такой воды массой 1 кг , если в нее бросить кусочек льда и этим вызвать замерзание воды? Какую температуру должна иметь переохлажденная вода, чтобы она целиком превратилась в лед? ($0,12\text{ кг}$; $-160\text{ }^{\circ}\text{C}$).

622. В колбе находилась вода при $0\text{ }^{\circ}\text{C}$. Выкачиванием из колбы воздуха заморозили всю воду в сосуде. Какая часть воды при этом испарилась, если колба была теплоизолирована? ($11,7\text{ }\%$).

623. В дьюаровском сосуде, содержащем жидкий азот при температуре $-195\text{ }^{\circ}\text{C}$, за время 24 ч испаряется азот объемом 10^{-3} м^3 при температуре окружающего воздуха $20\text{ }^{\circ}\text{C}$. Определите удельную теплоту парообразования азота, если известно, что при температуре $0\text{ }^{\circ}\text{C}$ в том же сосуде за время $22,5\text{ ч}$ тает лед массой $4\cdot 10^{-3}\text{ кг}$. Считать, что количество теплоты, подводимое ежесекундно к сосуду, пропорционально разности температур снаружи и внутри сосуда. Плотность жидкого азота $800\text{ кг}/\text{м}^3$. ($0,019\text{ МДж}/\text{кг}$).

624. Лед массой 1 кг при температуре $0\text{ }^{\circ}\text{C}$ заключен в теплонепроницаемый сосуд и подвергнут давлению $6,9\cdot 10^7\text{ Па}$. Сколько льда расплавится, если при увеличении давления на $\Delta p = 3,8\cdot 10^7\text{ Па}$ температура плавления льда понижается на $1\text{ }^{\circ}\text{C}$? Понижение температуры плавления от $0\text{ }^{\circ}\text{C}$ считать пропорциональным увеличению давления сверх атмосферного. ($11,3\text{ г}$).

625. Некоторая установка, развивающая мощность 30 кВт , охлаждается проточной водой, текущей по спиральной трубке сечением 1 см^2 . При установившемся режиме проточная вода нагревается на $15\text{ }^{\circ}\text{C}$. Определите скорость воды, предполагая, что на нагревание воды идет $30\text{ }\%$ мощности, развиваемой установкой. ($1,44\text{ м}/\text{с}$).

626. Санки массой 5 кг скатываются с горы, которая образует с горизонтом 30 ° . Пройдя расстояние 50 м , санки развивают скорость $4,1\text{ м}/\text{с}$. Вычислите количество теплоты, выделенное при трении полозьев о снег. ($1,19\text{ кДж}$).

627. Свинцовая пуля, летящая со скоростью 400 м/с, попадает в стальную плиту и отскакивает от нее со скоростью 300 м/с. Какая часть пули расплавится, если ее температура в момент удара была равна 107 °С и на нагревание пули пошло 80 % всей работы, совершаемой при ударе? (0,05).

628. Тигель с оловом нагревается электрическим током. Количество теплоты, ежесекундно подводимой к тиглю, постоянно. За 10 мин олово нагрелось от 20 до 70 °С и спустя еще 83 мин полностью расплавилось. Найди удельную теплоту плавления олова. (58,5 кДж/кг).

629. В открытом сосуде находится лед массой 10 кг при температуре -10 °С. Сколько воды окажется в сосуде, если льду сообщить количество теплоты 20 МДж? (4,7 кг).

630. В чашке находится 500 г льда при 0 °С. В чашку вливают 200 г воды, нагретой до температуры 80 °С. Какова будет установившаяся температура и что будет находиться в чашке? (0 °С; 400 г воды и 300 г льда).

631. Какому давлению был подвергнут лед массой 20 г, заключенный в теплонепроницаемую оболочку при 0 °С, если при этом расплавилось 1,6 г льда и, кроме того, известно, что при увеличении давления на 14 МПа температура плавления понижается на 1 °С? Считать, что понижение температуры плавления пропорционально повышению давления. ($1,77 \cdot 10^8$ Па).

632. В колориметр, содержащий 100 г льда при 0 °С, впущен пар, имеющий температуру 100 °С. Сколько воды окажется в колориметре после того, как весь лед растает? (112,5 г).

633. При сгорании 1 г водорода и превращении его в воду выделяется количество теплоты, равное 142 кДж. Сколько угля с удельной теплотой сгорания 29 МДж/кг надо сжечь для диссоциации 1 л воды, если выделяемой углем энергии используется 50 %. (1,08 кг).

634. Холодильник потребляет от сети мощность 416 Вт, ежесекундные потери энергии в пространство составляют 840 Вт. За какое время можно заморозить в холодильнике 3,6 кг воды, взятой при температуре 20 °С? (1 час).

635. На сколько нагреется медная пластинка размером 2×6 см² при нарезании в ней резьбы с шагом 0,75 мм, если при нарезке к воротку нужно приложить момент силы 4,9 Н·м? Размером отверстия пренебречь. Плотность меди 8900 кг/м³. (10,3 °С).

636. Трансформатор, погруженный в масло, вследствие перегрузок начинает нагреваться. Каков его КПД, если при полной мощности 60 кВт 40 кг масла в течение 4 мин нагрелись на 20 °С? Удельная теплоемкость масла 2,1 кДж/(кг·К). Количеством теплоты, идущим на нагревание металла трансформатора и его обмотки, пренебречь. (88 %).

637. Вращающийся в подшипнике вал диаметром 10 см делает 200 об/мин и давит на подшипник с силой 12 кН. Определите часовой расход масла, пропускаемого для охлаждения подшипника, если температура масла при подаче равна 12 °С, а при выходе 60 °С. Коэффициент трения 0,015, удельная теплоемкость масла 1,7 кДж/(кг·К). (8,3 кг/ч).

638. Заряд 305-миллиметровой пушки содержит 155 кг пороха. Масса снаряда 446 кг. Какова максимальная дальность полета снаряда, если КПД орудия равен 28 %? Удельная теплота сгорания пороха 4,18 МДж/кг, сопротивлением воздуха пренебречь. (83,1 км).

639. Свинцовая пуля массой 10 г, летящая горизонтально со скоростью 300 м/с, попадает в неподвижный стальной куб массой 100 г, лежащий на гладком горизонтальном столе. Какова будет температура тел после удара? Удар считать абсолютно неупругим, температура пули в момент удара 25 °С, кубика 15 °С. (24,1 °С).

6.4. Контрольные тесты

1. На рисунке приведен график зависимости температуры твердого тела от отданного им количества теплоты.

Масса тела 4 кг. Какова удельная теплоемкость вещества этого тела? Ответ дайте в Дж/(кг·К).

2. Внутренняя энергия монеты увеличивается, если ее

- 1) заставить вращаться;
- 2) заставить двигаться с большей скоростью;
- 3) подбросить вверх;
- 4) подогреть.

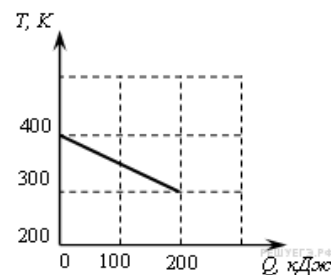
3. На рисунке приведена зависимость температуры твердого тела от полученного им количества теплоты.

Масса тела 2 кг. Какова удельная теплоемкость вещества этого тела? Ответ дайте в Дж/(кг·К).

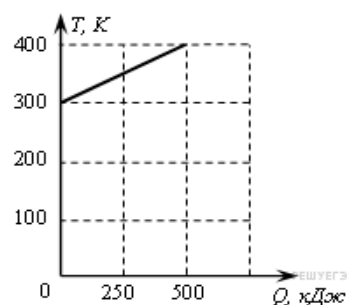
4. На рисунке приведена зависимость температуры твердого тела от полученного им количества теплоты.

Масса тела 2 кг. Какова удельная теплоемкость вещества этого тела? Ответ дайте в Дж/(кг·К).

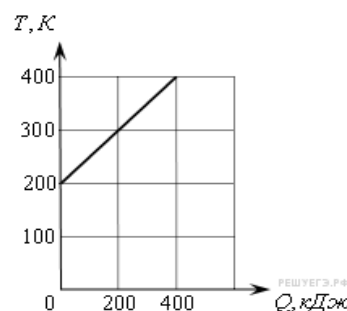
5. Чтобы нагреть 96 г молибдена на 1 К, нужно передать ему количество теплоты равное 24 Дж. Чему равна удельная теплоемкость этого вещества? Ответ дайте в Дж/(кг·К).



К тесту 1



К тесту 3



К тесту 4

6. На рисунке представлен график зависимости температуры T воды массой m от времени t при осуществлении теплоотвода с постоянной мощностью P .

В момент времени $t = 0$ вода находилась в газообразном состоянии. Какое из приведенных ниже выражений определяет удельную теплоемкость льда по результатам этого опыта?

- а) $\frac{P \cdot \Delta t_5}{m \cdot \Delta T_3}$; б) $\frac{P \cdot \Delta t_2}{m}$; в) $\frac{P \cdot \Delta t_2}{m \cdot \Delta T_2}$; г) $\frac{P \cdot \Delta t_4}{m}$

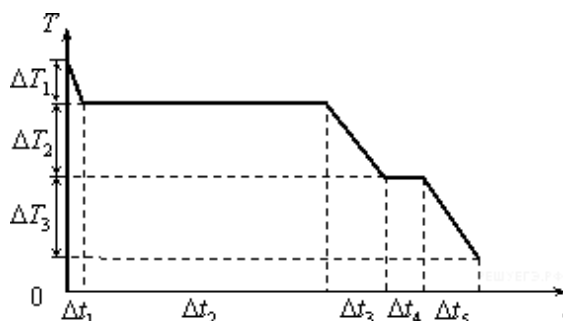
7. При теплопередаче твердому телу массой m количества теплоты Q температура тела повысилась на ΔT . Какое из приведенных ниже выражений определяет удельную теплоемкость вещества этого тела?

- а) $\frac{Q}{m}$; б) $\frac{Q}{\Delta T}$; в) $\frac{Q}{m \Delta T}$; г) $Q \cdot m \cdot \Delta T$.

8. На рисунке представлен график зависимости температуры T воды массой m от времени t при осуществлении теплоотвода с постоянной мощностью P .

В момент времени $t = 0$ вода находилась в газообразном состоянии. Какое из приведенных ниже выражений определяет удельную теплоемкость жидкой воды по результатам этого опыта?

- а) $\frac{P \cdot \Delta t_1}{m \cdot \Delta T_1}$; б) $\frac{P \cdot \Delta t_2}{m}$; в) $\frac{P \cdot \Delta t_3}{m \cdot \Delta T_2}$; г) $\frac{P \cdot \Delta t_4}{m}$.



К тесту 6 и 8

9. Первому телу сообщили количество теплоты 1 кДж, а второму – 2 кДж. Массы тел одинаковы. В результате температура первого тела повысилась на 100 К, а второго – повысилась на 50 К. Можно утверждать, что удельная теплоёмкость у вещества первого тела

- 1) больше, чем у вещества второго тела
- 2) меньше, чем у вещества второго тела
- 3) такая же, как у вещества второго тела
- 4) не может быть соотнесена с удельной теплоёмкостью вещества второго тела

10. От первого тела отвели количество теплоты 2 кДж, а от второго – 1 кДж. Массы тел одинаковы. В результате температура первого тела понизилась на 40 К, а второго – понизилась на 10 К. Можно утверждать, что удельная теплоёмкость у вещества первого тела

- 1) больше, чем у вещества второго тела
- 2) меньше, чем у вещества второго тела

3) такая же, как у вещества второго тела

4) не может быть соотнесена с удельной теплоёмкостью вещества второго тела

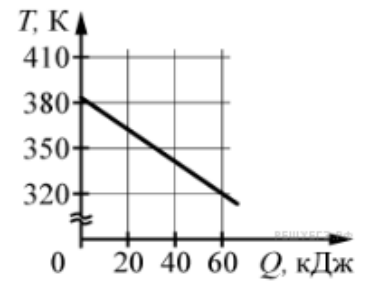
11. Твёрдое тело остывает. На рисунке представлен график зависимости температуры тела от отданного им количества теплоты. Удельная теплоёмкость тела $500 \text{ Дж}/(\text{кг}\cdot\text{К})$. Чему равна масса тела?

а) 1 кг; б) 2 кг; в) 3 кг; г) 4 кг.

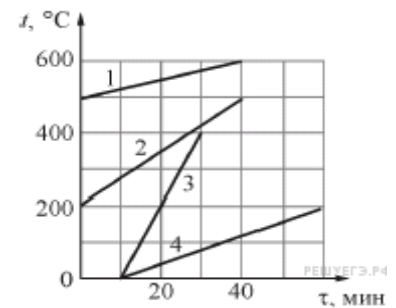
12. Четыре шарика 1, 2, 3 и 4 одинаковой массы, сделанные из различных материалов, находятся в твёрдом состоянии. Шарик нагревают в одной и той же печи. На рисунке приведены графики зависимостей температуры t шариков от времени τ . Наибольшей удельной теплоёмкостью обладает шарик.

13. В цилиндре под поршнем находится твёрдое вещество. Цилиндр поместили в раскалённую печь. На рисунке показан график изменения температуры T вещества по мере поглощения им количества теплоты Q . Какие участки графика соответствуют нагреванию вещества в газообразном состоянии и кипению жидкости?

Установите соответствие между тепловыми процессами и участками графика. К каждой позиции первого столбца подберите соответствующую позицию второго и запишите в таблицу выбранные.



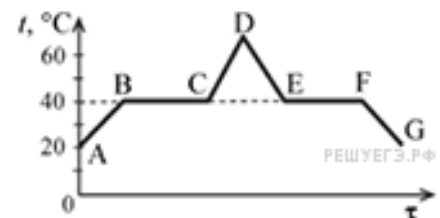
К тесту 11



К тесту 12

Процессы	Участки графика
А) Нагревание вещества в газообразном состоянии	1) CD
Б) Кипение жидкости	2) BC
	3) AB
	4) DE

14. В начальный момент в сосуде под лёгким поршнем находится только жидкий эфир. На рисунке показан график зависимости температуры t эфира от времени τ его нагревания и последующего охлаждения. Установите соответствие между процессами, происходящими с эфиром, и участками графика. К каждой позиции первого столбца подберите соответствующую позицию второго и запишите в таблицу выбранные цифры под соответствующими буквами.



К тесту 13 и 14

Процессы	Участки графика
	1) BC

А) Нагревание паров эфира	2) CD
Б) Конденсация эфира	3) DE
	4) EF

7. ЭНТРОПИЯ

7.1. Основные формулы

- Основное соотношение термодинамики:

$$TdS \geq dU + PdV,$$

где T – абсолютная температура; dS – изменение энтропии, dU – изменение внутренней энергии, P – давление, dV – изменение объема.

- Неравенство Клаузиуса:

$$\frac{\delta Q_1}{T_1} - \frac{\delta Q_2}{T_2} \leq 0,$$

где δQ_1 и δQ_2 – элементарное тепло, получаемое термодинамической системой соответственно при температуре T_1 и T_2 .

- Изменение энтропии:

$$\Delta S = \int \frac{\delta Q}{T},$$

где δQ – элементарное тепло, получаемое термодинамической системой при температуре T .

7.2. Примеры решения задач

Пример 1. Определить изменение энтропии при нагревании воды, массой 100 г от 0 °С до температуры 100 °С и последующим превращением воды в пар.

Дано:

$$m = 0,1 \text{ кг}$$

$$T_1 = 273 \text{ К}$$

$$T_2 = 373 \text{ К}$$

$$\lambda = 22,6 \cdot 10^5 \text{ Дж/кг}$$

$$C = 4,2 \cdot 10^3 \text{ Дж/(кг} \cdot \text{К)}$$

$$\Delta S = ?$$

Решение. Определим отдельно изменение энтропии $\Delta S'$ при нагревании воды и изменение энтропии $\Delta S''$ при ее превращении в пар. Тогда полное изменение энтропии будет равно:

$$\Delta S = \Delta S' + \Delta S''.$$

Изменение энтропии выражается формулой:

$$\Delta S = \int \frac{\delta Q}{T}. \quad (1)$$

При бесконечно малом изменении dT температуры нагреваемого тела, необходимо количество теплоты

$$\delta Q = C \cdot m \cdot dT,$$

где C – удельная теплоемкость воды.

Подставив это выражение в (1) получим:

$$\Delta S' = \int_{T_1}^{T_2} \frac{C \cdot m \cdot dT}{T} = C \cdot m \cdot \ln \frac{T_2}{T_1}. \quad (2)$$

Изменение энтропии при превращении воды в пар, т. к. $T_2 = \text{const}$:

$$\Delta S'' = \int \frac{\delta Q}{T_2} = \frac{1}{T_2} \int \delta Q = \frac{Q}{T_2}.$$

Количество теплоты необходимое для превращения воды в пар равно:

$$Q = \lambda \cdot m,$$

где λ – удельная теплота парообразования воды.

Тогда изменение энтропии при испарении воды будет равно:

$$\Delta S'' = \frac{\lambda \cdot m}{T_2}. \quad (3)$$

Общее изменение энтропии с учетом (2) и (3) принимает вид:

$$\Delta S = C \cdot m \cdot \ln \frac{T_2}{T_1} + \frac{\lambda \cdot m}{T_2}. \quad (4)$$

Проверим размерность: $(\Delta S) = \left[\frac{\text{Дж} \cdot \text{кг}}{\text{кг} \cdot \text{К}} \right] = \left[\frac{\text{Дж}}{\text{К}} \right]$.

Подставив, числовые значения величин в (4) получаем:

$$\Delta S = \Delta S' + \Delta S'' = 131,08 + 605,89 = 736,97 \text{ Дж/К}.$$

Ответ: изменение энтропии воды равно 736,97 Дж/К.

Пример 2. Определить изменение энтропии при изотермическом расширении кислорода, массой $m = 10$ г от объема $V_1 = 25$ л до объема $V_2 = 100$ л.

Дано:

$$m = 10^{-2} \text{ кг}$$

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

$$V_2 = 10^{-1} \text{ м}^3$$

$$\Delta S = ?$$

Решение. Так как процесс изотермический ($T = \text{const}$), то изменения энтропии можно записать

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

При изотермическом процессе изменение внутренней энергии равно нулю $\Delta U = 0$, тогда из первого закона термодинамике ($Q = A + \Delta U$) имеем $Q = A$, а работа при изотермическом процессе определяется по формуле:

$$A = \frac{m}{M} RT \ln \frac{V_2}{V_1}, \quad (2)$$

где $M = 32 \cdot 10^{-3}$ кг/моль – молярная масса кислорода.

С учетом (2) равенство (1) принимает

$$\Delta S = \frac{m}{M} R \ln \frac{V_2}{V_1}.$$

Проверим размерность: $[\Delta S] = \left[\frac{\text{кг} \cdot \text{моль} \cdot \text{Дж}}{\text{кг} \cdot \text{К} \cdot \text{моль}} \right] = \left[\frac{\text{Дж}}{\text{К}} \right].$

Произведем вычисления

$$\Delta S = \frac{10^{-2} \cdot 8,31}{32 \cdot 10^{-3}} \ln \frac{100}{25} = 3,6 \text{ Дж/К}.$$

Ответ: $\Delta S = 3,6 \text{ Дж/к}.$

7.3. Задачи

701. Найти изменение энтропии 5 г водорода изотермически расшившегося от объема 10 л до объема 25 л. (19,04 Дж/К).

702. Найти приращение энтропии одного моля углекислого газа при увеличении его абсолютной температуры в 2 раза, если нагревание происходит изобарически. (25 Дж/К).

703. Во сколько раз следует изотермически увеличить объем 4 молей идеального газа, чтобы его энтропия изменилась на 23 Дж/К ? (в 2 раза).

704. Гелий, массой 1,7 г адиабатически расширили в 2 раза, а затем изобарически сжали до первоначального объема. Найти приращение энтропии газа в этом процессе. (-6,09 Дж/К).

705. Кислород массой 2 кг увеличил свой объем в 5 раз изотермически, затем 4 раза адиабатически. Найти изменение энтропии в каждом из указанных процессов. (835,9 Дж/К ; 0).

706. Определить изменение энтропии ν молей идеального газа при адиабатическом процессе. (0).

707. Найти изменение энтропии одного моля идеального газа при изохорическом процессе. ($\Delta S = \frac{i}{2} R \cdot \ln \frac{T_2}{T_1}$).

608. Найти изменение энтропии одного моля идеального газа изобарическом процессе. ($\Delta S = \frac{i+2}{2} R \cdot \ln \frac{T_2}{T_1}$).

709. Два моля кислорода сначала изобарно нагрели, при этом объем газа увеличился в 2 раза, а затем изохорно охладили, при этом давление уменьшилось в 2 раза. Определить изменение энтропии в ходе указанных процессов. (11,47 Дж/К).

710. Найти выражение для энтропии ν молей идеального газа.

711. Вычислить изменения внутренней энергии и энтропии одного моля идеального газа при расширении по политропе $PV^n = \text{const}$ от объ-

ема V_1 до объема V_2 . Рассмотреть частные случаи изотермического и адиабатического процессов.

712. Вычислить изменения внутренней энергии и энтропии одного моля одноатомного газа, а также количества поглощенного тепла при расширении газа по политропе $PV^\beta = \text{const}$ от объема $V_1 = 1$ л и давления $P_1 = 20$ атм. до объема $V_2 = 3$ л. Температура во время процесса такова, что для молярной теплоемкости можно принять $C_V = 3/2 R$. (-625 кал/моль; -4 кал/(моль·°C); -417 кал/моль).

713. При некоторой политропическом процессе давление и объем определенной массы кислорода меняются от $P_1 = 4$ атм. и $V_1 = 1$ л до объема $P_2 = 1$ атм. $V_2 = 2$ л. Температура в начале процесса $T_1 = 500$ К. Какое количество тепла получил кислород от окружающей среды? Насколько изменились энтропия и внутренняя энергия газа? (-117 кал; -70 кал; -0,20 кал/К).

714. Найти изменения энтропии ΔS 30 г льда при превращении его в пар, если начальная температура льда -40 °C, а температура пара 100 °C. Теплоемкости воды и льда считать постоянными, а все процессы – происходящими при атмосферном давлении. Удельная теплоемкость льда $c = 0,5$ кал/(г·°C). (63 кал/°C).

715. Найти суммарное изменение энтропии ΔS (воды и железа) при погружении 100 г железа, нагретого до 300 °C, в воду при температуре 15 °C. Удельная теплоемкость железа равна $c = 0,11$ кал/(г·°C). (3,2 кал/°C).

716. Энтропия 1 г азота при температуре 25 °C и давлении 10^5 Па равна 6,84 Дж/К. Определить энтропию 2 г азота при температуре 100 °C и давлении $2 \cdot 10^5$ Па. (13,75 Дж/К).

717. Энтропия моля кислорода при температуре 25 °C и давлении 10^5 Па равна 204,8 Дж/К. В результате изотермического расширения объем, занимаемый газом, увеличился в два раза. Определить энтропию кислорода в конечном состоянии. (210,6 Дж/К).

718. Найти приращение энтропии одного моля углекислого газа при увеличении его абсолютной температуры в 2 раза, если нагревание происходит изохорно. (19 Дж/К).

719. Два моля идеального газа сначала изохорно охладили, а затем изобарно расширили так, что температура газа стала равна первоначальной. Найти приращение энтропии газа, если его давление в данном процессе изменилось в 3 раза.

720. Найти приращение энтропии двух молей идеального газа с показателем адиабаты $\gamma = 1,3$, если в результате некоторого процесса объем газа увеличился в 2 раза, а давление уменьшилось в 3 раза. (-11 Дж/К).

721. Процесс расширения двух молей аргона происходит так, что

давление газа увеличивается прямопропорционально его объему. Найти приращение энтропии газа при увеличении его объема в 2 раза. (46 Дж/К).

7.4. Контрольный тест

1. В каком направлении может изменяться энтропия замкнутой системы для обратимого процесса?

- а) или уменьшаться, или увеличиваться; в) возрасть;
б) уменьшаться; г) оставаться постоянной.

2. В каком направлении может изменяться энтропия замкнутой системы для необратимого процесса?

- а) или уменьшаться, или увеличиваться; в) возрасть;
б) уменьшаться; г) оставаться постоянной

3. Изменение энтропии для обратимого процесса равен:

- а) $\Delta S \leq 0$; б) $\Delta S \geq 0$; в) $\Delta S > 0$; г) $\Delta S = 0$.

4. Изменение энтропии для необратимого процесса равен:

- а) $\Delta S \leq 0$; б) $\Delta S \geq 0$; в) $\Delta S > 0$; г) $\Delta S = 0$.

5. Приведенное количество теплоты, сообщаемое телу в любом круговом процессе, равно:

- а) $\oint \frac{\delta Q}{T} \leq 0$; б) $\oint \frac{\delta Q}{T} \geq 0$; в) $\oint \frac{\delta Q}{T} = 0$; г) $\oint \frac{\delta Q}{T} \neq 0$.

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Трофимова, Т.И. Курс физики: учеб. пособие для вузов / Т.И. Трофимова. – 17-е изд., стер. – М. : Академия, 2008. – 560 с.
2. Чертов, А.Г. Задачник по физике / А.Г. Чертов, А.А. Воробьев. – 8-е изд., перераб. и доп. – М. : Физматлит, 2008. – 640 с.
3. Сивухин, Д.В. Общий курс физики : учеб. пособие / Д.В. Сивухин. – М. : Физматлит : МФТИТ. 1; Механика. – 4-е изд., стер. – 2005. – 560 с.
4. Зисман, Г.А. Курс общей физики : учеб. пособие для вузов ; в 3-х т. Т.3 / Г.А. Зисман, О.М. Тодес. – СПб. : Лань Оптика. Физика атомов и молекул. Физика атомного ядра и микрочастиц. – 6-е изд., стер. – 2007. – 512 с.
5. Савельев, И.В. Сборник вопросов и задач по общей физике : учеб. для вузов / И.В. Савельев. – 3-е изд., стер. – СПб. : Лань, 2005. – 288 с.

ТАБЛИЦЫ ФИЗИЧЕСКИХ ВЕЛИЧИН

1. Приставки СИ для обозначения десятичных и дольных единиц

Наименование	Обозначение приставки		Множитель
	русское	международное	
тера	Т	T	10^{12}
гига	Г	G	10^9
мега	М	M	10^6
кило	к	K	10^3
гекто	г	H	10^2
дека	да	Da	10
деци	д	d	10^{-1}
санти	с	c	10^{-2}
милли	м	m	10^{-3}
микро	мк	μ	10^{-6}
нано	н	n	10^{-9}
пико	п	p	10^{-12}
фемто	ф	f	10^{-15}
атто	а	a	10^{-18}

2. Соотношение между внесистемными единицами и единицами СИ.

Длина	$1 \text{ мм} = 10^{-1} \text{ см} = 10^{-3} \text{ м}$.
Объём, вместимость	$1 \text{ л} = 10^{-3} \text{ м}^3 = 10^{-3} \text{ см}^3$
Масса	$1 \text{ г} = 10^{-3} \text{ кг}$; $1 \text{ т} = 10^3 \text{ кг}$
Давление	$1 \text{ кгс/см}^2 = 9,81 \cdot 10^4 \text{ Па}$ $1 \text{ бар} = 10^5 \text{ Па}$ $1 \text{ мм Hg} = 133 \text{ Па}$ $1 \text{ атм} = 1,01 \cdot 10^5 \text{ Па}$
Концентрация	$1 \text{ см}^{-3} = 10^6 \text{ м}^{-3}$
Теплота (количество теплоты)	$1 \text{ кал} = 4,19 \text{ Дж}$ $1 \text{ ккал} = 4,19 \cdot 10^3 \text{ Дж}$.

3. Основные физические постоянные.

Атомная единица массы, а.е.м.	$1,66 \cdot 10^{-27} \text{ кг}$
Постоянная Авогадро, N_A	$6,02 \cdot 10^{23} \text{ моль}^{-1}$
Молярная газовая постоянная, R	$8,31 \text{ Дж/К} \cdot \text{моль}$
Постоянная Больцмана, k	$1,38 \cdot 10^{-23} \text{ Дж/К}$
Нормальное атмосферное давление, P_0	101325 Па
Молярный объём идеального газа при нормальных условиях, V_μ	$2,241 \cdot 10^{-2} \text{ м}^3/\text{моль}$

Продолжение приложения

4. Молярная масса

азота	$28 \cdot 10^{-3}$ кг/моль	кислорода	$32 \cdot 10^{-3}$ кг/моль
аргона	$40 \cdot 10^{-3}$ кг/моль	лития	$6 \cdot 10^{-3}$ кг/моль
водорода	$2 \cdot 10^{-3}$ кг/моль	неона	$20 \cdot 10^{-3}$ кг/моль
водяных паров	$18 \cdot 10^{-3}$ кг/моль	серебра	$108 \cdot 10^{-3}$ кг/моль
гелия	$4 \cdot 10^{-3}$ кг/моль	углекислого газа	$44 \cdot 10^{-3}$ кг/моль

5. Удельные теплоемкости

Вода	4200 Дж/(кг•К)
Лед	2100 Дж/(кг•К).
Медь	370 Дж/(кг•К)
Олово	250 Дж/(кг•К)
Сталь	460 Дж/(кг К)
Свинец	126 Дж/(кг•К)
Удельная теплота плавления льда	330 кДж/кг
удельная теплота парообразования воды	2,3 МДж/кг
удельная теплота плавления свинца	25 кДж/кг.

СОДЕРЖАНИЕ

ВВЕДЕНИЕ	3
ОБЩИЕ МЕТОДИЧЕСКИЕ УКАЗАНИЯ К РЕШЕНИЮ ЗАДАЧ	4
1. ЗАКОНЫ ИДЕАЛЬНЫХ ГАЗОВ. МОЛЕКУЛЯРНО-КИНЕТИЧЕСКАЯ ТЕОРИЯ ГАЗОВ	5
1.1. Основные формулы и соотношения.....	5
1.2. Примеры решения задач	6
1.3. Задачи.....	9
1.4. Контрольный тест	14
2. СТАТИСТИЧЕСКИЕ ЗАКОНОМЕРНОСТИ	17
2.1. Основные формулы	17
2.2. Примеры решения задач	18
2.3. Задачи.....	20
2.4. Контрольный тест	24
3. ПЕРВОЕ НАЧАЛО ТЕРМОДИНАМИКИ	26
3.1. Основные формулы	26
3.2. Примеры решения задач	27
3.3. Задачи.....	30
3.4. Контрольный тест	33
4. ТЕПЛОЕМКОСТЬ ГАЗОВ.....	37
4.1. Основные формулы	37
4.2. Примеры решения задач	38
4.3. Задачи.....	41
4.4. Контрольный тест	43
5. КРУГОВЫЕ ПРОЦЕССЫ. ВТОРОЕ НАЧАЛО ТЕРМОДИНАМИКИ	44
5.1. Основные формулы	44
5.2. Примеры решения задач	45
5.3. Задачи.....	48
5.4. Контрольные тесты	53
6. УРАВНЕНИЕ ТЕПЛОВОГО БАЛАНСА.....	54
6.1. Основные формулы и соотношения.....	54
6.2. Примеры решения задач	55
6.4. Контрольные тесты	61

7. ЭНТРОПИЯ	64
7.1. Основные формулы	64
7.2. Примеры решения задач	64
7.3. Задачи	66
7.4. Контрольный тест	68
БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК	69
ПРИЛОЖЕНИЕ. Таблицы физических величин	70

Учебное издание

Дейнекина Наталья Александровна

Кравченко Ольга Владимировна

ФИЗИКА: ТЕРМОДИНАМИКА

Сборник задач

Отпечатано методом прямого репродуцирования

План 2017 г. Поз. 9.22. Подписано в печать 11.12.2017 г.
Уч.-изд. л. 4,5. Усл. печ. л. 4,1. Зак. 288. Тираж 40 экз. Цена 182 руб.

Издательство ДВГУПС
680021, г. Хабаровск, ул. Серышева, 47

Кафедра «Физика и теоретическая механика»

Н.А. Дейнекина, О.В. Кравченко

ФИЗИКА: ТЕРМОДИНАМИКЕ

Сборник задач

Хабаровск
2017