

Министерство науки и высшего образования Российской Федерации  
Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение  
высшего образования  
«Владимирский государственный университет  
имени Александра Григорьевича и Николая Григорьевича Столетовых»

# СБОРНИК ЗАДАЧ ПО ТЕРМОДИНАМИКЕ



Владимир 2022

УДК 621.1.016.7

ББК 31.31

С23

**Авторы-составители:** А. Ю. Абаляев, А. Б. Люхтер

**Рецензенты:**

Доктор технических наук, профессор  
профессор кафедры строительных и дорожных машин  
Нижегородского государственного технического университета  
им. Р. Е. Алексеева  
*Ю. И. Молев*

Доктор технических наук, доцент, старший научный сотрудник  
специалист по сертификации АО «Камешковский механический завод»  
*А. Р. Кульчицкий*

**Сборник** задач по термодинамике / авт.-сост.: А. Ю. Абаляев, А. Б. Люхтер ; Владим. гос. ун-т им. А. Г. и Н. Г. Столетовых. – Владимир : Изд-во ВлГУ, 2022. – 84 с.  
ISBN 978-5-9984-1661-3

Содержит задачи по дисциплинам «Термодинамика», «Теплотехника» и «Тепломассообмен», а также рекомендательный библиографический список.

Предназначен для студентов направлений подготовки 13.03.01 – Теплоэнергетика, 13.03.02 – Электроэнергетика и электротехника, 13.03.03 – Энергетическое машиностроение. Может быть полезен при самостоятельной работе.

Рекомендовано для формирования профессиональных компетенций в соответствии с ФГОС ВО.

Библиогр.: 6 назв.

УДК 621.1.016.7

ББК 31.31

ISBN 978-5-9984-1661-3

© Абаляев А. Ю.,  
Люхтер А. Б., 2022

## **ВВЕДЕНИЕ**

Основа процесса обучения в университете – самостоятельная работа студентов над материалом соответствующего содержания. Считается, что цель обучения достигнута, если студент научился правильно и творчески применять основные положения теории, о чем с наибольшей достоверностью может свидетельствовать умение студента решать учебные задачи.

В издании приведены 253 задачи, охватывающие практически все разделы дисциплин «Термодинамика» и «Тепломассообмен». Задачи различаются по степени сложности, однако выполнение даже наиболее трудных из них вполне по силам для любого студента.

В сборнике не даны элементы теории, расчетные уравнения и формулы. Предполагается, что это поможет студентам проявить творческий подход в самостоятельной работе. Все необходимые для решения задач теоретические положения, расчетные формулы, таблицы и прочие материалы можно найти в литературе, приведенной в рекомендательном библиографическом списке, и приложении.

В условиях некоторых задач встречаются старые единицы измерения. Это сделано для того, чтобы студенты умели переводить их в Международную систему единиц (СИ).

## 1. Основные понятия, идеальный газ, смеси идеальных газов

1.1. Определить количество молекул, содержащихся в газе объёмом  $1 \text{ мм}^3$  при давлении  $0,1 \text{ МПа}$  и температуре  $20^\circ\text{C}$ .

Решение:

Абсолютная температура газа равна  $T = 273,15 \text{ К} + t, ^\circ\text{C} = 273,15 \text{ К} + 20^\circ\text{C} = 293,15 \text{ К}$ .

Число молекул газа

$$N = \frac{pV N_A}{T \mu R} = \frac{0,1 \cdot 10^6 \text{ Па} \cdot 1 \cdot 10^{-9} \text{ м}^3 \cdot 6,022 \cdot 10^{23} \text{ моль}^{-1}}{293,15 \text{ К} \cdot 8,314 \frac{\text{Дж}}{\text{моль} \cdot \text{К}}} = 2,471 \cdot 10^{16}.$$

Ответ:  $2,471 \cdot 10^{16}$  молекул.

1.2. Определить абсолютное давление газа в сосуде, если показание ртутного манометра равно  $375 \text{ мм.рт.ст.}$ , а показание барометра  $750 \text{ мм.рт.ст.}$ . Давление выразить в барах.

Решение:

Давлению  $1 \text{ бар}$  соответствует давление  $750,06 \text{ мм.рт.ст.}$ , поэтому

$$p_{\text{абс}} = p_0 + p_{\text{м}} = \frac{750 \text{ мм.рт.ст.}}{750,06 \frac{\text{мм.рт.ст.}}{\text{бар}}} + \frac{375 \text{ мм.рт.ст.}}{750,06 \frac{\text{мм.рт.ст.}}{\text{бар}}} = 1,5 \text{ бар}.$$

Ответ:  $1,5 \text{ бар}$ .

1.3. Определить удельный объём и плотность воздуха, массой  $32 \text{ кг}$ , занимающего объём  $25 \text{ м}^3$ .

Решение:

Удельный объём воздуха равен

$$v = \frac{V}{m} = \frac{25 \text{ м}^3}{32 \text{ кг}} = 0,781 \frac{\text{м}^3}{\text{кг}};$$
$$\rho = \frac{1}{v} = \frac{1}{0,781 \frac{\text{м}^3}{\text{кг}}} = 1,280 \frac{\text{кг}}{\text{м}^3}.$$

Ответ:  $0,781 \text{ м}^3/\text{кг}$ ,  $1,280 \text{ кг}/\text{м}^3$ .

1.4. Определить плотность и удельный объём монооксида углерода CO при давлении 1 бар и температуре 300 К.

Решение:

Удельный объём равен

$$v = \frac{RT}{p} = \frac{296,9 \frac{\text{Дж}}{\text{кг} \cdot \text{К}} \cdot 300 \text{ К}}{1 \cdot 10^5 \text{ Па}} = 0,89 \frac{\text{м}^3}{\text{кг}};$$

плотность равна

$$\rho = \frac{1}{v} = \frac{1}{0,89 \frac{\text{м}^3}{\text{кг}}} = 1,125 \frac{\text{кг}}{\text{м}^3}.$$

Ответ: 1,125 кг/м<sup>3</sup>, 0,89 м<sup>3</sup>/кг.

1.5. Для определения теплоты сгорания топлива в калориметрической бомбе применяется кислород O<sub>2</sub> из баллона объёмом V<sub>1</sub> = 0,006 м<sup>3</sup> при абсолютном давлении p<sub>1</sub> = 120 бар и температуре T = 300 К. Определить, на сколько зарядов хватит кислорода, если объём бомбы равен V<sub>2</sub> = 0,0004 м<sup>3</sup>, а абсолютное давление кислорода в бомбе p<sub>2</sub> = 22 бар при T = 300 К.

Решение:

Масса кислорода в баллоне

$$m_1 = \frac{p_1 V_1}{RT} = \frac{120 \cdot 10^5 \text{ Па} \cdot 0,006 \text{ м}^3}{259,8 \frac{\text{Дж}}{\text{кг} \cdot \text{К}} \cdot 300 \text{ К}} = 0,925 \text{ кг}.$$

Масса кислорода в бомбе

$$m_2 = \frac{p_2 V_2}{RT} = \frac{22 \cdot 10^5 \text{ Па} \cdot 0,0004 \text{ м}^3}{259,8 \frac{\text{Дж}}{\text{кг} \cdot \text{К}} \cdot 300 \text{ К}} = 0,01125 \text{ кг}.$$

Остаток кислорода в баллоне

$$m_3 = \frac{p_2 V_1}{RT} = \frac{22 \cdot 10^5 \text{ Па} \cdot 0,006 \text{ м}^3}{259,8 \frac{\text{Дж}}{\text{кг} \cdot \text{К}} \cdot 300 \text{ К}} = 0,169 \text{ кг}.$$

Число зарядов

$$n = \frac{m_1 - m_3}{m_2} = \frac{0,925 \text{ кг} - 0,169 \text{ кг}}{0,01125 \text{ кг}} = 67,2 \approx 67.$$

Ответ: 67 зарядов.

1.6. В сосуде объёмом  $10 \text{ дм}^3$  находится гелий массой  $4 \text{ г}$  при температуре  $20^\circ\text{C}$ . Определить давление газа.

Решение:

Давление гелия найдем исходя из уравнения Менделеева-Клапейрона

$$p = \frac{m}{\mu} \cdot \frac{\mu RT}{V} = \frac{4 \cdot 10^{-3} \text{ кг}}{4 \frac{\text{кг}}{\text{кмоль}}} \cdot \frac{8314 \frac{\text{Дж}}{\text{кмоль} \cdot \text{К}} \cdot 293 \text{ К}}{10^{-2} \text{ м}^3} =$$
$$= 243600 \text{ Па} = 24,36 \text{ кПа}.$$

Ответ:  $24,36 \text{ кПа}$ .

1.7. Найти кажущуюся молекулярную массу смеси  $10 \text{ г}$  монооксида углерода  $\text{CO}$  и  $40 \text{ г}$  кислорода  $\text{O}_2$ .

Решение:

Массовая доля монооксида углерода

$$g_{\text{CO}} = \frac{m_{\text{CO}}}{m_{\text{CO}} + m_{\text{O}_2}} = \frac{10 \text{ г}}{10 \text{ г} + 40 \text{ г}} = 0,2.$$

Массовая доля кислорода

$$g_{\text{O}_2} = 1 - g_{\text{CO}} = 1 - 0,2 = 0,8.$$

Кажущаяся молекулярная масса смеси

$$\mu_{\text{см}} = \frac{1}{\frac{g_{\text{CO}}}{\mu_{\text{CO}}} + \frac{g_{\text{O}_2}}{\mu_{\text{O}_2}}} = \frac{1}{\frac{0,2}{28 \frac{\text{кг}}{\text{кмоль}}} + \frac{0,8}{32 \frac{\text{кг}}{\text{кмоль}}}} = 31,1 \frac{\text{кг}}{\text{кмоль}}.$$

Ответ:  $31,1 \text{ кг/кмоль}$ .

1.8. Определить число степеней свободы молекулы газа, если при давлении  $p = 1 \text{ бар}$  и плотности  $1,3 \text{ кг/м}^3$  скорость звука в нём составляет  $a = 328 \text{ м/с}$ .

Решение: Скорость звука в идеальном газе равняется

$$a = \sqrt{kRT} = \sqrt{k \frac{p}{\rho}}.$$

В соответствии с МКТ, показатель адиабаты равен

$$k = \frac{i + 2}{i}.$$

Откуда

$$a = \sqrt{\frac{i+2}{i} \cdot \frac{p}{\rho}},$$
$$a^2 = \frac{i+2}{i} \cdot \frac{p}{\rho},$$
$$\frac{\rho a^2}{p} - 1 = \frac{2}{i},$$
$$i = \frac{2}{\frac{\rho a^2}{p} - 1} = \frac{2}{\frac{1,3 \frac{\text{кг}}{\text{м}^3} \left(328 \frac{\text{м}}{\text{с}}\right)^2}{10^5 \text{Па}} - 1} = 5.$$

Ответ: 5.

1.9. Вычислить среднюю кинетическую энергию молекулы азота, находящегося под давлением  $p = 200$  кПа, а концентрация молекул равна  $n = 4,1 \cdot 10^{19} \text{ см}^{-3}$ .

Решение: Средняя кинетическая энергия молекул газа равна

$$E_{\text{кин}} = \frac{i}{2} k_B T.$$

Число степеней свободы двухатомной молекулы равняется  $i = 5$ , на одну степень свободы приходится энергия, равная  $k_B T/2$ . Температура и давление газа, в соответствии с МКТ, связаны между собой выражением

$$p = nk_B T.$$

Тогда, энергия, приходящаяся на одну степень свободы, будет равна

$$E_1 = \frac{E_{\text{кин}}}{i} = \frac{\frac{i}{2} k_B T}{i} = \frac{p}{2n} = \frac{200 \cdot 10^3 \text{Па}}{2 \cdot 4,1 \cdot 10^{25} \text{м}^{-3}} = 2,4 \cdot 10^{-21} \text{Дж}.$$

Ответ:  $2,4 \cdot 10^{-21}$  Дж.

1.10. В процессе экспериментальных исследований было зафиксировано атмосферное давление, равное 746 мм.рт.ст. и разрежение во впускном трубопроводе ДВС равное 20 см.вод.ст. Чему равняется абсолютное давление во впускном трубопроводе, выраженное в МПа?

Ответ:  $p_{\text{абс}} = 0,0975$  МПа.

1.11. Из ресивера воздух поступает в коллектор двигателя. Разрежение в ресивере измеряется вакуумметром с наклонной трубкой (угол наклона  $30^\circ$ ). Вакуумметр заполнен водой. Определить давление в ресивере, если показание вакуумметра 350 мм.вод.ст., а давление окружающей среды равно 1 бар.

Ответ:  $p_{\text{рес}} = 0,983$  бар.

1.12. Определить барометрическое давление, плотность и температуру атмосферного воздуха на высоте 9 500 м, если известно, что на уровне моря давление составляет  $101\,325 \text{ Н/м}^2$ , а температура  $273,15 \text{ К}$ .

Ответ:  $p_h = 28\,494,37 \text{ Па}$ ,  $T_h = 211,4 \text{ К}$ ,  $\rho_h = 0,4623 \text{ кг/м}^3$ .

1.13. В помещении, где установлена барокамера давление по водяному манометру равно 50 мм. вод. ст. Барометр, установленный вне помещения, показывает 750 мм.рт.ст. при температуре, равной  $30^\circ\text{C}$ . В барокамере создан вакуум, равный 180 мм.рт.ст. Найти абсолютное давление в барокамере.

Ответ:  $p_{\text{абс}} = 75\,966,8 \text{ Па}$ .

1.14. Абсолютное давление в конденсаторе паровой турбины равно 0,04 бар. Каково при этом значение вакуума в процентах, если барометрическое давление равно  $96 \text{ кН/м}^2$  при температуре равной  $25^\circ\text{C}$ ?

Ответ:  $p_{\text{вак}} = 95,8\%$ .

1.15. В трубке манометра, соединяющейся с окружающей средой, имеется столб воды высотой 50 мм. Определить абсолютное давление в ресивере, если разность уровней ртути манометра составляет 120 мм, а давление окружающей среды равно 0,95 атм.

Ответ:  $p_{\text{абс}} = 1,13 \cdot 10^5 \text{ Па}$ .

1.16. Барометр, находящийся при температуре  $T_0 = 293 \text{ К}$ , показывает, что давление на уровне моря составляет  $p_1 = 1 \cdot 10^5 \text{ Па}$ . Определить высоту полета самолета и температуру воздуха за бортом, если барометр, установленный на его борту, показывает давление в 3,7 раза меньше давления на уровне моря.

Ответ:  $H = 9\,746 \text{ м}$ ,  $T_h = 229,65 \text{ К}$ .

1.17. Определить давление на днище контейнера ракеты, установленной на подводной лодке, если днище находится на глубине 15,5 м, а атмосферное давление, измеренное ртутным барометром, составляет 1 бар.

Ответ:  $p = 252\,055$  Па.

1.18. По данным испытаний паровой турбины разрежение в её конденсаторе составляет 94% при барометрическом давлении  $97\text{ кН/м}^2$  и  $0^\circ\text{C}$ . Чему равно абсолютное давление в конденсаторе?

Ответ:  $p_{\text{абс}} = 0,06$  бар.

1.19. Идеальный газ, объёмом  $273\text{ м}^3$ , нагревается при постоянном давлении от  $546\text{ К}$  до  $547\text{ К}$ . Определить приращение объема.

Ответ:  $\Delta V = 0,5\text{ м}^3$ .

1.20. Определить подъемную силу шара-зонда, наполненного водородом и имеющего объем  $1\text{ м}^3$ . Давление окружающего воздуха  $0,1\text{ МН/м}^2$ . Избыточное давление в шаре  $0,0333\text{ МН/м}^2$ . Температура водорода и температура воздуха равны  $288\text{ К}$ . Изменением температуры и давлением при подъеме пренебречь. (Подъемной силой называется разность удельных весов окружающей среды и газа, заполняющего шар).

Ответ:  $P = 11\,595\text{ Н}$ .

1.21. Воздуходувка должна поставлять для доменной печи при нормальных физических условиях  $300\text{ м}^3/\text{мин}$  воздуха. Атмосферный воздух имеет температуру  $298\text{ К}$  и абсолютное давление  $0,0958\text{ МН/м}^2$ . Какой объём всасываемого воздуха должна подавать воздуходувка, чтобы обеспечить доменную печь?

Ответ:  $V_2 = 346,3\text{ м}^3/\text{мин}$ .

1.22. Определить количество пороха в пороховом аккумуляторе давления для ракеты с массовым секундным расходом  $10\text{ кг/с}$  и временем работы  $60\text{ с}$ , работающей на 90% перекиси водорода (плотность  $\text{H}_2\text{O}_2 = 1\,390\text{ кг/м}^3$ ) и твердом катализаторе, если абсолютное давление подачи  $2,96\text{ МН/м}^2$ . Температура поступающих в бак газов не должна превышать  $1000\text{ К}$ , газовая постоянная пороховых газов  $R_r = 290\text{ Дж/(кг}\cdot\text{К)}$ .

Ответ:  $m = 4,4\text{ кг}$ .

1.23. Определить кажущийся молекулярный вес воздуха, если считать его состав, заданный в массовых долях, следующим:  $g_{N_2} = 0,78$ ,  $g_{O_2} = 0,21$ ,  $g_{CO_2} = 0,01$ .

Ответ:  $\mu = 28,86$  кг/кмоль.

1.24. Высокотемпературный топливный элемент работает на смеси метана  $CH_4$  и кислорода  $O_2$ . Определить газовую постоянную смеси, если мольная доля метана составляет 0,71, а кислорода 0,29.

Ответ:  $R = 402,8$  кДж/(кг·К).

1.25. Определить объёмную долю водяного пара во влажном воздухе, если парциальное давление водяного пара составляет 1,2 кПа, а сухого воздуха 98,0 кПа.

Ответ:  $r_{H_2O} = 0,012$ .

1.26. Влажный воздух состоит из 23% кислорода, 76% азота и 1% водяного пара. Определить молекулярную массу, объёмный состав, газовую постоянную, парциальное давление кислорода, азота и водяного пара, если давление воздуха равно 750 мм.рт.ст.

Ответ:  $r_{O_2} = 0,206$ ;  $r_{N_2} = 0,778$ ;  $r_{H_2O} = 0,016$ ;  $\mu = 28,7$  кг/кмоль;  $R = 289,7$  Дж/(кг·К);  $p_{O_2} = 154,5$  мм.рт.ст.;  $p_{N_2} = 583,5$  мм.рт.ст.;  $p_{H_2O} = 12$  мм.рт.ст.

1.27. Газовая смесь из водорода  $H_2$  и метана  $CH_4$  в количестве 67,2 м<sup>3</sup> имеет газовую постоянную  $R_{см} = 2\,550$  Дж/(кг·К), давление смеси 0,98 бар и температура 15°C. Определить массовые и объёмные доли, массу водорода и метана в смеси.

Ответ:  $r_{H_2} = 0,911$ ;  $r_{CH_4} = 0,089$ ;  $g_{H_2} = 0,562$ ;  $g_{CH_4} = 0,438$ ;  $m_{H_2} = 5,035$  кг;  $m_{CH_4} = 3,924$  кг.

1.28. Определить среднюю массовую изохорную теплоёмкость азота в диапазоне температур 100...1000°C, если его средняя мольная изобарная теплоёмкость в диапазоне температур 0...100°C равна 29,106 кДж/(кмоль·К), а в диапазоне температур 0...1000°C составляет 33,897 кДж/(кмоль·К). Показатель адиабаты принять 1,404.

Ответ: 0,876 кДж/(кг·К).

1.29. Начальное состояние азота задано параметрами:  $t_1 = 200^\circ\text{C}$ , и  $v = 1,9 \text{ м}^3/\text{кг}$ . Азот нагревается в процессе при постоянном давлении, причем удельный объём азота увеличивается до  $5,7 \text{ м}^3/\text{кг}$ . Определить конечную температуру азота (в  $^\circ\text{C}$ ).

Ответ:  $t_2 = 1\ 146^\circ\text{C}$ .

1.30. В сосуде находится смесь газов, образовавшаяся в результате смешения 10 кг азота, 13 кг аргона и 27 кг двуокиси углерода. Определить мольный состав смеси, её удельный объём при нормальных условиях, кажущийся молекулярный вес смеси и газовую постоянную.

Ответ:  $\mu_{\text{см}} = 38,59 \text{ кг/кмоль}$ ;  $R_{\text{см}} = 161,29 \text{ Дж/(кг}\cdot\text{К)}$ ;  
 $v = 0,4345 \text{ м}^3/\text{кг}$ ;  $r_{\text{N}_2} = 0,2756$ ;  $r_{\text{Ar}} = 0,2508$ ;  $r_{\text{CO}_2} = 0,4736$ .

1.31. Определить плотность метана  $\text{CH}_4$  при нормальных физических условиях.

Ответ:  $\rho = 0,714 \text{ кг/м}^3$ .

1.32. Влажный воздух представляет собой смесь сухого воздуха и водяного пара. Известно, что на каждый килограмм сухого воздуха во влажном приходится  $d$  г/кг водяного пара. Определить массовые и объёмные доли сухого воздуха и водяного пара, плотность при нормальных условиях, газовую постоянную, отнесённую к одному килограмму, и кажущийся молекулярный вес смеси, если  $d = 10 \text{ г/кг}$ .

Ответ:  $g_{\text{H}_2\text{O}} = 0,9901$ ;  $g_{\text{с.в.}} = 0,0099$ ;  $r_{\text{H}_2\text{O}} = 0,0159$ ;  $r_{\text{с.в.}} = 0,9841$ ;  
 $R = 288,43 \text{ Дж/(кг}\cdot\text{К)}$ ;  $\mu = 28,82 \text{ кг/кмоль}$ ;  $\rho = 1,286 \text{ кг/м}^3$ .

1.33. Сколько кг свинца можно нагреть от температуры  $15^\circ\text{C}$  до температуры его плавления  $t = 327^\circ\text{C}$  посредством удара молотом массой в 200 кг при падении его с высоты 2 м? Предполагается, что вся энергия падения молота превращается в тепло, полностью поглощаемое свинцом. Теплоёмкость свинца  $c_p = 0,1256 \text{ кДж/(кг}\cdot\text{К)}$ .

Ответ:  $m = 0,10 \text{ кг}$ .

1.34. Определить удельный объём кислорода при давлении 32 бара и температуре  $280^\circ\text{C}$ . Задачу решать в системе СИ.

Ответ:  $v = 0,625 \text{ м}^3/\text{кг}$ .

1.35. Определить массу воздуха, находящуюся в комнате площадью  $25 \text{ м}^2$  и высотой  $3,2 \text{ м}$ . Принять, что температура воздуха в комнате  $22^\circ\text{C}$ , а барометрическое давление равно  $986,5 \text{ мбар}$ .

Ответ:  $m = 93,218 \text{ кг}$ .

1.36. Определить потери тепла (кВт) с отработавшими газами ДВС, если их количество, выходящее за час, равно:  $m_{\text{H}_2\text{O}} = 0,2 \text{ кмоль/ч}$ ,  $m_{\text{N}_2\text{O}_2} = 1,5 \text{ кмоль/ч}$ ,  $m_{\text{CO}_2} = 0,15 \text{ кмоль/ч}$ . Температура отработавших газов  $t = 500^\circ\text{C}$ , количество всасываемого воздуха в час  $L_{\text{в}} = 1,6 \text{ кмоль/ч}$ , а его температура  $t_0 = 20^\circ\text{C}$ .

Ответ:  $\Delta Q = 7,862 \text{ кВт}$ .

1.37. Энергетическая установка, работающая по парогазовому циклу, в качестве рабочего тела использует смесь водяного пара и горячих продуктов сгорания. Массовая доля продуктов сгорания топлива  $g_{\text{пс}} = 0,7$ . Принять, что продукты сгорания обладают свойствами воздуха. Определить массовую изобарную теплоёмкость смеси при температуре  $500^\circ\text{C}$  и  $800^\circ\text{C}$ , а также удельный объём смеси при температуре  $500^\circ\text{C}$  и давлении  $p = 10 \text{ бар}$ .

Ответ:  $c_{p500} = 1,405 \text{ кДж/(кг}\cdot\text{К)}$ ;  $c_{p800} = 1,510 \text{ кДж/(кг}\cdot\text{К)}$ ;  
 $v = 0,221 \text{ м}^3/\text{кг}$ .

1.38. Двадцать кг газовой смеси, состоящей по массе из  $14\% \text{ CO}_2$ ,  $10\% \text{ O}_2$  и  $76\% \text{ N}_2$  имеют начальные параметры  $p_1 = 0,2 \text{ МПа}$  и  $t_1 = 10^\circ\text{C}$ . В результате расширения при постоянном давлении температура газа повышается до  $t_2 = 200^\circ\text{C}$ . Определить начальный и конечный объём, подведённую теплоту, работу расширения, изменение внутренней энергии и изменение энтропии.

Ответ:  $v_1 = 0,39 \text{ м}^3/\text{кг}$ ;  $v_2 = 0,655 \text{ м}^3/\text{кг}$ ;  $l_{12} = 1\,052,22 \text{ кДж}$ ;  
 $q_{12} = 3\,831,1 \text{ кДж}$ ;  $s_{12} = 0,52 \text{ кДж/(кг}\cdot\text{К)}$ ;  $u_{12} = 2\,779,3 \text{ кДж}$ .

## 2. Процессы идеального газа в закрытой системе

2.1. В баллоне объёмом  $V = 0,12 \text{ м}^3$  содержится воздух при абсолютном давлении 1 МПа и температуре  $50^\circ\text{С}$ . Температура газа в баллоне повысилась до  $150^\circ\text{С}$ . Определить конечные давление, количество подведённой теплоты и изменение удельной энтропии воздуха.

Решение: Масса воздуха в баллоне равна

$$m = \frac{p_1 V}{RT_1} = \frac{1 \cdot 10^6 \text{ Па} \cdot 0,12 \text{ м}^3}{287 \frac{\text{Дж}}{\text{кг} \cdot \text{К}} \cdot 323 \text{ К}} = 1,29 \text{ кг.}$$

Конечное давление

$$p_2 = p_1 \frac{T_2}{T_1} = 1 \cdot 10^6 \text{ Па} \frac{423 \text{ К}}{323 \text{ К}} = 1,31 \cdot 10^6 \text{ Па} = 1,31 \text{ МПа.}$$

Количество подведённой теплоты

$$Q = m(c_{vm}|_0^{t_2} t_2 - c_{vm}|_0^{t_1} t_1) = \\ = 1,29 \text{ кг} \left( 0,722 \frac{\text{кДж}}{\text{кг} \cdot \text{К}} \cdot 150^\circ\text{С} - 0,718 \frac{\text{кДж}}{\text{кг} \cdot \text{К}} \cdot 50^\circ\text{С} \right) = 94 \text{ кДж.}$$

Изменение удельной энтропии

$$\Delta s = c_v \ln \frac{T_2}{T_1} = 0,72 \frac{\text{кДж}}{\text{кг} \cdot \text{К}} \ln \frac{423 \text{ К}}{323 \text{ К}} = 0,194 \frac{\text{кДж}}{\text{кг} \cdot \text{К}}$$

Ответ:  $p_2 = 1,31 \text{ МПа}$ ;  $Q = 94 \text{ кДж}$ ;  $\Delta s = 0,194 \text{ кДж}/(\text{кг} \cdot \text{К})$ .

2.2. Воздух, массой 2 кг, при абсолютном давлении  $p = 2 \text{ бар}$  и начальной температуре  $T_1 = 288 \text{ К}$  расширяется изобарно до конечной температуры  $T_2 = 423 \text{ К}$ . Определить конечный объём воздуха, количество подведённой теплоты и работу расширения.

Решение: Начальный объём воздуха равен

$$V_1 = \frac{mRT_1}{p} = \frac{2 \text{ кг} \cdot 287 \frac{\text{Дж}}{\text{кг} \cdot \text{К}} \cdot 288 \text{ К}}{2 \cdot 10^5 \text{ Па}} = 0,827 \text{ м}^3.$$

Конечный объём

$$V_2 = V_1 \frac{T_2}{T_1} = 0,827 \text{ м}^3 \cdot \frac{423 \text{ К}}{288 \text{ К}} = 1,213 \text{ м}^3.$$

Количество подведённой теплоты

$$Q = m(c_{pm}|_0^{t_2} t_2 - c_{pm}|_0^{t_1} t_1) = \\ = 2 \text{ кг} \left( 1,01 \frac{\text{кДж}}{\text{кг} \cdot \text{К}} \cdot 150^\circ\text{С} - 0,997 \frac{\text{кДж}}{\text{кг} \cdot \text{К}} \cdot 15^\circ\text{С} \right) = 273 \text{ кДж.}$$

Работа расширения

$$L = p\Delta V = 2 \cdot 10^5 \text{ Па} \cdot (1,213 \text{ м}^3 - 0,827 \text{ м}^3) = 77,2 \text{ кДж.}$$

Ответ:  $V_2 = 1,213 \text{ м}^3$ ;  $Q = 273 \text{ кДж}$ ;  $L = 77,2 \text{ кДж}$ .

2.3. Воздух, массой 12 кг, при абсолютном давлении 6 бар и температуре 300 К расширяется в изотермическом процессе, при этом его объём увеличивается в 4 раза. Определить начальные и конечные параметры воздуха, количество подведённой теплоты и работу изменения объёма.

Решение:

Начальный объём

$$V_1 = \frac{mRT_1}{p_1} = \frac{12 \text{ кг} \cdot 287 \frac{\text{Дж}}{\text{кг} \cdot \text{К}} \cdot 300 \text{ К}}{6 \cdot 10^5 \text{ Па}} = 1,722 \text{ м}^3.$$

Конечный объём

$$V_2 = 4V_1 = 4 \cdot 1,722 \text{ м}^3 = 6,888 \text{ м}^3.$$

Конечное давление

$$p_2 = p_1 \frac{V_1}{V_2} = 6 \cdot 10^5 \text{ Па} \cdot \frac{1,722 \text{ м}^3}{6,888 \text{ м}^3} = 1,5 \cdot 10^5 \text{ Па} = 150 \text{ кПа.}$$

Работа расширения и количество подведённой теплоты

$$L = Q = p_1 V_1 \ln \frac{V_2}{V_1} = 6 \cdot 10^5 \text{ Па} \cdot 1,722 \text{ м}^3 \cdot \ln \frac{6,888 \text{ м}^3}{1,722 \text{ м}^3} = 1432 \text{ кДж.}$$

Ответ:  $V_1 = 1,722 \text{ м}^3$ ;  $V_2 = 6,888 \text{ м}^3$ ;  $p_2 = 150 \text{ кПа}$ ;  
 $L = Q = 1432 \text{ кДж}$ .

2.4. Воздух, массой 2 кг, при начальном абсолютном давлении 1 МПа и температуре 600 К расширяется по адиабате до конечного давления 0,1 МПа. Определить конечные объём и температуру, а также работу расширения. Принять  $k = 1,4$ .

Решение: Начальный объём

$$V_1 = \frac{mRT_1}{p_1} = \frac{2 \text{ кг} \cdot 287 \frac{\text{Дж}}{\text{кг} \cdot \text{К}} \cdot 600 \text{ К}}{1 \cdot 10^6 \text{ Па}} = 0,344 \text{ м}^3.$$

Конечный объём

$$V_2 = V_1 \left( \frac{p_1}{p_2} \right)^{\frac{1}{k}} = 0,344 \text{ м}^3 \cdot \left( \frac{1 \cdot 10^6 \text{ Па}}{0,1 \cdot 10^6 \text{ Па}} \right)^{\frac{1}{1,4}} = 1,782 \text{ м}^3.$$

Конечная температура

$$T_2 = T_1 \left( \frac{p_2}{p_1} \right)^{\frac{k-1}{k}} = 600 \text{ К} \cdot \left( \frac{0,1 \cdot 10^6 \text{ Па}}{1 \cdot 10^6 \text{ Па}} \right)^{\frac{1,4-1}{1,4}} = 310 \text{ К}.$$

Работа расширения

$$\begin{aligned} L &= \frac{1}{k-1} (p_1 V_1 - p_2 V_2) = \\ &= \frac{1}{1,4-1} (1 \cdot 10^6 \text{ Па} \cdot 0,344 \text{ м}^3 - 0,1 \cdot 10^6 \text{ Па} \cdot 1,782 \text{ м}^3) = \\ &= 414500 \text{ Дж} = 414,5 \text{ кДж} \end{aligned}$$

Ответ:  $V_1 = 0,344 \text{ м}^3$ ;  $V_2 = 1,782 \text{ м}^3$ ;  $T_2 = 310 \text{ К}$ ;  $L = 414,5 \text{ кДж}$ .

2.5. Воздух, массой 3 кг, с начальными параметрами  $p_1 = 1$  бар и  $T_1 = 300$  К сжимается в политропном процессе до  $p_2 = 15$  бар и  $T_2 = 500$  К. Определить показатель политропы, конечный объём, работу сжатия и количество отведенной теплоты.

Решение: Показатель политропы

$$\frac{n-1}{n} = \frac{\ln \frac{T_2}{T_1}}{\ln \frac{p_2}{p_1}} = \frac{\ln \frac{500 \text{ К}}{300 \text{ К}}}{\ln \frac{15 \text{ бар}}{1 \text{ бар}}} = 0,189,$$

откуда  $n = 1,233$ .

Начальный объём

$$V_1 = \frac{mRT_1}{p_1} = \frac{3 \text{ кг} \cdot 287 \frac{\text{Дж}}{\text{кг} \cdot \text{К}} \cdot 300 \text{ К}}{1 \cdot 10^5 \text{ Па}} = 2,583 \text{ м}^3.$$

Конечный объём

$$V_2 = V_1 \left( \frac{p_1}{p_2} \right)^{\frac{1}{n}} = 2,583 \text{ м}^3 \cdot \left( \frac{1 \cdot 10^5 \text{ Па}}{1,5 \cdot 10^6 \text{ Па}} \right)^{\frac{1}{1,233}} = 0,373 \text{ м}^3.$$

Работа сжатия

$$\begin{aligned} L &= \frac{1}{n-1} (p_1 V_1 - p_2 V_2) = \\ &= \frac{1}{1,233-1} (1 \cdot 10^5 \text{ Па} \cdot 2,583 \text{ м}^3 - 1,5 \cdot 10^6 \text{ Па} \cdot 0,373 \text{ м}^3) = \\ &= 1293 \text{ кДж}. \end{aligned}$$

Количество отведенной теплоты

$$Q = mc_v \left( \frac{n-k}{n-1} \right) (T_2 - T_1) = \\ = 3 \text{ кг} \cdot 0,72 \frac{\text{кДж}}{\text{кг} \cdot \text{К}} \left( \frac{1,233 - 1,4}{1,233 - 1} \right) (500 \text{ К} - 300 \text{ К}) = 310 \text{ кДж}$$

Ответ:  $n = 1,233$ ;  $V_1 = 2,583 \text{ м}^3$ ;  $V_2 = 0,373 \text{ м}^3$ ;  $L = 1293 \text{ кДж}$ ;  
 $Q = 310 \text{ кДж}$ .

2.6. В политропном процессе температура воздуха уменьшается со  $120^\circ\text{C}$  до  $50^\circ\text{C}$ , с начального давления  $p_1 = 0,5 \text{ МПа}$ . При этом воздуху сообщается удельная теплота, равная  $60 \text{ кДж/кг}$ . Определить изменение удельной энтропии. Принять  $c_v = 0,72 \text{ кДж/(кг}\cdot\text{К)}$ ,  $k = 1,4$ .

Решение:

Показатель политропы определим из уравнения

$$q = c_v \frac{n-k}{n-1} (T_2 - T_1),$$

откуда

$$\frac{n-1,4}{n-1} = \frac{q}{c_v(T_2 - T_1)} = \frac{60 \frac{\text{кДж}}{\text{кг}}}{0,72 \frac{\text{кДж}}{\text{кг} \cdot \text{К}} (323 \text{ К} - 393 \text{ К})} = -1,19,$$

$$n = 1,183.$$

Давление в конце процесса

$$p_2 = p_1 \left( \frac{T_2}{T_1} \right)^{\frac{n}{n-1}} = 0,5 \cdot 10^6 \text{ Па} \cdot \left( \frac{323 \text{ К}}{393 \text{ К}} \right)^{\frac{1,183}{1,183-1}} = \\ = 0,14 \cdot 10^6 \text{ Па} = 0,14 \text{ МПа}.$$

Удельная массовая изобарная теплоемкость

$$c_p = k c_v = 1,4 \cdot 0,72 \frac{\text{кДж}}{\text{кг} \cdot \text{К}} = 1,008 \frac{\text{кДж}}{\text{кг} \cdot \text{К}}.$$

Изменение удельной энтропии

$$\Delta s = c_p \ln \frac{T_2}{T_1} - R \ln \frac{p_2}{p_1} = \\ = 1,008 \frac{\text{кДж}}{\text{кг} \cdot \text{К}} \ln \frac{323}{393} - 0,287 \frac{\text{кДж}}{\text{кг} \cdot \text{К}} \ln \frac{0,5 \cdot 10^6 \text{ Па}}{0,14 \cdot 10^6 \text{ Па}} = 0,563 \frac{\text{кДж}}{\text{кг} \cdot \text{К}}.$$

Ответ:  $\Delta s = 563 \text{ Дж/(кг}\cdot\text{К)}$ .

2.7. На сжатие трех килограмм метана затрачено 300 кДж работы, при этом внутренняя энергия газа увеличилась на 595 кДж. Определить количество тепла и указать, подводится оно или отводится; определить изменение температуры и энтальпии газа, если молярная теплоёмкость  $\text{CH}_4$  при  $v = \text{const}$  равна 26,48 кДж/(кмоль·К).

Ответ:  $q = -205$  кДж;  $\Delta T = 120$  К;  $\Delta h = 784$  кДж.

2.8. Определить изменение  $\Delta u$  стального стержня диаметром 20 мм и длиной 200 мм, нагруженного постоянной растягивающей силой равной 0,3 МН, при изменении его температуры от 0°C до 20°C. Теплоёмкость равна 0,46 кДж/(кг·К), плотность 7 800 кг/м<sup>3</sup>. Пренебречь работой стержня против сил атмосферного давления.

Ответ:  $\Delta u = 4\,506,5$  Дж.

2.9. ДВС приводит в движение генератор, который отдаёт в сеть ток силой 235 ампер при напряжении 110 В. КПД генератора  $\eta = 0,95$ . Определить КПД ДВС, если он потребляет в час 7 кг топлива с теплотворной способностью 42 300 кДж/кг.

Ответ:  $\eta_t = 0,33$ .

2.10. Чему равна работа расширения и увеличения внутренней энергии 1 кг ртути, испаряемой при постоянной внешнем давлении 3,98 бар, если для испарения необходимо подвести 293 кДж/кг тепла, а удельный объем ртути и её пара при температуре кипения соответственно равны  $0,0798 \cdot 10^{-4}$  м<sup>3</sup>/кг и 0,0756 м<sup>3</sup>/кг?

Ответ:  $l = 30\,085,62$  Дж/кг;  $\Delta u = 262\,914,38$  Дж/кг.

2.11. До какого давления следует заряжать пусковой баллон ДВС продуктами сгорания из цилиндров ДВС, если температура в баллоне при зарядке 420 К, а после остывания до температуры 288 К давление должно быть 32 бара. Определить количество тепла, теряемое газами при охлаждении, если объём баллона 90 литров, теплоёмкость продуктов сгорания  $c_v = 0,732$  кДж/(кг·К) а  $R = 280$  Дж/(кг·К).

Ответ:  $p = 4,66$  МПа;  $Q = -345$  кДж.

2.12. В калориметрической бомбе ёмкостью  $300 \text{ см}^3$ , заполненной кислородом при давлении 25 бар и температуре 293 К сгорает 0,3 г топлива, имеющего теплотворную способность  $25 \cdot 10^6 \text{ кДж/кг}$ . Определить повышение давления и температуру в конце сгорания, пренебрегая тепловыми потерями.

Ответ:  $T_2 = 1\,420 \text{ К}$ ;  $p_2 = 121 \text{ бар}$ .

2.13. Определить работу, затраченную на изотермическое сжатие в компрессоре 2 кг азота от давления 3 бара до давления 9,4 бара, если сжатие происходит при температуре 450 К, как изменится работа, если снизить температуру газа, поступающего в компрессор, с 450 К до 300 К?

Ответ:  $L_{450} = -202 \text{ кДж}$ ;  $L_{450} / L_{300} = 1,5$ .

2.14. Определить минимально необходимую степень сжатия  $\varepsilon = V_1 / V_2$  в ДВС, чтобы топливо, впрыснутое в цилиндр в конце такта сжатия, воспламенилось. Температура воспламенения топлива 970 К, температура воздуха перед сжатием 300 К, сжатие считать адиабатным. Чему равно давление в конце сжатия, если начальное равно 0,91 бар?

Ответ:  $\varepsilon = 18,798$ ;  $p_2 = 55,3 \text{ бар}$ .

2.15. При внезапном открывании вентиля на баллоне высокого давления, присоединенным к трубе, другой конец которой закрыт, газ, заключённый в трубе, подвергается быстрому сжатию, которое можно считать адиабатным. Определить повышение температуры, которое при этом произойдёт, если линия заполнена кислородом при давлении 1,05 бар и температуре 300 К, а давление в баллоне 150 бар. Мольная теплоёмкость кислорода при постоянном давлении  $\mu_{c_p} = 33,1 \text{ кДж/(кг}\cdot\text{К)}$ .

Ответ:  $T_2 = 1\,044,9 \text{ К}$ .

2.16. В цилиндре с удельным объёмом воздуха, равным  $0,2 \text{ м}^3/\text{кг}$ , закрытом пробкой-поршнем, находится воздух при давлении 100 бар и температуре 293 К. Определить скорость вылета крышки при её внезапном освобождении, если масса крышки 1 кг, а воздух расширяется

по адиабате в 3 раза, прежде, чем перестанет действовать на крышку. Какова будет температура воздуха после вылета крышки?

Ответ:  $T_2 = 188,8 \text{ К}$ ;  $w = 1\,885,7 \text{ м/с}$ .

2.17. Осевой компрессор газовой турбины всасывает воздух при давлении 1,013 бар и температуре 303 К и подаёт в камеру сгорания под давлением 7,3 бар и температуре 640 К. Определить показатель политропы процесса сжатия, теплоёмкость, количество тепла, изменение внутренней энергии, энтальпии и работу сжатия 1 кг воздуха в компрессоре.

Ответ:  $n = 1,609$ ;  $c_n = 0,247 \text{ кДж/(кг·К)}$ ;  $q = 83,2 \text{ кДж/кг}$ ;  $\Delta u = 242,3 \text{ кДж/кг}$ ;  $\Delta h = 339 \text{ кДж/кг}$ ;  $l = -151,9 \text{ кДж/кг}$ .

### 3. Сжатие газа в компрессоре

3.1. Воздух сжимается в одноступенчатом компрессоре с начального давления 0,1 МПа до конечного давления 12,5 МПа. Определить удельную теоретическую работу и температуру воздуха в конце сжатия, если температура воздуха на входе в компрессор равна 300 К, а показатель политропы сжатия в компрессоре  $n = 1,2$ .

Решение: Работа на привод компрессора равна

$$l_1 = -\frac{n}{n-1} p_1 \left[ \left( \frac{p_2}{p_1} \right)^{\frac{n-1}{n}} - 1 \right] =$$

$$= -\frac{1,2}{1,2-1} 0,1 \cdot 10^6 \text{ Па} \left[ \left( \frac{12,5 \cdot 10^6 \text{ Па}}{0,1 \cdot 10^6 \text{ Па}} \right)^{\frac{1,2-1}{1,2}} - 1 \right] = 741,6 \frac{\text{кДж}}{\text{м}^3}.$$

Температура в конце сжатия

$$T_2 = T_1 \left( \frac{p_2}{p_1} \right)^{\frac{n-1}{n}} = 300 \text{ К} \left( \frac{12,5 \cdot 10^6 \text{ Па}}{0,1 \cdot 10^6 \text{ Па}} \right)^{\frac{1,2-1}{1,2}} = 671 \text{ К}.$$

Ответ:  $l_1 = 741 \text{ кДж/м}^3$ ;  $T_2 = 671 \text{ К}$ .

3.2. Для условий предыдущей задачи определить удельную работу сжатия в трёхступенчатом компрессоре и температуру на выходе из компрессора.

Решение: Степень увеличения давления воздуха в каждой ступени

$$x = \sqrt[n]{\frac{p_2}{p_1}} = \sqrt[3]{\frac{12,5 \cdot 10^6 \text{ Па}}{0,1 \cdot 10^6 \text{ Па}}} = 5.$$

Удельная работа на сжатие воздуха в первой ступени

$$l = -\frac{n}{n-1} p_1 \left( x^{\frac{n-1}{n}} - 1 \right) = -\frac{1,2}{1,2-1} p_1 \left( 5^{\frac{1,2-1}{1,2}} - 1 \right) = 184,6 \frac{\text{кДж}}{\text{м}^3}.$$

Удельная работа на сжатие воздуха в компрессоре

$$l_{\text{III}} = 3l = 3 \cdot 184,6 = 553,8 \frac{\text{кДж}}{\text{м}^3}.$$

Температура воздуха после каждой из ступеней

$$T_2 = T_1 x^{\frac{n-1}{n}} = 300 \text{ К} \cdot 5^{\frac{1,2-1}{1,2}} = 393 \text{ К}.$$

Ответ:  $l_{\text{III}} = 553,8 \text{ кДж/м}^3$ ;  $T_2 = 393 \text{ К}$ .

3.3. Идеальный одноступенчатый компрессор сжимает воздух от давления  $p_{1\text{абс}} = 1$  бар при температуре  $t_1 = 20^\circ\text{C}$  до давления  $p_{2\text{абс}} = 3$  бар. Определить работу, затраченную на сжатие 1 кг воздуха и конечную температуру, если сжатие происходило: а) по изотерме, б) по политропе при  $n = 1,3$ , в) по адиабате.

Ответ: а)  $l = 92,38 \text{ кДж/кг}$ ;  $T_2 = 293 \text{ К}$ ; б)  $l = 108 \text{ кДж/кг}$ ;  $T_2 = 377 \text{ К}$ ; в)  $l = 108,5 \text{ кДж/кг}$ ;  $T_2 = 401 \text{ К}$ .

3.4. Идеальный одноступенчатый компрессор, рабочий объём цилиндра которого равен  $V_h = 5 \text{ дм}^3$ , а частота вращения компрессора  $n = 20 \text{ с}^{-1}$ , сжимает воздух от давления  $p_{1\text{абс}} = 1$  бар и температуры  $t_1 = 20^\circ\text{C}$  до давления  $p_{2\text{абс}} = 3$  бар. Определить производительность компрессора для следующих относительных величин вредного пространства: а)  $\varepsilon_0 = 5,0\%$ , б)  $\varepsilon_0 = 10,0\%$ , в)  $\varepsilon_0 = 15,0\%$ . Показатель политропы расширения воздуха из вредного пространства  $m = 1,2$ .

Ответ: а)  $V = 92,5 \cdot 10^{-3} \text{ м}^3/\text{с}$ ; б)  $V = 85 \cdot 10^{-3} \text{ м}^3/\text{с}$ ; в)  $V = 77,5 \cdot 10^{-3} \text{ м}^3/\text{с}$ .

3.5. Идеальный одноступенчатый компрессор, рабочий объём цилиндра которого равен  $V_h = 5 \cdot 10^{-3} \text{ м}^3$ , сжимает воздух от давления  $p_{1\text{абс}} = 1$  бар до давления  $p_{2\text{абс}} = 3$  бар. Определить работу, затрачиваемую на один оборот коленчатого вала компрессора, если сжатие происходит по политропе с показателем  $n = 1,3$ .

Ответ:  $l = 625,15 \text{ Дж}$ .

3.6. Определить отношение давлений конечного  $p_2$  к начальному  $p_1$ , при котором компрессор с относительным объёмом вредного пространства  $\varepsilon_0 = 0,1$  прекратит подачу, если показатель политропы при расширении воздуха из вредного пространства  $m = 1,2$ .

Ответ:  $p_2 / p_1 = 17,769$ .

3.7. Воздух сжимается: а) в первом случае в идеальном одноступенчатом компрессоре, б) во втором – в двухступенчатом, от давления  $p_{1абс} = 1$  бар и температуры  $t_1 = 20^\circ\text{C}$  до  $p_{2абс} = 9$  бар. Процесс сжатия политропный,  $n = 1,3$ . Определить, на сколько процентов уменьшится затрачиваемая работа на сжатие в двухступенчатом компрессоре, если промежуточное многоступенчатое давление составляет 3 бар, а охлаждение воздуха после сжатия в первой ступени производится до начальной температуры  $t = 20^\circ\text{C}$ , конечные температуры воздуха в первом и втором случаях.

Ответ:  $\Delta l = 12,6\%$ ; а)  $T_2 = 486,5$  К; б)  $T_2 = 377,5$  К.

3.8. Центробежный компрессор сжимает 100 кг/ч азота. При сжатии энтальпия азота увеличивается на 200 кДж/кг. Какова должна быть мощность привода компрессора, если пренебречь теплообменом с окружающей средой и изменением кинетической и потенциальной энергиями азота?

Ответ:  $N = 5,55$  кВт.

3.9. Осевой компрессор газовой турбины всасывает воздух при давлении 1,013 бар и температуре 303 К и подает его в камеру сгорания при давлении 7,3 бар и температуре 640К. Определить показатель политропы процесса сжатия, его теплоёмкость, количество тепла, изменение внутренней энергии, энтальпии и работу сжатия 1 кг воздуха в компрессоре.

Ответ:  $n = 1,609$ ;  $c_n = 0,247$  кДж/(кг·К);  $q = 83,23$  кДж/кг;  $\Delta u = 242,3$  кДж/кг;  $\Delta h = 339$  кДж/кг;  $l = 159,07$  кДж/кг.

#### 4. Процессы идеального газа

4.1. Десять моль идеального двухатомного газа при температуре  $T_1 = 280$  К находится в вертикальном цилиндре под невесомым поршнем, движущемся без трения. Площадь поршня равна  $0,01$  м<sup>2</sup>. На поршень поместили гирю массой  $10$  кг, в результате поршень опустился на некоторую высоту. Определить, на сколько необходимо нагреть газ, чтобы вернуть поршень в исходное положение.

Решение: Т.к. объём нагретого газа с гирей на поршне равен исходному объёму, то, для изохорного процесса имеем

$$\begin{aligned}\Delta T &= T_2 - T_1 = p_2 \frac{T_1}{p_1} - p_1 \frac{T_1}{p_1} = \Delta p \frac{T_1}{p_1} = \frac{mg T_1}{S p_1} = \\ &= \frac{10 \text{ кг} \cdot 9,81 \frac{\text{М}}{\text{с}^2}}{0,01 \text{ м}^2} \frac{280 \text{ К}}{1 \cdot 10^5 \text{ Па}} = 27,5 \text{ К}\end{aligned}$$

Ответ:  $\Delta T = 27,5$  К.

4.2. Для условий задачи 4.1 определить количество подведённой к газу теплоты, необходимой для перемещения поршня, изменение внутренней энергии и совершённую газом работу.

Решение: Мольные изобарную и изохорную теплоёмкости идеального двухатомного газа, с числом степеней свободы молекулы  $i = 5$ , определим как

$$\begin{aligned}\mu c_p &= \mu R \left( \frac{i}{2} + 1 \right) = 8,314 \frac{\text{Дж}}{\text{моль} \cdot \text{К}} \left( \frac{5}{2} + 1 \right) = 29,1 \frac{\text{Дж}}{\text{моль} \cdot \text{К}}, \\ \mu c_v &= \mu R \frac{i}{2} = 8,314 \frac{\text{Дж}}{\text{моль} \cdot \text{К}} \frac{5}{2} = 20,9 \frac{\text{Дж}}{\text{моль} \cdot \text{К}}.\end{aligned}$$

Теплота, подведённая к газу

$$\Delta Q = \nu \mu c_p \Delta T = 10 \text{ моль} \cdot 29,1 \frac{\text{Дж}}{\text{моль} \cdot \text{К}} \cdot 27,5 \text{ К} = 8003 \text{ Дж}.$$

Изменение внутренней энергии

$$\Delta U = \nu \mu c_v \Delta T = 10 \text{ моль} \cdot 20,9 \frac{\text{Дж}}{\text{моль} \cdot \text{К}} \cdot 27,5 \text{ К} = 5748 \text{ Дж}.$$

Работа газа, в соответствии с первым законом термодинамики

$$L = \Delta Q - \Delta U = 8003 \text{ Дж} - 5748 \text{ Дж} = 2255 \text{ Дж}.$$

Ответ:  $\Delta Q = 8003$  Дж;  $\Delta U = 5748$  Дж;  $L = 2255$  Дж.

4.3. Идеальный двухатомный газ, объёмом  $V_1 = 4 \text{ дм}^3$  при  $p_1 = 0,3 \text{ МПа}$ , сначала адиабатно расширяется до объёма  $V_2 = 6 \text{ дм}^3$ , а затем изохорно охлаждается до давления  $p_3 = 0,1 \text{ МПа}$ . Определить работу газа, изменение внутренней энергии и количество подведённой теплоты.

Решение: Изменение внутренней энергии определяется только конечным и начальным состояниями рабочего тела в процессе. Поэтому, учитывая, что

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

и

$$pV = \nu \mu R T,$$

получим

$$\begin{aligned} \Delta U &= \frac{i}{2} (p_3 V_3 - p_1 V_1) = \\ &= \frac{5}{2} (0,1 \cdot 10^6 \text{ Па} \cdot 6 \cdot 10^{-3} \text{ м}^3 - 0,3 \cdot 10^6 \text{ Па} \cdot 4 \cdot 10^{-3} \text{ м}^3) = -1500 \text{ Дж}. \end{aligned}$$

В адиабатном процессе рабочее тело не обменивается теплотой с окружающей средой. Поэтому, учитывая, что

$$k = \frac{i + 2}{i} = \frac{5 + 2}{5} = 1,4$$

и

$$p_2 = p_1 \left( \frac{V_1}{V_2} \right)^k = 0,3 \cdot 10^6 \text{ Па} \left( \frac{4 \cdot 10^{-3} \text{ м}^3}{6 \cdot 10^{-3} \text{ м}^3} \right)^{1,4} = 0,17 \cdot 10^6 \text{ Па},$$

получаем

$$\begin{aligned} \Delta Q &= \Delta Q_{23} = \nu \mu c_v (T_3 - T_2) = \frac{i}{2} (p_3 - p_2) V_2 = \\ &= \frac{5}{2} (0,1 \cdot 10^6 \text{ Па} - 0,17 \cdot 10^6 \text{ Па}) 6 \cdot 10^{-3} \text{ м}^3 = -1050 \text{ Дж}. \end{aligned}$$

Учитывая, что работа газа в изохорном процессе равна нулю, получаем

$$\begin{aligned} L &= L_{12} = \nu \mu c_v (T_1 - T_2) = \frac{i}{2} (p_1 V_1 - p_2 V_2) = \\ &= \frac{5}{2} (0,3 \cdot 10^6 \text{ Па} \cdot 4 \cdot 10^{-3} \text{ м}^3 - 0,17 \cdot 10^6 \text{ Па} \cdot 6 \cdot 10^{-3} \text{ м}^3) = 450 \text{ Дж}. \end{aligned}$$

Ответ:  $\Delta U = -1500 \text{ Дж}$ ;  $\Delta Q = -1050 \text{ Дж}$ ;  $L = 450 \text{ Дж}$ .

4.4. Десять моль идеального двухатомного газа, занимающего при давлении  $p_1 = 0,1$  МПа объём  $V_1 = 0,01$  м<sup>3</sup>, адиабатно расширяется до вдвое большего объёма. Определить конечное давление и работу расширения газа.

Решение: Учитывая, что

$$k = \frac{i + 2}{i} = \frac{5 + 2}{5} = 1,4$$

определим давление в конце адиабатного расширения

$$p_2 = p_1 \left( \frac{V_1}{V_2} \right)^k = 0,1 \cdot 10^6 \text{ Па} \left( \frac{1}{2} \right)^{1,4} = 3,8 \cdot 10^4 \text{ Па}.$$

Работу расширения газа можно определить с учётом

$$\nu \mu R T = p V$$

и

$$\mu c_v = \mu R \frac{i}{2}.$$

Тогда

$$\begin{aligned} L &= -\Delta U = \nu \mu c_v (T_1 - T_2) = \frac{i}{2} (p_1 - 2p_2) V_1 = \\ &= \frac{5}{2} (0,1 \cdot 10^6 \text{ Па} - 2 \cdot 3,8 \cdot 10^4 \text{ Па}) 0,01 \text{ м}^3 = 600 \text{ Дж}. \end{aligned}$$

Ответ:  $p_2 = 3,8 \cdot 10^4$  Па;  $L = 600$  Дж.

4.5. Кислород  $O_2$  массой 6 г изобарно расширяется вдвое. Определить работу расширения газа, изменение его внутренней энергии и количество подведённой теплоты, если начальная температура кислорода равнялась  $t_1 = 30^\circ\text{C}$ .

Решение:

Работа расширения газа равна

$$\begin{aligned} L &= p(V_2 - V_1) = p(2V_1 - V_1) = pV_1 = \frac{m}{\mu} \mu R T_1 = \\ &= \frac{6 \cdot 10^{-3} \text{ кг}}{32 \frac{\text{кг}}{\text{кмоль}}} 8314 \frac{\text{Дж}}{\text{кмоль} \cdot \text{К}} 303 \text{ К} = 472 \text{ Дж}. \end{aligned}$$

Учитывая, что в соответствии с законом Гей-Люссака

$$T_2 = T_1 \frac{V_2}{V_1} = 2T_1,$$

изменение внутренней энергии составит

$$\begin{aligned}\Delta U &= \frac{m}{\mu} \mu c_v (T_2 - T_1) = \frac{m}{\mu} \frac{i}{2} \mu R T_1 = \\ &= \frac{6 \cdot 10^{-3} \text{ кг} \cdot 5}{32 \frac{\text{кг}}{\text{кмоль}}} \cdot 8314 \frac{\text{Дж}}{\text{кмоль} \cdot \text{К}} \cdot 303 \text{ К} = 1181 \text{ Дж}.\end{aligned}$$

В соответствии с первым началом термодинамики

$$Q = \Delta U + L = 1181 \text{ Дж} + 472 \text{ Дж} = 1663 \text{ Дж}.$$

Ответ:  $L = 472 \text{ Дж}$ ;  $\Delta U = 1181 \text{ Дж}$ ;  $Q = 1663 \text{ Дж}$ .

4.6. Окись углерода, имеющая объём, приведенный к нормальным условиям, равный  $0,5 \text{ м}^3$ , имеет давление  $p_1 = 25 \text{ бар}$  и температуру  $t = 350^\circ\text{C}$ . В изотермическом процессе к газу подводится тепло  $q = 85 \text{ кДж/кг}$ . Найти параметры:  $p$ ,  $v$  начального и конечного состояния, работу расширения, изменение внутренней энергии и энтальпии.

Ответ:  $l = q = 85 \text{ кДж/кг}$ ;  $\Delta u = 0 \text{ кДж/кг}$ ;  $\Delta h = 0 \text{ кДж/кг}$ ;  $v_1 = 0,0471 \text{ м}^3/\text{кг}$ ;  $v_2 = 0,51 \text{ м}^3/\text{кг}$ ;  $p_2 = 2,3 \cdot 10^5 \text{ Па}$ .

4.7. Азот, приведенный к нормальным физическим условиям, имеющий объём  $V_n = 3,5 \text{ м}^3$ , находится в первоначальном состоянии при  $p_1 = 1,1 \cdot 10^5 \text{ Па}$  и температуре  $t_1 = 25^\circ\text{C}$ . Его подвергают изотермическому сжатию до давления  $p_2 = 24,2 \cdot 10^5 \text{ Па}$ . Найти удельный объём в начальном и конечном состоянии, работу, затрачиваемую на сжатие и тепло, отведенное от газа.

Ответ:  $v_1 = 0,805 \text{ м}^3/\text{кг}$ ;  $v_2 = 0,038 \text{ м}^3/\text{кг}$ ;  $Q = L = -273 \text{ 711,8 Дж}$ .

4.8. 25 кг воздуха изотермически сжимается при  $t_1 = 27^\circ\text{C}$  до тех пор, пока давление не становится равным  $p_2 = 41,5 \cdot 10^5 \text{ Па}$ . На сжатие затрачивается работа  $L = -8 \text{ 000 МДж}$ . Найти начальное давление и объём, конечный объём и теплоту, отведённую от воздуха.

Ответ:  $L = Q = 8 \text{ 000 МДж}$ ;  $p_1 = 1,013 \text{ бар}$ ;  $v_2 = 0,472 \text{ м}^3/\text{кг}$ ;  $v_1 = 19,3 \text{ м}^3/\text{кг}$ .

4.9. Во сколько раз изменится абсолютное значение работы адиабатного сжатия 1 кг воздуха ( $k = 1,4$ ), имеющего начальную температуру  $T_1 = 293 \text{ К}$  и давление  $p_1 = 1 \text{ бар}$ , если конечное давление  $p_2$  а) в

первом процессе равно 10 бар, а в других увеличивается в б) 10, в) 100 и г) 1000 раз? Как изменится величина работы, если начальная абсолютная температура газа увеличится д) в 10 раз?

Ответ: а)  $l = 195,65$  Дж; б) в 2,93 раза; в) в 6,66 раз; г) в 13,85 раз; д) уменьшится в 10 раз.

4.10. При адиабатном расширении 1 кг воздуха температура его падает на  $120^\circ\text{C}$ . Чему равна полученная в процессе его расширения работа и сколько тепла следовало бы подвести к воздуху, чтобы ту же по величине работу получить в изотермическом процессе?

Ответ:  $l = 86,1$  кДж/кг.

4.11. Чему равна начальная температура азота, если его конечная температура после совершения процесса адиабатного сжатия равна  $750^\circ\text{C}$ . Степень сжатия  $\varepsilon = v_1 / v_2 = 10$ . Теплоёмкости  $c_p$  и  $c_v$  – постоянные.

Ответ:  $T_1 = 407,3$  К.

4.12. Из баллона ёмкостью  $0,05 \text{ м}^3$ , наполненного азотом, газ выпускается в атмосферу настолько быстро, что теплообмен не успевает совершиться между окружающей средой и азотом. До выпуска давление в баллоне было  $p_1 = 12 \text{ МН/м}^2$  и температура  $t_1 = 27^\circ\text{C}$ . После закрытия вентиля температура в баллоне стала равной  $t_2 = 0^\circ\text{C}$ . Чему равна масса выпущенного азота и давление в баллоне после выпуска?

Ответ:  $p_2 = 8,61 \cdot 10^6 \text{ Н/м}^2$ ;  $m_2 = 5,32$  кг;  $\Delta m = 1,51$  кг.

4.13. В баллоне объёмом 40 л находится сжатый кислород при давлении 140 бар и температуре окружающей среды. После быстрого открытия выпускного вентиля кислород вытекает в атмосферу, затем вентиль снова зарывается. Теплообмен не успевает совершиться между содержимым в баллоне и средой. Давление в баллоне после выпуска  $p_2 = 70 \cdot 10^5 \text{ Н/м}^2$ . Через некоторое время температура кислорода становится вновь равной температуре среды  $t_1 = 20^\circ\text{C}$ . Чему равна температура кислорода в баллоне сразу после выпуска? Какое количество кислорода вышло из баллона? Чему стало равно давление в баллоне после

восстановления первоначальной температуры? Какое количество кислорода вышло бы, если бы выпуск производился очень медленно, при неизменной температуре и конечном давлении газа  $p_2 = 70 \cdot 10^5$  бар.

Ответ:  $t_2 = -32,79^\circ\text{C}$ ;  $p_3 = 85,33$  бар;  $\Delta m_{\text{ад}} = 18,77$  г;  $\Delta m_{\text{T}} = 0,001$  г.

4.14. Воздух участвует в политропном процессе с показателем политропы 1,21. Чему равняется теплоёмкость воздуха в этом процессе, если его изохорная теплоёмкость равна  $c_v = 0,78$  кДж/(кг·К), а показатель адиабаты  $k = 1,401$ .

Ответ:  $c_n = -0,652$  кДж/(кг·К).

4.15. 1 кг кислорода  $\text{O}_2$  занимает объём  $V = 0,5$  м<sup>3</sup> при давлении  $p = 200$  кПа. Чему равна температура газа?

Ответ:  $T = 385$  К.

4.16. Дети бросили в костёр стальной баллон с газом. Температура газа в баллоне при нагревании повысилась в два раза. Чему равно начальное давление газа, если в процессе нагревания оно выросло на 200 кПа.

Ответ:  $p_1 = 200$  кПа.

4.17. В изобарном процессе к 1 кг газа подводится теплота в количестве  $Q = 400$  кДж. Чему равняется давление рабочего тела, если известно, что его объём изменился на 2 м<sup>3</sup>, а на изменение внутренней энергии пошла половина подведённой теплоты.

Ответ:  $p = 100$  кПа.

4.18. В двигателе Дизеля топливо, впрыскиваемое в цилиндр, самовоспламеняется при соприкосновении со сжатым воздухом, имеющим большую температуру, чем температура самовоспламенения топлива. Определить минимально необходимую степень сжатия  $\varepsilon = V_1 / V_2$  и давление в конце сжатия  $p_2$ , если температура воспламенения топлива равна  $630^\circ\text{C}$ . Перед началом сжатия воздух в цилиндре имеет параметры  $p_1 = 0,97$  бар,  $t_1 = 60^\circ\text{C}$ . Сжатие считать обратимым адиабатным,  $k = 1,4$ .

Ответ:  $p_2 = 32,49$  бар;  $\varepsilon = 12,35$ .

4.19. В соплах и на лопатках газовой турбины расширяется по адиабате  $m = 1500$  кг/ч двуокиси углерода  $\text{CO}_2$ . Параметры газа на входе в турбину:  $p_1 = 7 \cdot 10^5$  Па,  $t = 700^\circ\text{C}$ ; на выходе:  $p_2 = 0,98 \cdot 10^5$  Па. Определить параметры  $\text{CO}_2$  на выходе, часовую полезную внешнюю работу газа  $l' = - \int_{p_1}^{p_2} v dp$  и теоретическую (без учета потерь) мощность турбины  $N_0$ . Расчёт проводить с учётом переменной теплоёмкости в зависимости от температуры (см. приложение).

Ответ:  $v_2 = 1,173$  м<sup>3</sup>/кг;  $l' = 753,9$  МДж/кг;  $N_0 = 209,4$  кВт;  $t_2 = 335^\circ\text{C}$ .

4.20. В регенеративном подогревателе газовой турбины воздух нагревается при постоянном давлении от  $t_1 = 130^\circ\text{C}$  до  $t_2 = 500^\circ\text{C}$ . Определить количество тепла, сообщенное воздуху в единицу времени, если расход его составляет 250 кг/ч. Дать ответ в кДж/с и кВт. Для решения воспользоваться табличными данными.

Ответ:  $Q = 26,92$  кДж/с = 26,92 кВт.

4.21. Монооксид углерода, массой 1 кг, при давлении  $p_1 = 0,2$  МПа и температуре  $t_1 = 25^\circ\text{C}$  сначала сжимается по адиабате до давления  $p_2 = 1,2$  МПа, затем расширяется по изотерме, после чего, в изобарном процессе возвращается в исходное состояние. Определить параметры газа в начале и в конце каждого процесса, изменение внутренней энергии, энтальпии и энтропии в каждом процессе, работу, располагаемую работу и количество теплоты, участвующих в процессах. Изобразить изменение состояния газа на диаграммах  $pv$  и  $Ts$ . Рабочее тело считать идеальным газом.

Ответ:  $v_1 = 0,442$  м<sup>3</sup>/кг;  $v_2 = 0,123$  м<sup>3</sup>/кг;  $v^3 = 0,738$  м<sup>3</sup>/кг;  $\Delta u_{12} = l_{12} = 147$  кДж/кг;  $\Delta h_{12} = l'_{12} = 207$  кДж/кг;  $q_{23} = l_{23} = 264,5$  кДж/кг;  $\Delta s_{23} = 532$  Дж/(кг·К);  $\Delta u_{31} = 147,9$  кДж/кг;  $\Delta h_{31} = 207$  кДж/кг;  $\Delta s_{31} = 532$  Дж/(кг·К);  $l_{31} = 59,3$  кДж/кг.

4.22. От воздуха массой 1 кг при постоянном давлении отводится 275 кДж теплоты, при этом объем воздуха уменьшается в два раза. Определить температуру воздуха в конце процесса охлаждения.  $R = 287$  Дж/(кг·К),  $k = 1,4$ .

Ответ:  $T_2 = 274$  К.

## 5. Второе начало термодинамики. Теория циклов. Циклы ДВС

5.1. Тепловая машина, работающая по циклу Карно использует воздух в качестве рабочего тела. В начальный момент времени воздух занимает объём  $V_1 = 1 \text{ дм}^3$ , при давлении  $p_1 = 100 \text{ кПа}$  и температуре  $T_1 = 273 \text{ К}$ . Затем, в процессе изотермического и адиабатного расширения объём рабочего тела составляет  $V_2 = 3 \text{ дм}^3$  и  $V_3 = 5 \text{ дм}^3$ , соответственно. Определить работу, совершаемую воздухом в каждом процессе цикла, суммарную работу цикла, КПД цикла, если  $k = 1,4$ .

Решение:

Количество вещества, совершающего цикл

$$\nu = \frac{p_1 V_1}{\mu R T_1} = \frac{10^5 \text{ Па} \cdot 10^{-3} \text{ м}^3}{8,314 \frac{\text{Дж}}{\text{моль} \cdot \text{К}} \cdot 273 \text{ К}} = 0,044 \text{ моль.}$$

Работа при изотермическом расширении (в процессе подвода теплоты) равна

$$L_{12} = \mu R T_1 \nu \ln \frac{V_2}{V_1} = 8,314 \frac{\text{Дж}}{\text{моль} \cdot \text{К}} \cdot 273 \text{ К} \cdot 0,044 \text{ моль} \cdot \ln \frac{3 \cdot 10^{-3} \text{ м}^3}{1 \cdot 10^{-3} \text{ м}^3} = 109,7 \text{ Дж.}$$

Работа при адиабатном расширении газа равна

$$\begin{aligned} L_{23} &= \mu c_v T_1 \nu \left[ 1 - \left( \frac{V_2}{V_3} \right)^{k-1} \right] = \frac{\mu R}{k-1} T_1 \nu \left[ 1 - \left( \frac{V_2}{V_3} \right)^{k-1} \right] = \\ &= \frac{8,314 \frac{\text{Дж}}{\text{моль} \cdot \text{К}}}{1,4-1} \cdot 273 \text{ К} \cdot 0,044 \text{ моль} \cdot \left[ 1 - \left( \frac{3 \cdot 10^{-3} \text{ м}^3}{5 \cdot 10^{-3} \text{ м}^3} \right)^{1,4-1} \right] = \\ &= 46 \text{ Дж.} \end{aligned}$$

Отношение температур высшего и низшего источников теплоты

$$\frac{T_2}{T_1} = \left( \frac{V_2}{V_3} \right)^{k-1} = \left( \frac{3 \cdot 10^{-3} \text{ м}^3}{5 \cdot 10^{-3} \text{ м}^3} \right)^{1,4-1} = 0,815,$$

тогда температура низшего источника теплоты

$$T_2 = 0,815 T_1 = 0,815 \cdot 273 \text{ К} = 223 \text{ К.}$$

Объём газа в конце изотермического сжатия найдём из уравнения адиабатного процесса

$$V_4 = V_1 \left( \frac{T_2}{T_1} \right)^{-\frac{1}{k-1}} = 1 \cdot 10^{-3} \text{ м}^3 \cdot 0,815^{-\frac{1}{1,4-1}} = 1,67 \cdot 10^{-3} \text{ м}^3.$$

Работа изотермического сжатия равна

$$L_{34} = \mu R T_2 \nu \ln \frac{V_4}{V_3} = 8,314 \frac{\text{Дж}}{\text{моль} \cdot \text{К}} \cdot 223 \text{ К} \cdot 0,044 \text{ моль} \cdot \ln \frac{1,67 \cdot 10^{-3} \text{ м}^3}{5 \cdot 10^{-3} \text{ м}^3} = -90 \text{ Дж}.$$

Работа адиабатного сжатия равна

$$L_{41} = \frac{\mu R}{k-1} T_2 \nu \left[ 1 - \left( \frac{T_2}{T_1} \right)^{-1} \right] = \frac{8,314 \frac{\text{Дж}}{\text{моль} \cdot \text{К}}}{1,4-1} \cdot 223 \text{ К} \cdot 0,044 \text{ моль} \cdot (1 - 0,815^{-1}) = -46 \text{ Дж}.$$

Работа цикла

$$L = L_{12} + L_{23} + L_{34} + L_{41} = 109,7 \text{ Дж} + 46 \text{ Дж} - 90 \text{ Дж} - 46 \text{ Дж} = 19,7 \text{ Дж}.$$

КПД цикла

$$\eta_t = 1 - \frac{T_2}{T_1} = 1 - 0,815 = 0,185.$$

Ответ:  $L_{12} = 109,7 \text{ Дж}$ ;  $L_{23} = 46 \text{ Дж}$ ;  $L_{34} = -90 \text{ Дж}$ ;  $L_{41} = -46 \text{ Дж}$ ;  $L = 19,7 \text{ Дж}$ ;  $\eta_t = 0,185$ .

5.2. Определить часовой перерасход топлива на механические потери в ДВС, если эффективный КПД двигателя  $\eta_e = 0,45$ , теоретический часовой расход топлива  $G_t = 6,7 \text{ кг/ч}$  при  $N = 50 \text{ кВт}$ , низшая теплотворная способность топлива  $H_u = 45 \text{ МДж/кг}$ .

Решение: Эффективный КПД двигателя равен

$$\eta_e = \frac{L}{Q_1} = \frac{Nt}{G_T H_u t} = \frac{N}{G_T H_u},$$

откуда

$$G_T = \frac{N}{\eta_e H_u} = \frac{50 \cdot 10^3 \text{ Вт}}{0,45 \cdot 45 \cdot 10^6 \frac{\text{Дж}}{\text{кг}}} = 2,47 \cdot 10^{-3} \frac{\text{кг}}{\text{с}} \approx 8,9 \frac{\text{кг}}{\text{ч}}.$$

Перерасход топлива составит

$$\Delta G_T = G_T - G_t = 8,9 \frac{\text{кг}}{\text{ч}} - 6,7 \frac{\text{кг}}{\text{ч}} = 2,2 \frac{\text{кг}}{\text{ч}}.$$

Ответ:  $\Delta G_T = 2,2 \text{ кг/ч}$ .

5.3. Определить КПД и работу цикла с подводом тепла по изохоре если даны  $p_1 = 1 \text{ бар}$ ,  $t_1 = 0^\circ \text{С}$ ,  $p_3 = 53 \text{ бар}$ ,  $p_4 = 3,5 \text{ бар}$ . Рабочим телом является 1 кг сухого воздуха.

Ответ:  $\eta_t = 0,56$ ;  $l_{ц} = 626,45 \text{ кДж/кг}$ .

5.4. Чему будет равен термический КПД цикла, приведенного в задаче 5.3, если процесс адиабатного расширения продолжить до давления  $p_5 = 1$  бар и на сколько процентов увеличится работа цикла?

Ответ:  $\eta_t = 0,685$ ;  $\chi = 15,1\%$ .

5.5. Определить термический КПД цикла с подводом тепла по изобаре, если:  $p_1 = 1$  бар,  $t_1 = 0^\circ\text{C}$ ,  $p_3 = 55$  бар,  $p_4 = 3,5$  бар. Рабочее тело – 1 кг сухого воздуха.

Ответ:  $\eta_t = 0,6$ .

5.6. Для цикла из задачи 5.5 определить полезно затраченное и подведённое тепло.

Ответ:  $q_1 = 1\,241,5$  кДж/кг;  $q_{\text{п}} = 744,9$  кДж/кг.

5.7. Чему равен термический КПД цикла, приведённого в задаче 5.5, если процесс адиабатного расширения продолжить до давления  $p_5 = 1$  бар и во сколько раз увеличится работа цикла?

Ответ:  $\eta_t = 0,887$ ; в 3 раза.

5.8. Для идеального цикла со смешанным подводом теплоты определить КПД и давление  $p_2$ , если известны  $p_1 = 1$  бар,  $t_1 = 0^\circ\text{C}$ ,  $p_3 = 70$  бар,  $p_5 = 3,5$  бар, теплота, подведённая в изохорном процессе 2-3  $q'_{12} = 27,16$  кДж/кг, рабочее тело – 1 кг сухого воздуха.

Ответ:  $p_2 = 64,4$  бар;  $\eta_t = 0,63$ .

5.9. Определить эксергию 1 кмоль воздуха, находящегося при температуре окружающей среды и давлении 100 бар по отношению к окружающей среде с параметрами  $T_0 = 293\text{K}$  и давлении  $p_0 = 1$  бар.

Ответ:  $ex = 14\,591,4$  кДж/кмоль.

5.10. Определить увеличение эксергии 1 кг воздуха, который находится в окружающей среде, имеющей параметры  $p_0 = 1$  бар,  $T_0 = 293\text{K}$ , если его сжать по адиабате до  $T = 500\text{K}$ .

Ответ:  $ex = 207,86$  кДж/кг.

5.11. Определить эксергетический КПД регенеративного теплообменника газовой турбины, в котором воздух нагревается от  $T'_b = 400$

К до  $T''_в = 535$  К, а отработавшие газы охлаждаются от  $T'_г = 615$  К до  $T''_г = 480$  К. Принять теплоёмкость для газов и воздуха  $c_p = 1,005$  кДж/(кг·К), а температуру окружающей среды  $T_0 = 275$  К.

Ответ:  $\eta_{ex} = 0,826$ .

5.12. Определить эксергетический КПД средней части паровой турбины, если пар в ней расширяется по адиабате от  $p_1 = 20,5$  бар и  $T_1 = 838$  К до  $p_2 = 1,6$  бар и  $T_2 = 508$  К.

Ответ:  $\eta_{ex} = 0,934$ .

5.13. Определить изменение энтропии 3 кг азота в политропном процессе при изменении температуры от  $t_1 = 100^\circ\text{C}$  до  $t_2 = 300^\circ\text{C}$ . Показатель политропы  $n = 1,2$ . Теплоёмкость принять по молекулярно-кинетической теории. Изобразить процессы на  $p\nu$  и  $Ts$  диаграммах.

Ответ:  $\Delta s = -0,956$  кДж/(кг·К).

5.14. Один кг азота и 1 кг водорода сжимаются изотермически при  $t = 15^\circ\text{C}$  от 1 до 10 бар. Для какого газа изменение энтропии будет больше и во сколько раз (по отношению к энтропии другого газа).

Ответ:  $\Delta s_{\text{H}_2} / \Delta s_{\text{N}_2} = 14$ .

5.15. Определить изменение энтропии в процессе испарения 1 кг воды при температуре  $100^\circ\text{C}$ , если известно, что теплота парообразования равна  $r = 2\,257$  кДж/кг.

Ответ:  $\Delta s = 6,05$  кДж/(кг·К).

5.16. Пятьдесят кг льда, имеющего начальную температуру  $-5^\circ\text{C}$ , помещено в воздух с температурой  $15^\circ\text{C}$ . Считая, что образующаяся при таянии вода нагревается до температуры воздуха, определить увеличение энтропии в результате этого процесса. Теплота таяния льда равна  $\lambda = 333$  кДж/кг, теплоёмкость льда  $c_p = 2,03$  кДж/(кг·К), теплоёмкость воды  $c_p = 4,187$  кДж/(кг·К).

Ответ:  $\Delta s = 74$  кДж/(кг·К).

5.17. Стальной шар, массой 10 кг при  $500^\circ\text{C}$  погружается в сосуд с 18 кг воды, температура которой равна  $15^\circ\text{C}$ . Определить изменение

энтропии системы в этом процессе. Считать, что тепловые потери отсутствуют, теплоёмкость стали  $c_p = 0,5129$  кДж/(кг·К), теплоёмкость воды  $c_p = 4,187$  кДж/(кг·К).

Ответ:  $\Delta s = 3,41$  кДж/кг·К.

5.18. Определить эксергию (максимально полезную работоспособность) воздуха в баллоне. Давление воздуха 150 бар, температура равна температуре окружающей среды. Параметры окружающей среды (воздуха)  $p_0 = 1$  бар,  $t_0 = 20^\circ\text{C}$ . Объём баллона 40 дм<sup>3</sup>. Воздух считать идеальным газом.

Ответ:  $E_x = 2\,411$  кДж.

5.19. Определить эксергию воздуха в баллоне. Давление и температура воздуха  $p = 130$  бар,  $t = 200^\circ\text{C}$ . Параметры окружающей среды  $p_0 = 1$  бар,  $t_0 = 15^\circ\text{C}$ . Объём баллона 20 дм<sup>3</sup>. Воздух считать идеальным газом.

Ответ:  $E_x = 849$  кДж.

5.20. Определить эксергию азота, находящегося в пьезометре экспериментальной установки, с параметрами  $p = 250$  бар,  $t = 700^\circ\text{C}$ . Параметры окружающей среды  $p_0 = 1$  бар,  $t_0 = 20^\circ\text{C}$ . Объём пьезометра 500 см<sup>3</sup>. Азот считать идеальным газом.

Ответ:  $E_x = 24$  кДж.

5.21. Определить эксергию 100 кДж тепла при температуре  $700^\circ\text{C}$ . Температура окружающей среды  $0^\circ\text{C}$ . Определить потерю эксергии этого тепла, если оно будет передано тепловому источнику с температурой  $500^\circ\text{C}$ .

Ответ:  $E_x = 71,9$  кДж;  $\Delta E_x = 7,2$  кДж.

5.22. Определить эксергию 1 кг горячих газов в котельном агрегате. Известно, что температура пламени равна  $1\,500^\circ\text{C}$ , давление газов близко к атмосферному. Параметры окружающего воздуха равны  $p_0 = 1$  бар,  $t_0 = 0^\circ\text{C}$ . Принять, что термодинамические свойства газов аналогичны свойствам воздуха. Задачу решать с использованием таблиц.

Ответ:  $e_x = 1\,139$  кДж/кг.

5.23. Азот протекает через местное гидравлическое сопротивление. Параметры азота при этом изменяются от  $p_1 = 40$  бар и  $t_1 = 300^\circ\text{C}$  до  $p_2 = 10$  бар и  $t_2 = 280^\circ\text{C}$ . Определить изменение эксергии 1 кг азота в этом процессе и количество отведенного тепла. Азот считать идеальным газом. Параметры среды  $p_0 = 1$  бар,  $t_0 = 10^\circ\text{C}$ .

Ответ:  $\Delta ex = -93$  кДж/кг.

5.24. В трубе течет азот с начальными параметрами  $p_1 = 25$  бар и  $t_1 = 80^\circ\text{C}$ . В результате гидравлического сопротивления давление азота вдоль трубы падает и в конце трубы становится равным  $p_2 = 17$  бар. Определить потерю эксергии 1 кг азота в результате этого процесса. Считать, что процесс течения адиабатный, а газ идеальный. Параметры окружающей среды:  $p_0 = 1$  бар и  $t_0 = 20^\circ\text{C}$ .

Ответ:  $\Delta ex = -25,7$  кДж/кг.

5.25. Температура газов, выходящих из земли у некоторых горячих источников, доходит до  $180^\circ\text{C}$  (давление атмосферное). Определить эксергию 1 кг газа. Температура среды  $t_0 = 20^\circ\text{C}$ . Газ считать идеальным и идентичным углекислому газу. Определить максимальный термический КПД, который имел бы тепловой двигатель, превращающий тепло этого источника в работу.

Ответ:  $ex = 26,7$  кДж/кг;  $\eta = 0,353$ .

5.26. В регенеративном теплообменнике газотурбинной установки воздух нагревается за счет отработавших газов, выходящих из турбины от  $t_1 = 140^\circ\text{C}$  до  $t_2 = 270^\circ\text{C}$ , вследствие чего отработавшие газы охлаждаются с  $t_3 = 340^\circ\text{C}$  до  $t_4 = 210^\circ\text{C}$ . Определить потерю эксергии ГТУ в результате такого теплообмена в расчете на 1 кг проходящего газа. Газ считать идеальным, обладающим свойством воздуха. Теплоёмкость принять по молекулярно-кинетической теории. Температура окружающей среды  $20^\circ\text{C}$ . Теплообменник не имеет тепловых потерь. Гидросопротивлением теплообменника пренебречь. Определить эксергетический КПД теплообменника.

Ответ:  $\Delta ex = 10,25$  кДж/кг;  $\eta_{ex} = 0,949$ .

5.27. Определить потерю работоспособности в тепловыделяющем элементе атомного реактора, где выделяющееся в процессе ядерной реакции тепло, поглощается водой, протекающей при давлении 100 бар. Вода нагревается от  $t_1 = 190^\circ\text{C}$  до  $t_2 = 280^\circ\text{C}$ , температура тепловыделяющего элемента постоянна по высоте и равна  $t_3 = 380^\circ\text{C}$ . Расчет тепла вести на 100 ккал переданного тепла. Температура окружающей среды  $t_0 = 20^\circ\text{C}$ . Тепловыми и гидравлическими потерями пренебречь.

Ответ:  $\Delta L = 12,86$  ккал.

5.28. Определить потерю эксергии в процессе конденсации водяного пара в конденсаторе паровой турбины. Процесс конденсации происходит при давлении  $p = 0,04$  бар, температура конденсации при этом равна  $29^\circ\text{C}$ . Тепло, выделяющееся в процессе конденсации пара передается окружающей среде, температура которой  $10^\circ\text{C}$ . Расчет провести на 1 кг конденсирующегося пара. Считать, что в конденсатор поступает сухой насыщенный пар. Гидравлическими потерями пренебречь.

Ответ:  $\Delta ex = 72,4$  кДж/кг; 2,98%.

5.29. Средняя температура подвода тепла для водяного пара в паротурбинной установке (ПТУ) равна  $330^\circ\text{C}$ , температура отвода тепла равна  $29^\circ\text{C}$ . Определить термический КПД ПТУ, а также эксергический КПД теоретического цикла ПТУ. При расчёте эксергетического КПД считать, что в топке котла сжигается топливо при атмосферном давлении, максимальная температура пламени равна  $t_{\text{пл}} = 1350^\circ\text{C}$ , теплоёмкость продуктов сгорания постоянная. Температуру среды принять равной  $t_{\text{ср}} = 29^\circ\text{C}$ . Тепловые потери в котельном агрегате отсутствуют.

Ответ:  $\eta_t = 0,499$ ;  $\eta_{ex} = 0,811$ .

5.30. Поршневой двигатель работает по циклу с подводом тепла в процессе  $v = \text{const}$ . Начальное состояние рабочего тела:  $p_1 = 0,9$  бар и  $t_1 = 20^\circ\text{C}$ . Степень сжатия  $\varepsilon = 4,6$ . При сгорании выделяется энергия в количестве 1287 кДж/кг. Определить термический КПД и мощность двигателя, если диаметр цилиндра двигателя  $D = 250$  мм, ход поршня  $S = 340$  мм,  $n = 200$  мин<sup>-1</sup> и за каждые два оборота совершается один цикл. Рабочее тело – воздух.

Ответ:  $\eta_t = 0,457$ ;  $N = 5,58$  кВт.

5.31. Определить полезную работу, совершенную за цикл с подводом тепла в процессе  $v = \text{const}$ , если известно, что расход топлива составляет 44 г на 1 кг воздуха, степень сжатия равна 6, теплота сгорания топлива  $Q_p^{\text{н}} = 29\,260$  кДж/кг, показатель адиабаты равен 1,37.

Ответ:  $A_{\text{пол}} = 623\,985,7$  Дж/кг.

5.32. Для цикла с подводом тепла при  $v = \text{const}$  определить среднее индикаторное (цикловое) давление. Начальное давление  $p_1 = 0,98 \cdot 10^5$  Н/м<sup>2</sup>,  $t_1 = 20^\circ\text{C}$ ,  $\varepsilon = 3,6$ ,  $\lambda = 3,33$ ,  $k = 1,4$ .

Ответ:  $p_i = 5,29 \cdot 10^5$  Па.

5.33. Для цикла с подводом теплоты в процессе  $p = \text{const}$  определить полезную работу и термический КПД, если  $p_1 = 0,98 \cdot 10^5$  Н/м<sup>2</sup>,  $t_1 = 50^\circ\text{C}$ ,  $\varepsilon = 14$ ,  $\rho = 1,67$ ,  $k = 1,4$ .

Ответ:  $\eta_t = 0,61$ ;  $l = 381\,238$  Дж/кг.

5.34. Определить эксергию 1 кг текущей по трубе воды при давлении, близком к атмосферному. Температура воды и окружающего воздуха равны соответственно  $t_1 = 90^\circ\text{C}$  и  $t_2 = 20^\circ\text{C}$ . Теплоёмкость воды принять равной 4,187 кДж/(кг·К).

Ответ:  $ex = 28,3$  кДж/кг.

5.35. В установке, используемой для определения показателя адиабаты  $k$ , находится испытуемый газ, сжатый до  $p = 2,94$  бар. Определить показатель адиабаты  $k$  этого газа, если при быстром перемещении поршня на 9 мм давление в сосуде повышается на 0,01 бар. Объем сосуда равен 0,3 л, диаметр поршня 10 мм, а испытуемый газ можно считать идеальным.

Ответ: 1,44.

5.36. Для цикла поршневого двигателя внутреннего сгорания с изохорным подводом теплоты известны: термический КПД  $\eta_t = 0,55$  и количество отведенной теплоты  $q_2 = 500$  кДж/кг. Давление и температура рабочего тела в начальной точке цикла равны  $p_1 = 0,1$  МПа и  $t_1 = 20^\circ\text{C}$ . Определить:

- степень сжатия  $\varepsilon$ ;
- количество подведенной теплоты  $q_1$ ;

- степень повышения давления  $\lambda$ ;
- максимальное давление цикла  $p_3$ ;

Для цикла с изобарным подводом теплоты, осуществляемом в том же диапазоне давлений, при тех же начальных условиях и при том же количестве отводимой теплоты, найти:

- степень сжатия  $\varepsilon_p$ ;
- степень предварительного расширения  $\rho$ ;
- количество подведенной теплоты  $q_{1p}$ ;
- термический КПД  $\eta_t$ .

Максимальная температура какого из двух циклов будет выше, почему? Рабочее тело – воздух ( $R = 287$  Дж/(кг·К),  $k = 1,41$ ).

Ответ:  $\varepsilon = 7,36$ ;  $q_1 = 111$  кДж/кг;  $\lambda = 3,34$ ;  $p_3 = 5,53$  МПа;  $\varepsilon_p = 17,56$ ;  $\rho = 2,39$ ;  $q_{1p} = 1283$  кДж/кг;  $\eta_t = 0,61$ ;  $\Delta T = 0$  К.

5.37. На орбитальной космической станции для дыхания используется смесь кислорода (25% по массе) и гелия под давлением 43,5 кПа. В результате столкновения с микрометеоритом произошла разгерметизация станции. За время работ по устранению причин аварии давление упало на 10 кПа. На сколько изменилась температура на космической станции, если в обычных условиях ее величина составляет 18°C.

Ответ:  $\Delta T = -28,45$  К.

5.38. Для цикла Карно с термическим КПД равным 70% известны давление 0,1 МПа и температура в начале процесса отвода теплоты и количество теплоты, подводимой от высшего источника  $q_1 = 200$  кДж/кг. Найти: параметры состояния рабочего тела в характерных точках цикла, работу цикла, количество отводимой к низшему источнику теплоты. Рабочее тело – воздух, ( $R = 287$  Дж/(кг·К),  $k = 1,4$ ).

Ответ:  $T_1 = 977$  К;  $T_2 = 293,15$  К;  $p_1 = 13,8$  МПа;  $v_1 = 0,0203$  м<sup>3</sup>/кг;  $p_2 = 6,76$  МПа;  $v_2 = 0,0415$  м<sup>3</sup>/кг;  $p_3 = 0,1$  МПа;  $v_3 = 0,841$  м<sup>3</sup>/кг;  $p_4 = 0,2$  МПа;  $v_4 = 0,412$  м<sup>3</sup>/кг;  $q_2 = 60$  кДж/кг;  $l = 140$  кДж/кг.

## 6. Реальные газы и пары. Циклы холодильных установок

6.1. Для отопления помещения используется тепловой насос, работающий по циклу Карно, мощностью 100 кВт. Температура наружного воздуха  $t_2 = 0^\circ\text{C}$ , температура в помещении  $t_1 = 20^\circ\text{C}$ . Определить коэффициент использования энергии теплового насоса  $\varepsilon$  и необходимую для его привода механическую мощность  $N_m$ .

Решение: Коэффициент использования энергии теплового насоса, работающего по циклу Карно, равен

$$\varepsilon = \frac{Q_1}{L} = \frac{N}{N_m} = \frac{T_1}{T_1 - T_2} = \frac{293 \text{ К}}{293 \text{ К} - 273 \text{ К}} = 14,65,$$

откуда

$$N_m = \frac{N}{\varepsilon} = \frac{100 \text{ кВт}}{14,65} = 6,83 \text{ кВт}.$$

Ответ:  $\varepsilon = 14,65$ ;  $N_m = 6,83 \text{ кВт}$ .

6.2. В сосуде объёмом  $V = 8 \text{ дм}^3$  находится кислород, массой  $m = 0,3 \text{ кг}$ . Какую долю объёма сосуда составляет собственный объём молекул.

Решение: Постоянная  $b$  уравнения Ван-дер-Ваальса равна учетверённому объёму молекул, содержащемуся в одном кмоль вещества

$$b = 4V' \frac{\mu}{m},$$

откуда

$$V' = \frac{m b}{\mu 4}.$$

Тогда

$$K = \frac{V'}{V} = \frac{m b}{\mu 4V} = \frac{0,3 \text{ кг}}{32 \text{ кг/кмоль}} \cdot \frac{3,17 \cdot 10^{-2} \frac{\text{м}^3}{\text{кмоль}}}{4 \cdot 8 \cdot 10^{-3} \text{ м}^3} = 0,0093 = 0,93\%$$

Ответ: 0,93%

6.3. В баллоне вместимостью  $10 \text{ дм}^3$  находится кислород массой  $m = 0,8 \text{ кг}$  при температуре  $T = 300 \text{ К}$ . Найти давление реального газа  $p$ , внутреннее давление  $p'$  и отношение  $p'/p$ .

Решение: Количество вещества в баллоне

$$\nu = \frac{m}{\mu} = \frac{0,8 \text{ кг}}{32 \text{ кг/кмоль}} = 0,025 \text{ кмоль} = 25 \text{ моль}.$$

Внутреннее давление

$$p' = v^2 \frac{a}{V^2} = 25^2 \text{ моль}^2 \frac{0,138 \frac{\text{Па} \cdot \text{м}^6}{\text{МОЛЬ}^2}}{(10 \cdot 10^{-3} \text{ м}^3)^2} = 862500 \text{ Па} \approx 0,863 \text{ МПа}.$$

Давление газа определим по уравнению Ван-дер-Ваальса

$$\begin{aligned} p &= \frac{v\mu RT}{V - vb} - v^2 \frac{a}{V^2} = \frac{v\mu RT}{V - vb} - p' = \\ &= \frac{25 \text{ моль} \cdot 8,314 \frac{\text{Дж}}{\text{МОЛЬ} \cdot \text{К}} \cdot 300 \text{ К}}{10 \cdot 10^{-3} \text{ м}^3 - 25 \text{ моль} \cdot 3,17 \cdot 10^{-5} \frac{\text{м}^3}{\text{МОЛЬ}}} - 862500 \text{ Па} = \\ &= 5\,907\,858 \text{ Па} \approx 5,91 \text{ МПа}. \end{aligned}$$

Окончательно

$$\frac{p'}{p} = \frac{0,863 \text{ МПа}}{5,91 \text{ МПа}} = 0,146 = 14,6\%$$

Ответ:  $p' = 0,863 \text{ МПа}$ ;  $p = 5,91 \text{ МПа}$ ;  $p'/p = 0,146$ .

6.4. Вычислить постоянные Ван-дер-Ваальса  $a$  и  $b$  и газовую постоянную  $R$  водорода в критическом состоянии.

Решение: Критические параметры состояния водорода, по справочным данным, равны

$$T_{\text{к}} = 33,2 \text{ К}; p_{\text{к}} = 13 \cdot 10^5 \text{ Па}; V_{\text{к}} = 6,55 \cdot 10^{-5} \frac{\text{м}^3}{\text{МОЛЬ}}.$$

Коэффициенты уравнения Ван-дер-Ваальса равны

$$b = \frac{V_{\text{к}}}{3} = \frac{6,55 \cdot 10^{-5} \frac{\text{м}^3}{\text{МОЛЬ}}}{3} = 2,22 \cdot 10^{-5} \frac{\text{м}^3}{\text{МОЛЬ}},$$

и

$$a = 3p_{\text{к}}V_{\text{к}}^2 = 3 \cdot 13 \cdot 10^5 \text{ Па} \cdot \left(6,55 \cdot 10^{-5} \frac{\text{м}^3}{\text{МОЛЬ}}\right)^2 = 0,0167 \frac{\text{Па} \cdot \text{м}^6}{\text{МОЛЬ}^2}.$$

Газовую постоянную выразим из уравнения критического коэффициента

$$K_{\text{к}} = R \frac{T_{\text{к}}}{p_{\text{к}}V_{\text{к}}} = \frac{8}{3}.$$

Тогда

$$R = \frac{8 p_k V_k}{3 T_k} = \frac{8}{3} \cdot \frac{13 \cdot 10^5 \text{ Па} \cdot 6,55 \cdot 10^{-5} \frac{\text{м}^3}{\text{моль}}}{33,2 \text{ К}} = 6,84 \frac{\text{Дж}}{\text{моль} \cdot \text{К}}$$

Ответ:  $a = 0,0167 \text{ Па} \cdot \text{м}^6 / \text{моль}^2$ ;  $b = 2,22 \cdot 10^{-5} \text{ м}^3 / \text{моль}$ ;  
 $R = 6,84 \text{ Дж} / (\text{моль} \cdot \text{К})$ .

6.5. Вычислить давление водорода вблизи критической точки при  $T = 35 \text{ К}$ , если его молярный объём составляет  $V_\mu = 0,1 \text{ дм}^3 / \text{моль}$ . Сравнить с результатом вычисления давления по уравнению состояния идеального газа.

Решение: Коэффициенты уравнения Ван-дер-Ваальса для водорода (по справочным данным) равны

$$a = 0,024 \frac{\text{Па} \cdot \text{м}^6}{\text{моль}^2}; b = 2,66 \cdot 10^{-5} \frac{\text{м}^3}{\text{моль}}$$

Давление реального газа составит

$$\begin{aligned} p &= \frac{\mu RT}{V_\mu - b} - \frac{a}{V_\mu^2} = \\ &= \frac{8,314 \frac{\text{Дж}}{\text{моль} \cdot \text{К}} \cdot 35 \text{ К}}{0,1 \cdot 10^{-3} \frac{\text{м}^3}{\text{моль}} - 2,66 \cdot 10^{-5} \frac{\text{м}^3}{\text{моль}}} - \frac{0,024 \frac{\text{Па} \cdot \text{м}^6}{\text{моль}^2}}{\left(0,1 \cdot 10^{-3} \frac{\text{м}^3}{\text{моль}}\right)^2} = \\ &= 1\,564\,441 \text{ Па} \approx 1,56 \text{ МПа}. \end{aligned}$$

Давление водорода, вычисленное по уравнению Менделеева-Клапейрона

$$p = \frac{\mu RT}{V_\mu} = \frac{8,314 \frac{\text{Дж}}{\text{моль} \cdot \text{К}} \cdot 35 \text{ К}}{0,1 \cdot 10^{-3} \frac{\text{м}^3}{\text{моль}}} = 2\,909\,900 \text{ Па} \approx 2,91 \text{ МПа}$$

отличается от давления реального газа в окрестностях критической точки почти в два раза.

Ответ:  $p = 1,56 \text{ МПа}$ .

6.6. Определить изменение внутренней энергии хлора массой  $m = 20 \text{ г}$  при его изотермическом расширении от  $V_1 = 200 \text{ см}^3$  до  $V_2 = 500 \text{ см}^3$ .

Решение: Внутренняя энергия Ван-дер-Ваальсова газа равна

$$U = \frac{m}{\mu} c_v T - \left(\frac{m}{\mu}\right)^2 \frac{a}{V}$$

Изменение внутренней энергии

$$\begin{aligned} \Delta U &= U_2 - U_1 = \left(\frac{m}{\mu}\right)^2 a \left(\frac{1}{V_2} - \frac{1}{V_1}\right) = \\ &= \left(\frac{20 \text{ г}}{71 \frac{\text{г}}{\text{моль}}}\right)^2 \cdot 0,657 \frac{\text{Па} \cdot \text{м}^6}{\text{моль}^2} \cdot \\ &\cdot \left(\frac{1}{500 \cdot 10^{-6} \text{ м}^3} - \frac{1}{200 \cdot 10^{-6} \text{ м}^3}\right) = -156 \text{ Дж.} \end{aligned}$$

Ответ:  $\Delta U = -156 \text{ Дж}$ .

6.7. Кислород при температуре  $T = 273 \text{ К}$  проходит через пористую перегородку, при этом его давление уменьшается с  $p_1 = 250 \text{ бар}$  до  $p_2 = 1 \text{ бар}$ . Найти изменение температуры газа.

Решение: Удельная мольная изобарная теплоёмкость может быть определена как

$$\mu c_p = \frac{i + 2}{2} \mu R = \frac{5 + 2}{2} \cdot 8,314 \frac{\text{Дж}}{\text{моль} \cdot \text{К}} = 29,1 \frac{\text{Дж}}{\text{моль} \cdot \text{К}}$$

Изменение температуры кислорода в процессе дросселирования вычислим исходя из дифференциального эффекта Джоуля-Томпсона для Ван-дер-Ваальсова газа

$$\begin{aligned} \Delta T &= \left(\frac{2a}{\mu RT} - b\right) \frac{p_2 - p_1}{\mu c_p} \\ &= \left(\frac{2 \cdot 0,138 \frac{\text{Па} \cdot \text{м}^6}{\text{моль}^2}}{8,314 \frac{\text{Дж}}{\text{моль} \cdot \text{К}} \cdot 273 \text{ К}} - 3,17 \cdot 10^{-5} \frac{\text{м}^3}{\text{моль}}\right) \\ &\cdot \frac{1 \cdot 10^5 \text{ Па} - 250 \cdot 10^5 \text{ Па}}{29,1 \frac{\text{Дж}}{\text{моль} \cdot \text{К}}} = -77 \text{ К.} \end{aligned}$$

Ответ:  $\Delta T = -77 \text{ К}$ .

6.8. Для термической воздушной холодильной машины, служащей для охлаждения складского помещения до  $-5^\circ\text{С}$  найти: а) работу, затраченную на охлаждение 1 кг воздуха, б) холодильный коэффициент в) удельную холодопроизводительность, если сжатие в компрес-

соре происходит до  $p_2 = 3$  бар и расширение в пневматическом двигателе до  $p_1 = 1$  бар. Температура охлаждающей воды  $20^\circ\text{C}$ . Массовую теплоёмкость воздуха принять равной  $c_p = 1,005$  кДж/(кг·К),  $k = 1,41$ .

Ответ:  $l = 21,1$  кДж/кг,  $\varepsilon = 2,62$ ,  $q_0 = 2\,620$  кДж/МДж (тепло, отводимое от охлаждаемого тела на 1 МДж работы, затраченной в цикле - удельная холодопроизводительность).

6.9. Найти коэффициент трансформации тепла в тепловом насосе, работающему по обратному циклу Карно, если потребителю необходимо подавать горячую воду с температурой  $40^\circ\text{C}$ . В качестве холодильного источника используется водоём с температурой  $15^\circ\text{C}$ . На сколько процентов уменьшится расход электроэнергии в установке с тепловым насосом по сравнению со случаем непосредственного электрообогрева воды, подаваемой потребителю.

Ответ:  $\varepsilon = 12,5$ ;  $\chi = 91,7\%$ .

6.10. Тепловой насос выполнен на базе аммиачной компрессионной холодильной установки. Определить коэффициент трансформации тепла теплового насоса, если в компрессоре холодильной машины осуществляется сухой ход при начальном давлении  $p_1 = 0,081$  бар, а сжатие аммиака до  $p_2 = 11,8$  бар происходит по адиабате. Переохлаждение жидкого аммиака в конденсаторе отсутствует. Привести схему решения задачи на диаграмме  $Ts$ .

Ответ:  $\varepsilon = 3,68$ .

6.11. В баллоне ёмкостью 40 л заключён азот под давлением 75 бар и температурой  $20^\circ\text{C}$ . Пользуясь уравнением для идеального и реального газов, определить удельный объём азота и сравнить полученные результаты.

Ответ: идеальный газ  $v = 0,0116$  м<sup>3</sup>/кг; реальный газ  $v = 0,0111$  м<sup>3</sup>/кг; с учетом коэффициента сжимаемости  $v = 0,01135$  м<sup>3</sup>/кг; справочное (табличное) значение  $0,0113$  м<sup>3</sup>/кг.

6.12. Воздушный компрессор сжимает 129 кг/час воздуха. Установлено, что при сжатии энтальпия воздуха увеличивается на 190 000 кДж/час, а энтальпия окружающей компрессор воды – на

10 000 кДж/час. Пренебрегая потерями и изменением кинетической и потенциальной энергии, найти мощность привода компрессора.

Ответ:  $N = 50$  кВт.

6.13. Рассчитать изменение температуры при необратимом процессе расширения реального газа, описываемого уравнением Ван-дер-Ваальса. Принять, что удельная теплоёмкость  $c_v$  не зависит от температуры. В качестве реального газа принимается диоксид углерода, для которого  $\mu c_v = 29,5$  кДж/(кмоль·К),  $a = 0,368$  м<sup>6</sup>/кг<sup>2</sup>. Расширение осуществляется от начального объёма  $v_1 = 2,2 \cdot 10^{-3}$  м<sup>3</sup>/кг до конечного  $v_2 = 22 \cdot 10^{-3}$  м<sup>3</sup>/кг.

Ответ:  $\Delta T = -5,1$  К.

6.14. Резервуар объёмом 8 м<sup>3</sup> заполнен гелием. Определить количество газа, содержащегося в резервуаре с давлением 0,5 бар и температурой 180°С. Задачу решить по уравнению состояния идеального и реального газов.

Ответ: идеальный газ  $m = 2,075$  кг; реальный газ  $m = 2,070$  кг.

6.15. Воздушная холодильная машина должна обеспечить температуру в охлаждаемом помещении  $t_{\text{охл}} = -5^\circ\text{С}$  при температуре окружающей среды  $t_0 = 20^\circ\text{С}$ . Холодопроизводительность машины 200 000 ккал/ч. Давление воздуха на выходе из компрессора  $p_2 = 5$  бар, в холодильной камере  $p_1 = 1$  бар. Определить мощность двигателя для привода машины, расход воздуха, холодильный коэффициент и количество теплоты, передаваемое окружающей среде. Подсчитать холодильный коэффициент машины, работающей по циклу Карно в том же интервале температур. Представить цикл на  $Ts$  диаграмме.

Ответ:  $\varepsilon = 1,77$ ;  $m = 10\,050$  кг/час;  $N = 131,4$  кВт;  $Q_1 = 1\,210\,725,5$  кДж/ч;  $\varepsilon_{\text{карно}} = 10,72$ .

6.16. Компрессор холодильной установки всасывает пар фреона–12 при  $t_1 = -15^\circ\text{С}$  и степени сухости  $x_1 = 0,972$ , и изотермически сжимает его до давления, при котором степень сухости становится равной  $x = 1$ . Из компрессора фреон–12 поступает в конденсатор, где охлаждается водой с температурой на входе  $t_{1в} = 12^\circ\text{С}$ , а на выходе  $t_{2в} = 20^\circ\text{С}$ . В дроссельном вентиле жидкий фреон–12 дросселируется до состояния

влажного насыщенного пара, после чего направляется в испаритель, из которого выходит со степенью сухости  $x_1$ . Теплота, необходимая для испарения фреона–12 подводится из охлаждаемой камеры. Определить теоретическую мощность двигателя холодильной установки, часовой расход фреона–12 и охлаждающей воды, если холодопроизводительность установки  $Q_0 = 200$  МДж/ч.

Ответ:  $N = 14,258$  кВт;  $m = 1\,556,4$  кг/ч.

## 7. Дифференциальные уравнения термодинамики

7.1. Доказать, пользуясь дифференциальными уравнениями для коэффициентов изотермного и адиабатного сжатия в частных производных, что адиабата проходит круче изотермы.

Решение: Разделим дифференциальное уравнение первого закона термодинамики при независимых переменных  $p$  и  $T$

$$dq = c_p dT - T \left( \frac{\partial v}{\partial T} \right)_p dp$$

на дифференциальное уравнение первого закона термодинамики при независимых переменных  $v$  и  $T$

$$dq = c_v dT + T \left( \frac{\partial p}{\partial T} \right)_v dv$$

при  $dq = 0$  и  $ds = 0$ , получим

$$-\frac{c_p \left( \frac{\partial p}{\partial T} \right)_v}{c_v \left( \frac{\partial v}{\partial T} \right)_p} = \left( \frac{\partial p}{\partial v} \right)_s$$

Подставляя значение  $\left( \frac{\partial p}{\partial T} \right)_v$  из производной уравнения состояния идеального газа

$$\left( \frac{\partial v}{\partial p} \right)_T = - \frac{\left( \frac{\partial v}{\partial T} \right)_p}{\left( \frac{\partial p}{\partial T} \right)_v}$$

получаем

$$\left( \frac{\partial p}{\partial v} \right)_s = \frac{c_p \left( \frac{\partial p}{\partial v} \right)_T \left( \frac{\partial v}{\partial T} \right)_p}{c_v \left( \frac{\partial v}{\partial T} \right)_p}$$

откуда

$$\left(\frac{\partial p}{\partial v}\right)_s = k \left(\frac{\partial p}{\partial v}\right)_T$$

или

$$\beta_s = k\beta_T.$$

Следовательно, адиабата всегда проходит круче изотермы.

7.2. Показать, что

$$c_p - c_v = -T \left(\frac{\partial s}{\partial v}\right)_T \left(\frac{\partial s}{\partial p}\right)_T.$$

Решение: Известно, что

$$c_p - c_v = T \left(\frac{\partial p}{\partial T}\right)_v \left(\frac{\partial v}{\partial T}\right)_p.$$

Учитывая, что

$$\left(\frac{\partial p}{\partial T}\right)_v = \left(\frac{\partial s}{\partial v}\right)_T$$

и

$$\left(\frac{\partial v}{\partial T}\right)_p = - \left(\frac{\partial s}{\partial p}\right)_T$$

получаем искомое равенство

$$c_p - c_v = -T \left(\frac{\partial s}{\partial v}\right)_T \left(\frac{\partial s}{\partial p}\right)_T.$$

7.3. Доказать равенство:

$$\left(\frac{\partial T}{\partial p}\right)_s = \frac{T}{c_p} \left(\frac{\partial v}{\partial T}\right)_p.$$

7.4. Доказать равенства:

а)

$$c_p = T \left(\frac{\partial s}{\partial T}\right)_p ;$$

б)

$$c_v = T \left(\frac{\partial s}{\partial T}\right)_v.$$

7.5. Доказать равенство:

$$c_v = -T \left( \frac{\partial^2 T}{\partial p^2} \right)_v.$$

7.6. Вывести уравнение адиабаты в дифференциальной форме при независимых переменных  $p$  и  $T$ .

Ответ:

$$dT \pm \frac{T \left( \frac{\partial v}{\partial T} \right)_p dp}{c_p} = 0.$$

## 8. Водяной пар, влажный воздух, циклы паротурбинных установок

8.1. Паровая машина работает по следующему циклу: цилиндр наполняется паром от котла в изохорном процессе 1-2, затем, в изобарном процессе 2-3, происходит дальнейшее наполнение цилиндра паром, после чего, в адиабатном процессе 3-4 происходит расширение рабочего тела без доступа пара. После открытия клапана происходит уменьшение давления пара в изохорном процессе 4-5, а затем, под действием выталкивающего действия поршня, в изобарном процессе 5-1, происходит выталкивание пара в холодильник. После чего, цикл повторяется.

Паровая машина расходует за один цикл 1 г топлива теплотворной способностью 15,3 МДж/кг. Объёмы равны  $V_1 = 0,2 \text{ дм}^3$ ,  $V_2 = 1,2 \text{ дм}^3$ ,  $V_3 = 2,4 \text{ дм}^3$ . Давление в холодильнике равно  $p_1 = 0,1 \text{ МПа}$ , а в котле –  $p_2 = 1 \text{ МПа}$ . Показатель адиабаты  $k = 1,4$ .

Определить термический КПД паровой машины.

Решение: Количество теплоты, выделившийся при сгорании топлива, составляет

$$Q = mq = 1 \cdot 10^{-3} \text{ кг} \cdot 15,3 \cdot 10^6 \frac{\text{Дж}}{\text{кг}} = 15\,300 \text{ Дж}.$$

Работа изобарного расширения равна

$$L_{23} = p_2(V_2 - V_1) = 1 \cdot 10^6 \text{ Па} \cdot \\ \cdot (1,2 \cdot 10^{-3} \text{ м}^3 - 0,2 \cdot 10^{-3} \text{ м}^3) = 1\,000 \text{ Дж}.$$

Работа адиабатного расширения

$$L_{34} = \frac{1}{k-1} p_2 V_2 \left[ 1 - \left( \frac{V_2}{V_3} \right)^{k-1} \right] = \frac{1}{1,3-1} 1 \cdot 10^6 \text{ Па} \cdot \\ \cdot 1,2 \cdot 10^{-3} \text{ м}^3 \cdot \left[ 1 - \left( \frac{1,2 \cdot 10^{-3} \text{ м}^3}{2,4 \cdot 10^{-3} \text{ м}^3} \right)^{1,3-1} \right] = 751 \text{ Дж}.$$

Работа изобарного сжатия

$$L_{51} = p_1 (V_1 - V_3) = 0,1 \cdot 10^6 \text{ Па} \cdot \\ \cdot (0,2 \cdot 10^{-3} \text{ м}^3 - 2,4 \cdot 10^{-3} \text{ м}^3) = -220 \text{ Дж}.$$

Суммарная работа цикла

$$L = L_{23} + L_{34} + L_{51} = 1\,000 \text{ Дж} + 751 \text{ Дж} - 220 \text{ Дж} = 1\,531 \text{ Дж}.$$

Термический КПД цикла

$$\eta_t = \frac{L}{Q} = \frac{1\,531 \text{ Дж}}{15\,300 \text{ Дж}} \approx 0,1.$$

Ответ:  $\eta_t = 0,1$ .

8.2. Определить состояние пара при  $p = 10$  бар и  $v = 0,17$  м<sup>3</sup>/кг.

Решение: Используя *is*-диаграмму водяного пара находим, что при  $p = 10$  бар удельный объём сухого пара равен  $v'' = 0,1945$  м<sup>3</sup>/кг, поэтому, при данных условиях, пар будет влажным, со степенью сухости

$$x \approx \frac{v}{v''} = \frac{0,17 \frac{\text{м}^3}{\text{кг}}}{0,1945 \frac{\text{м}^3}{\text{кг}}} = 0,875.$$

Ответ: влажный пар,  $x = 0,875$ .

8.3. Определить состояние пара при  $p = 12$  бар и  $t = 200^\circ\text{C}$ .

Решение: Используя *is*-диаграмму водяного пара определяем, что температура насыщенного пара равна  $t_n = 187,95^\circ\text{C}$ . Т.к. температура выше температуры насыщения, то пар будет перегретым.

Ответ: перегретый пар.

8.4. На входе в пароперегреватель водяной пар имеет параметры  $p_1 = 80$  бар и  $x = 0,95$ , а на выходе –  $p_2 = 80$  бар и  $t = 500^\circ\text{C}$ . Определить удельный объём влажного пара и расход теплоты в пароперегревателе на 1 кг пара.

Решение: Удельный объём влажного пара

$$v_x \approx v''x = 0,02352 \frac{\text{м}^3}{\text{кг}} \cdot 0,95 = 0,0223 \frac{\text{м}^3}{\text{кг}}.$$

Энтальпия влажного пара

$$i_x = i' + rx = 1\,317,3 \frac{\text{кДж}}{\text{кг}} + 1\,441,2 \frac{\text{кДж}}{\text{кг}} \cdot 0,95 = 2\,686 \frac{\text{кДж}}{\text{кг}}.$$

Расход теплоты в пароперегревателе

$$q = i - i_x = 3\,405 - 2\,686 = 719 \frac{\text{кДж}}{\text{кг}}.$$

Ответ:  $v_x = 0,0223 \text{ м}^3/\text{кг}$ ;  $q = 719 \text{ кДж/кг}$ .

8.5. Температура насыщенного пара при некотором давлении равна  $305,5 \text{ }^\circ\text{C}$ . Определить давление этого пара с помощью таблицы.

Ответ:  $p = 92,14 \text{ бар}$ .

8.6. Используя таблицу для водяного пара, определить для сухого пара внешнюю  $\Psi$  и внутреннюю  $\phi$  теплоту парообразования при  $p = 5 \text{ бар}$ .

Ответ:  $\Psi = 186 \text{ кДж/кг}$ ;  $\phi = 1\,923 \text{ кДж/кг}$ .

8.7. Пользуясь таблицами для водяного пара найти удельный объём энтальпию, внутреннюю энергию и энтропию влажного пара при  $p = 5 \text{ бар}$  и влажности  $15\%$ .

Ответ:  $v_x = 0,3185 \text{ м}^3/\text{кг}$ ;  $h_x = 4\,541,65 \text{ кДж/кг}$ ;  
 $u_x = 4\,381,65 \text{ кДж/кг}$ ;  $s_x = 6,07 \text{ кДж}/(\text{кг}\cdot\text{К})$ .

8.8. В сосуде шарообразной формы в верхней половине находится сухой насыщенный пар, в нижней – вода в состоянии насыщения. Во сколько раз масса воды больше массы пара, если внутренний диаметр сосуда  $1 \text{ м}$ , а давление внутри него  $p = 20 \text{ бар}$ ? Решить, пользуясь таблицами.

Ответ: в  $84,63$  раза.

8.9. Один килограмм влажного пара при давлении  $p_1 = 30 \text{ бар}$  и влажности  $10\%$  расширяется при неизменной температуре до  $p_2 = 2 \text{ бар}$ . Определить работу процесса. Решить с помощью  $h$ - $s$  диаграммы.

Ответ:  $l = 660 \text{ кДж/кг}$ .

8.10. Процесс происходит при неизменной влажности 20% от начального давления  $p_1 = 1$  бар до конечного  $p_2 = 20$  бар. Найти по величине и знаку теплоту, изменение внутренней энергии и работу процесса. Решить с помощью  $h-s$  диаграммы.

Ответ:  $q = -128,7$  кДж/кг;  $\Delta u = 118,7$  кДж/кг;  $l = -247,4$  кДж/кг.

8.11. Влажный пар с  $p_1 = 30$  бар и при  $x = 0,85$  дросселируется до  $p_2 = 5$  бар, после чего направляется на производство. Найти состояние, удельный объём, степень сухости и температуру пара после дросселирования. Решить с помощью  $h-s$  диаграммы.

Ответ:  $v = 0,3372$  м<sup>3</sup>/кг;  $x = 0,9$ ;  $T = 425$  К.

8.12. Влажный пар с давлением  $p_1 = 50$  бар и  $x = 0,98$  дросселируется до  $p_2 = 1$  бар. Найти состояние пара после дросселирования и интегральный дроссель-эффект по величине и знаку. Решить с помощью  $h-s$  диаграммы.

Ответ: состояние пара – перегретое;  $\Delta t = 165^\circ\text{C}$ ; интегральный дроссель-эффект положителен.

8.13. Найти удельный объём, температуру, энтальпию, энтропию и внутреннюю энергию влажного пара, имеющего давление  $p = 20$  бар и влажность 20%. Решить с помощью  $h-s$  диаграммы.

Ответ:  $h = 2\,420$  кДж/кг;  $v = 0,08$  м<sup>3</sup>/кг;  $s = 5,56$  кДж/(кг·К);  $u = 2\,260$  кДж/кг;  $t = 213^\circ\text{C}$ .

8.14. Для перегретого пара с давлением  $p = 50$  бар и температурой перегрева  $400^\circ\text{C}$  найти удельный объём, внутреннюю энергию, энтальпию и энтропию пара. Решить с помощью  $h-s$  диаграммы.

Ответ:  $u = 2\,920$  кДж/кг;  $s = 6,655$  кДж/кг;  $h = 3\,200$  кДж/кг.

8.15. При давлении  $p = 50$  бар энтальпия пара равна  $3\,160$  кДж/кг. Определить энтропию, температуру и внутреннюю энергию пара. Решить с помощью  $h-s$  диаграммы.

Ответ:  $t = 388^\circ\text{C}$ ;  $v = 0,06$  м<sup>3</sup>/кг;  $s = 6,52$  кДж/кг;  $u = 2\,860$  Дж/кг.

8.16. Найти затраченное тепло, работу и изменение внутренней энергии в процессе  $p = 30$  бар = const, если в начале процесса пар имел

влажность 11%, а в конце стал перегретым и его температуру повысилась до 500°C. Какой процент тепла был затрачен на первоначальном участке процесса, в конце которого пар превратился в сухой насыщенный? Решить с помощью  $h-s$  диаграммы.

Ответ:  $q = 850$  кДж/кг;  $l = 167$  кДж/кг;  $\Delta u = 683$  кДж/кг. Для превращения пара в сухой насыщенный было затрачено 25% тепла.

8.17. Перегретый пар с  $p_1 = 20$  бар и  $t_1 = 400^\circ\text{C}$  сначала расширяется по адиабате до сухого насыщенного состояния, а затем охлаждается до температуры 115°C при неизменном объеме. Определить для этого процесса теплообмен с внешней средой, работу процесса и располагаемую работу. Решить с помощью  $h-s$  диаграммы.

Ответ:  $q = -241,1$  кДж/кг;  $l = 407$  кДж/кг;  $l_0 = 554,9$  кДж/кг.

8.18. При изотермическом сжатии 1 кг перегретого пара, имеющего вначале  $p_1 = 3$  бар и  $t_1 = 300^\circ\text{C}$ , отводится 20 кДж тепла. Каково давление в конце сжатия и на сколько уменьшилась внутренняя энергия пара? Найти затраченную работу на сжатие пара. Решить с помощью  $h-s$  диаграммы.

Ответ:  $p_2 = 9,8$  бар;  $\Delta u = -294,4$  кДж/кг;  $l = -2\,924$  кДж/кг.

8.19. Адиабатное расширение сухого (насыщенного) пара происходит от  $p_1 = 10$  бар до  $p_2 = 0,5$  бар. Найти средний показатель кривой процесса и сравнить его с часто применяемым для сухого пара значением  $k = 1,135$ . Решить с помощью  $h-s$  диаграммы.

Ответ:  $k_{\text{cp}} = 1,186 > k = 1,135$ .

8.20. Котельная производит пар с давлением  $p_1 = 15$  бар. Каков должен быть перегрев пара, если цех предприятия должен получить пар с давлением  $p_2 = 2$  бар и температуре 200°C? Найти значения энтропии в обоих случаях. Снижение давления с 15 до 2 бар происходит в редукционном клапане. Решить с помощью  $h-s$  диаграммы.

Ответ:  $t = 230^\circ\text{C}$ ;  $s_1 = 6,5$  кДж/(кг·К);  $s_2 = 7,45$  кДж/(кг·К).

8.21. Сравнить удельные расходы пара двух турбин одинаковых начальных параметров  $p_1 = 130$  бар,  $t_1 = 565^\circ\text{C}$ , при одинаковых давлениях в конденсаторе  $p_2 = 0,035$  бар, если первая имеет промежуточный

перегрев при  $p_{\text{н}} = 30$  бар до начальной температуры, а вторая – нет. Считать процессы расширения адиабатными. Решить с помощью  $h-s$  диаграммы.

Ответ:  $d_1 = 0,645$  кг/МДж;  $d_2 = 0,746$  кг/МДж.

8.22. Во сколько раз увеличится термодинамический КПД теоретического паросилового цикла и работа 1 кг пара, если от работы турбины на выпуске в атмосферу перейти к работе на вакуум 94%. Начальные параметры пара  $p_1 = 40$  бар,  $t_1 = 380^\circ\text{C}$ . При работе на выпуск котельная установка питается водой с температурой  $t_2 = 55^\circ\text{C}$ , барометрическое давление  $p_2 = 0,945$  бар. Решить с помощью  $h-s$  диаграммы.

Ответ:  $\chi_{\text{н}} = 1,508$ ;  $\chi_{\text{л}} = 1,508$ .

8.23. В паровом поршневом идеальном компрессоре сжимается сухой насыщенный пар с начальным давлением  $p_1 = 30$  бар до конечного давления  $p_2 = 100$  бар. Какая затрата работы на сжатие 5 кг пара, если сжатие происходит по адиабате. Определить объём цилиндра компрессора. Найти среднее индикаторное давление. Решить с помощью  $h-s$  диаграммы.

Ответ:  $l = 3\,405$  кДж/кг;  $V = 0,335$  м<sup>3</sup>;  $p_i = 59,7$  бар.

## 9. Процессы изменения состояния газа в открытой системе. Циклы газотурбинных и реактивных установок

9.1. В баллоне находилось  $m_1 = 8$  кг газа при давлении  $p_1 = 1$  МПа. Вентиль баллона открыли и закрыли по достижении давления  $p_2 = 200$  кПа. Определить массу газа, покинувшего баллон, если температура газа в баллоне оставалась постоянной.

Решение: Масса газа, находившегося в баллоне изначально

$$m_1 = p_1 \frac{\mu \cdot V}{\mu R \cdot T}$$

Масса газа, оставшегося в баллоне

$$m_2 = p_2 \frac{\mu \cdot V}{\mu R \cdot T}$$

Масса газа, покинувшего баллон

$$\Delta m = m_1 - m_2 = \frac{\mu \cdot V}{\mu R \cdot T} (p_1 - p_2).$$

Постоянный коэффициент

$$\frac{\mu \cdot V}{\mu R \cdot T} = \frac{m_1}{p_1}.$$

Тогда

$$\Delta m = m_1 \left(1 - \frac{p_2}{p_1}\right) = 8 \text{ кг} \cdot \left(1 - \frac{200 \cdot 10^3 \text{ Па}}{1 \cdot 10^6 \text{ Па}}\right) = 6,4 \text{ кг}.$$

Ответ: 6,4 кг.

9.2. В газотурбинной установке, работающей по циклу Брайтона, температура рабочего тела на входе в компрессор равна  $t_1 = 20^\circ\text{C}$ , степень повышения давления в компрессоре равна  $\beta = 6$ , температура газов на выходе из камеры сгорания  $t_3 = 900^\circ\text{C}$ . Определить термический КПД идеального цикла ГТУ, а также КПД действительного цикла, если внутренние относительные КПД турбины и компрессора равны  $\eta_T = 0,88$  и  $\eta_K = 0,85$ . Рабочее тело – воздух,  $k = 1,4$ .

Решение: Температура после компрессора равна

$$T_2 = T_1 \beta^{\frac{k-1}{k}} = 293 \text{ К} \cdot 6^{\frac{1,4-1}{1,4}} = 489 \text{ К}.$$

Температура после компрессора в действительном цикле

$$T_5 = \frac{T_2 - T_1}{\eta_K} + T_1 = \frac{489 \text{ К} - 293 \text{ К}}{0,85} + 293 = 524 \text{ К}.$$

Температура на выходе из турбины

$$T_4 = T_3 \frac{T_1}{T_2} = 1173 \text{ К} \cdot \frac{293 \text{ К}}{488 \text{ К}} = 703 \text{ К}.$$

Температура на выходе из турбины в действительном цикле

$$T_6 = T_3 - \eta_T (T_3 - T_4) = 1173 \text{ К} - 0,88 \cdot (1173 \text{ К} - 703 \text{ К}) = 759 \text{ К}.$$

Термический КПД идеального цикла

$$\eta_t = 1 - \frac{T_4 - T_1}{T_3 - T_2} = 1 - \frac{703 \text{ К} - 293 \text{ К}}{1173 \text{ К} - 489 \text{ К}} = 0,401.$$

КПД действительного цикла

$$\eta = 1 - \frac{T_6 - T_1}{T_3 - T_5} = 1 - \frac{759 \text{ К} - 293 \text{ К}}{1173 \text{ К} - 524 \text{ К}} = 0,282.$$

Ответ:  $\eta_t = 0,401$ ;  $\eta = 0,282$ .

9.3. В противоточном теплообменнике воздух охлаждается от  $t_1 = 240^\circ\text{C}$  до  $t_2 = 60^\circ\text{C}$ . Охлаждение происходит за счёт воды, которая

нагревается от температуры  $t_3 = 15^\circ\text{C}$  до  $t_4 = 32^\circ\text{C}$ . Определить изменение энтропии системы вода-воздух в течение 1 часа. Расход охлаждающей воды равен  $m = 250$  кг/ч. Теплоёмкость воздуха принять постоянной, равной  $c_p = 1,0598$  кДж/(кг·К). Теплоёмкость воды принять постоянной и равной  $c = 4,416$  кДж/(кг·К). Принять, что теплообменник не имеет тепловых потерь и гидравлических сопротивлений.

Ответ:  $\Delta s = 20,94$  кДж/кг.

9.4. Определить потерю эксергии, происходящую в процессе конденсации водяного пара в конденсаторе паровой турбины. Процесс конденсации пара происходит при давлении  $p = 0,04$  бар, температура конденсации при этом равна  $29^\circ\text{C}$ . Тепло, выделяющееся в процессе конденсации пара, передается к окружающей среде, температура которой равна  $10^\circ\text{C}$ . Расчет произвести на 1 кг конденсирующегося пара. Считать, что в конденсатор поступает сухой насыщенный пар. Гидравлическими потерями конденсатора пренебречь.

Ответ:  $\Delta ex = 153,2$  кДж/(кг·К).

9.5. В трубе течёт пар с начальной скоростью  $c_1 = 300$  м/с. Его параметры  $p_1 = 15$  бар,  $t_1 = 300^\circ\text{C}$ . Определить, на сколько действительная температура отличается от температуры пара, фиксируемой термометром, если считать, что термометр показывает температуру торможения.

Ответ:  $\Delta t = 19^\circ\text{C}$ .

9.6. Определить скорость струи пара на выходе из сопла Лавалья и потерю кинетической энергии вследствие трения, если состояние пара на входе в сопло определяется давлением  $p_1 = 60$  бар и температурой  $t_1 = 450^\circ\text{C}$ . Давление на выходе из сопла  $p_2 = 12$  бар. Скоростной коэффициент сопла  $\varphi = 0,94$ , начальная скорость  $c_1 = 200$  м/с.

Ответ:  $c_2 = 879,75$  м/с;  $h_{\text{тр}} = 50\,977,9$  Дж/кг.

9.7. Определить термический КПД простейшей газотурбинной установки, работающей по циклу с подводом тепла при  $p = \text{const}$  при степенях повышения давления: а)  $\beta = 5$ ; б)  $\beta = 10$ ; в)  $\beta = 20$ . Считать, что рабочее тело обладает свойствами воздуха с показателем адиабаты  $k = 1,4$ .

Ответ: а)  $\eta_t = 0,368$ ; б)  $\eta_t = 0,482$ ; в)  $\eta_t = 0,575$ .

9.8. В турбину газотурбинной установки входит гелий с параметрами  $p_3 = 1 \cdot 10^6 \text{ Н/м}^2$  и  $t_3 = 700^\circ\text{С}$ . Внутренний относительный КПД турбины равен 0,86; давление за турбиной  $p_4 = 1 \cdot 10^5 \text{ Н/м}^2$ . Определить температуру гелия на выходе из турбины. Определить массовый часовой расход гелия  $D$ , если действительная мощность турбины равна  $N_T = 40 \text{ МВт}$ .

Ответ:  $t_4 = 116^\circ\text{С}$ ;  $D = 67,3 \cdot 10^3 \text{ кг/ч}$ .

9.9. В стенке резервуара, из которого непрерывно воздушным насосом откачивается воздух, просверлено отверстие цилиндрическим сверлом, диаметром 5 мм, благодаря чему воздух втекает в резервуар из атмосферы. Определить скорость и количество воздуха, втекающего за 1 минуту, если барометрическое давление 1 бар, а температура наружного воздуха  $20^\circ\text{С}$ , коэффициенты сужения и расхода просверленного отверстия равны соответственно 0,8 и 0,72, в резервуаре насосом поддерживается разрежение  $80 \text{ кН/м}^2$ .

Ответ.  $w = 190,6 \text{ м/с}$ ;  $G = 0,002 \text{ кг/с}$ .

9.10. Сухой насыщенный пар с  $p_1 = 15 \text{ бар}$  истекает через суживающееся сопло в среду с давлением  $p_2 = 0,04 \text{ бар}$ . Определить теоретическую скорость истечения и секундный массовый расход пара через сопло, если диаметр устья  $d = 5 \text{ мм}$ .

Ответ:  $w_{\text{крит}} = 455,2 \text{ м/с}$ ;  $G = 0,0425 \text{ кг/с}$ .

9.11. Перегретый пар с  $p_1 = 25 \text{ бар}$  и  $t_1 = 450^\circ\text{С}$  истекает через сопло в среду с  $p_2 = 3 \text{ бар}$ . Определить форму сопла для получения максимально возможной скорости истечения, найти эту скорость, задавшись скоростным коэффициентом сопла  $\varphi = 0,9$ , а также секундный массовый расход пара через сопло, если диаметр сечения, определяющего расход,  $d = 5 \text{ мм}$ . Решить аналитически и графически с использованием  $h$ - $s$  диаграммы.

Ответ:  $w = 952,4 \text{ м/с}$ ;  $G = 0,049 \text{ кг/с}$ ;  $w_{\text{кр}} = 576,3 \text{ м/с}$ ;  $p_{\text{кр}} = 13,65 \text{ бар}$ .

9.12. В камере сгорания ЖРД сжигается смесь 98% азотной кислоты с керосином при давлении  $p = 50 \text{ бар}$ . Температура в камере  $T = 3000 \text{ К}$ . Продукты сгорания истекают через расширяющееся сопло.

Отношение теплоёмкостей  $k = 1,22$ , газовая постоянная  $R = 0,334$  кДж/(кг·К). Полагая, что двигатель работает у земли на расчётном режиме, то есть, давление газа на выходе из сопла равно давлению окружающей среды  $p_0 = 1$  бар, определить скорость продуктов сгорания на выходе из сопла.

Ответ:  $w = 2\,369,2$  м/с.

9.13. ЖРД работает на расчетном режиме, давление в камере сгорания  $p = 36$  бар, температура равна  $3\,200$  К, давление окружающей среды  $p_0 = 0,9$  бар,  $k = 1,41$ ,  $R = 0,35$  кДж/(кг·К). Определить скорость продуктов сгорания в устье расширяющегося сопла.

Ответ:  $w = 2\,251,2$  м/с.

9.14. Определить, на сколько повысится температура на лобовой поверхности метеорита при входе его в плотные слои атмосферы со скоростью  $7\,500$  м/с. Для воздуха  $c_p = 1,005$  кДж/(кг·К). Процесс торможения принять адиабатным.

Ответ:  $\Delta T = 27\,985$  К.

9.15. Самолёт с прямоточным воздушно-реактивным двигателем летит со скоростью  $400$  м/с при температуре воздуха  $t = -20^\circ\text{C}$ . Приняв для воздуха  $k = 1,41$ ,  $R = 287$  Дж/(кг·К), определить степень повышения давления в диффузоре ВРД. Процесс торможения считать адиабатным.

Ответ:  $\pi = 2,6$ .

9.16. Определить мощность ГТУ, работающей с подводом теплоты при  $v = \text{const}$  термический КПД цикла и расход топлива, если  $p_1 = 0,1$  МПа,  $t_1 = 17^\circ\text{C}$ ,  $p_2 = 0,82$  МПа, мощность, развиваемая турбиной,  $N_T = 5\,000$  кВт, расход воздуха  $m_v = 8,3$  кг/с, теплотворная способность топлива  $H_u = 40\,000$  кДж/кг, рабочее тело имеет физические свойства сухого воздуха.

Ответ:  $N = 1\,670$  кВт;  $\eta_t = 0,36$ ;  $G_T = 416,6$  кг/ч.

## 10. Теплопроводность

10.1. Определить тепловой поток, проходящий через кирпичную стенку высотой 5 м, шириной 4 м и толщиной 250 мм, если температуры внутренней поверхности  $t'_{ст} = 27^\circ\text{C}$  и  $t''_{ст} = -23^\circ\text{C}$ . Коэффициент теплопроводности  $\lambda = 0,77 \text{ Вт}/(\text{м}\cdot\text{К})$ .

Решение:

$$W = \frac{\lambda}{\delta} F (t'_{ст} - t''_{ст}) = \frac{0,77 \frac{\text{Вт}}{\text{м}\cdot\text{К}}}{0,25 \text{ м}} \cdot 5 \text{ м} \cdot 4 \text{ м} \cdot [27^\circ\text{C} - (-23^\circ\text{C})] = 3080 \text{ Вт}.$$

Ответ:  $W = 3080 \text{ Вт}$ .

10.2. Определить разность температур на внутренней и наружной поверхностях стальной стенки парового котла, толщиной 20 мм, если температура воды, поступающей в котёл, равна  $46^\circ\text{C}$ , а с  $1 \text{ м}^2$  поверхности нагрева снимается 25 кг/ч сухого насыщенного пара при манометрическом давлении 19 бар. Барометрическое давление составляет 1 бар. Коэффициент теплопроводности стали  $\lambda = 50 \text{ Вт}/(\text{м}\cdot\text{К})$ . Стенку котла считать плоской.

Решение: Абсолютное давление в котле

$$p = p_m + p_0 = 19 \text{ бар} + 1 \text{ бар} = 20 \text{ бар}.$$

Энтальпия сухого насыщенного пара (по  $i_s$ -диаграмме) при  $p = 20 \text{ бар}$  составляет  $i'' = 2799,2 \text{ кДж}/\text{кг}$ .

Энтальпия воды при  $46^\circ\text{C}$  (по справочным данным) равна  $i' = 192 \text{ кДж}/\text{кг}$ .

Плотность теплового потока

$$q = (i'' - i') G_{п} = \left( 2799,2 \frac{\text{кДж}}{\text{кг}} - 192 \frac{\text{кДж}}{\text{кг}} \right) \cdot 25 \frac{\text{кг}}{\text{ч}} = 65180 \frac{\text{кДж}}{\text{м}^2 \cdot \text{ч}} = 18,1 \frac{\text{кДж}}{\text{м}^2 \cdot \text{с}}.$$

Разность температур

$$\Delta T = \frac{\delta}{\lambda} q = \frac{0,02 \text{ м}}{50 \frac{\text{Вт}}{\text{м}\cdot\text{К}}} 18,1 \cdot 10^3 \frac{\text{Дж}}{\text{м}^2 \cdot \text{с}} = 7 \text{ К}$$

Ответ:  $\Delta T = 7 \text{ К}$ .

10.3. Плоская стальная стенка ( $\lambda_1 = 50 \text{ Вт}/(\text{м}\cdot\text{К})$ ,  $\delta_1 = 0,02 \text{ м}$ ) изолирована от тепловых потерь слоем асбеста ( $\lambda_2 = 0,15 \text{ Вт}/(\text{м}\cdot\text{К})$ ,  $\delta_2 = 0,2 \text{ м}$ ) и слоем пробки ( $\lambda_3 = 0,045 \text{ Вт}/(\text{м}\cdot\text{К})$ ,  $\delta_3 = 0,1 \text{ м}$ ). Определить толщину слоя пенобетона ( $\lambda = 0,08 \text{ Вт}/(\text{м}\cdot\text{К})$ ), необходимую для замены асбеста и пробки, чтобы теплоизоляционные свойства стенки остались без изменений.

Решение: Эквивалентный коэффициент теплопроводности трёхслойной стенки

$$\lambda_e = \frac{\delta_1 + \delta_2 + \delta_3}{\frac{\delta_1}{\lambda_1} + \frac{\delta_2}{\lambda_2} + \frac{\delta_3}{\lambda_3}} = \frac{0,02 \text{ м} + 0,2 \text{ м} + 0,1 \text{ м}}{\frac{0,02 \text{ м}}{50 \frac{\text{Вт}}{\text{м}\cdot\text{К}}} + \frac{0,2 \text{ м}}{0,15 \frac{\text{Вт}}{\text{м}\cdot\text{К}}} + \frac{0,1 \text{ м}}{0,045 \frac{\text{Вт}}{\text{м}\cdot\text{К}}}} = 0,09 \frac{\text{Вт}}{\text{м}\cdot\text{К}}$$

Толщина слоя пенобетона может быть найдена из уравнения

$$0,09 \frac{\text{Вт}}{\text{м}\cdot\text{К}} = \frac{0,02 \text{ м} + x}{\frac{0,02 \text{ м}}{50 \frac{\text{Вт}}{\text{м}\cdot\text{К}}} + \frac{x}{0,08 \frac{\text{Вт}}{\text{м}\cdot\text{К}}}}$$

откуда  $x = 0,16 \text{ м}$ .

Ответ:  $0,16 \text{ м}$ .

10.4. Стальная труба ( $\lambda_1 = 50 \text{ Вт}/(\text{м}\cdot\text{К})$ ) внутренним диаметром  $d_1 = 200 \text{ мм}$  и наружным  $d_2 = 220 \text{ мм}$  покрыта двухслойной изоляцией. Толщина первого слоя изоляции  $50 \text{ мм}$ , а  $\lambda_2 = 0,2 \text{ Вт}/(\text{м}\cdot\text{К})$ . Толщина второго слоя изоляции  $80 \text{ мм}$  при  $\lambda_3 = 0,1 \text{ Вт}/(\text{м}\cdot\text{К})$ . Температура внутренней поверхности  $t'_{\text{ст}} = 327^\circ\text{C}$ , а наружной  $t''_{\text{ст}} = 47^\circ\text{C}$ . Определить потери теплоты через изоляцию с  $1 \text{ м}$  длины трубопровода и температуры между слоями.

Решение: Потери теплоты, отнесенные к одному метру длины трубопровода

$$q_l = \frac{2\pi(t'_{\text{ст}} - t''_{\text{ст}})}{\frac{1}{\lambda_1} \ln \frac{d_2}{d_1} + \frac{1}{\lambda_2} \ln \frac{d_3}{d_2} + \frac{1}{\lambda_3} \ln \frac{d_4}{d_3}} =$$

$$= \frac{2\pi(327^\circ\text{C} - 47^\circ\text{C})}{\frac{1}{50 \frac{\text{Вт}}{\text{м}\cdot\text{К}}} \ln \frac{0,22 \text{ м}}{0,2 \text{ м}} + \frac{1}{0,2 \frac{\text{Вт}}{\text{м}\cdot\text{К}}} \ln \frac{0,32 \text{ м}}{0,22 \text{ м}} + \frac{1}{0,1 \frac{\text{Вт}}{\text{м}\cdot\text{К}}} \ln \frac{0,48 \text{ м}}{0,32 \text{ м}}} = 297 \frac{\text{Вт}}{\text{м}}$$

Температура между трубой и первым слоем изоляции

$$t'_{\text{сл}} = t'_{\text{ст}} - \frac{q_l}{2\pi\lambda_1} \ln \frac{d_2}{d_1} = 327^\circ\text{C} - \frac{297 \frac{\text{Вт}}{\text{м}}}{2\pi \cdot 50 \frac{\text{Вт}}{\text{м} \cdot \text{К}}} \ln \frac{0,22 \text{ м}}{0,2 \text{ м}} = 327^\circ\text{C}.$$

Температура между слоями изоляции

$$t''_{\text{сл}} = t'_{\text{сл}} - \frac{q_l}{2\pi\lambda_2} \ln \frac{d_3}{d_2} = 327^\circ\text{C} - \frac{297 \frac{\text{Вт}}{\text{м}}}{2\pi \cdot 0,2 \frac{\text{Вт}}{\text{м} \cdot \text{К}}} \ln \frac{0,32 \text{ м}}{0,22 \text{ м}} = 238^\circ\text{C}$$

Ответ:  $q_l = 297 \text{ Вт/м}$ ;  $t'_{\text{сл}} = 327^\circ\text{C}$ ;  $t''_{\text{сл}} = 238^\circ\text{C}$ .

10.5. В процессе измерений установлено, что температура между двумя точками на поверхности крышки головки цилиндра, отстоящими друг от друга на расстоянии 5 см, различается на  $10^\circ\text{C}$ . Определить величину градиента температуры.

Ответ:  $\nabla T = 200 \text{ К/м}$ .

10.6. Лаборант измерил температуру металлического прутка в двух точках, лежащих на расстоянии от начала прутка  $x_1 = 0,1 \text{ м}$  и  $x_2 = 0,2 \text{ м}$ . Она составила  $60^\circ\text{C}$  и  $30^\circ\text{C}$ , соответственно. Определить величину и направление вектора градиента температуры.

Ответ:  $\nabla T = -300 \text{ К/м}$ .

10.7. В процессе исследования нагревания поверхности заготовки, для точек с координатами  $(0,15 \text{ м}; 0,20 \text{ м})$  и  $(0,30 \text{ м}; 0,50 \text{ м})$  были определены температуры, равные  $t_1 = 25^\circ\text{C}$  и  $t_2 = 50^\circ\text{C}$ , соответственно. Определить величину градиента температуры.

Ответ:  $|\nabla T| = 186,34 \text{ К/м}$ .

10.8. Определить тепловой поток, проходящий через плоскую стенку, если её толщина 8 мм, площадь поверхности  $0,6 \text{ м}^2$ , температура внутренней поверхности  $75^\circ\text{C}$ , а наружной поверхности  $65^\circ\text{C}$ , коэффициент теплопроводности материала равен  $56 \text{ Вт/(м} \cdot \text{К)}$ .

Ответ:  $W = 42\,000 \text{ Вт}$ .

10.10. Сколько необходимо сжечь угля в печи, КПД которой 70%, чтобы восполнить потерю тепла за сутки через кирпичную стену, имеющую площадь  $F = 20 \text{ м}^2$ , толщину  $\delta = 0,2 \text{ м}$ , коэффициент теплопроводности  $\lambda = 0,475 \text{ Вт}/(\text{м}\cdot\text{К})$ , если температуры внутренней и внешней стенок равны соответственно  $t_1 = 20^\circ\text{С}$ ,  $t_2 = 10^\circ\text{С}$  и являются изотермическими. Низшая удельная теплота сгорания  $H_u = 18\,000 \text{ кДж}/\text{кг}$ .

Ответ:  $G = 9,77 \text{ кг}$ .

10.11. Определить потерю тепла через кирпичную стенку длиной 5 м, высотой 3 м и толщиной 250 мм, если на поверхностях стенки поддерживается температура  $t_1 = 20^\circ\text{С}$  и  $t_2 = 30^\circ\text{С}$ . Коэффициент теплопроводности кирпича равен  $0,6 \text{ Вт}/(\text{м}\cdot\text{К})$ .

Ответ:  $W = 1\,800 \text{ Вт}$ .

10.12. Определить значение коэффициента теплопроводности материала стенки, если при её толщине, равной 30 мм и  $\Delta t = 30^\circ\text{С}$  плотность теплового потока равна  $100 \text{ Вт}/\text{м}^2$ .

Ответ:  $\lambda = 0,1 \text{ Вт}/(\text{м}\cdot\text{К})$ .

10.13. Во сколько раз уменьшится плотность теплового потока через плоскую алюминиевую стенку толщиной 15 мм после нанесения на нее теплоизоляционного покрытия из окиси циркония толщиной 0,3 мм, если температуры на поверхностях поддерживаются постоянными и равными  $400^\circ\text{С}$  и  $200^\circ\text{С}$ . Коэффициент теплопроводности окиси циркония принять равным  $1,15 \text{ Вт}/(\text{м}\cdot\text{К})$ , а алюминия  $262 \text{ Вт}/(\text{м}\cdot\text{К})$ .

Ответ: в 5,56 раза.

10.14. Определить тепловой поток, передаваемый через стенку чугунного цилиндра, внутренний диаметр которого 100 мм, длина 120 мм и толщина стенки 6 мм, если температура внутренней поверхностей равна  $150^\circ\text{С}$ , а наружной  $100^\circ\text{С}$ . Принять коэффициент теплопроводности для чугуна равным  $56 \text{ Вт}/(\text{м}\cdot\text{К})$ .

Ответ:  $W = 18,6 \text{ кВт}$ .

10.15. Определить плотность теплового потока через плоскую шамотную стенку толщиной 0,5 м и найти действительное распределение температуры, если  $t_1 = 1\,000^\circ\text{C}$ ,  $t_2 = 0^\circ\text{C}$ ,  $\lambda = 1,0 (1+0,001T)$  Вт/(м·К).

Ответ:  $q = 3\,000$  Вт/м<sup>2</sup>.

10.16. Вычислить плотность теплового потока топочной камеры котла толщиной 625 мм. Стенка состоит из трёх слоёв: одного шамотного кирпича, толщиной  $\delta_1 = 250$  мм, изоляционной прослойки из мелкого шлака толщиной  $\delta_2 = 125$  мм и одного красного кирпича толщиной  $\delta_3 = 250$  мм. Температура внутренней поверхности топочной камеры  $t'_{\text{ст}} = 1\,527^\circ\text{C}$ , а наружной  $t''_{\text{ст}} = 47^\circ\text{C}$ . Теплопроводности: шамотного кирпича  $\lambda_1 = 1,28$  Вт/(м·К), изоляционной прослойки  $\lambda_2 = 0,15$  Вт/(м·К), красного кирпича  $\lambda_3 = 0,8$  Вт/(м·К). Как изменится плотность теплового потока через стенку, если изоляционную прослойку заменить красным кирпичом? На сколько изменится плотность теплового потока в процентах без изоляционной прослойки? Определить температуру между слоями.

Ответ:  $q = 1\,103,5$  Вт/(м·К),  $\Delta q = 50,48\%$ ,  $t'_{\text{сл}} = 1\,311,5^\circ\text{C}$ ,  $t''_{\text{сл}} = 392^\circ\text{C}$ ,  $t_{\text{ксл}} = 1\,091^\circ\text{C}$ . Изоляционная прослойка снижает тепловые потери. Кроме того, если вместо неё будет красный кирпич, то он будет разрушаться, так как выдерживает температуру не более  $900^\circ\text{C}$ .

10.17. Стальная труба, отношение диаметров которой  $d_1 / d_2 = 200$  мм / 220 мм покрыта двухслойной изоляцией. Толщина первого слоя 20 мм с  $\lambda_2 = 0,2$  Вт/(м·К) и второго 80 мм с  $\lambda_3 = 0,1$  Вт/(м·К). Температура внутренней поверхности трубы  $t'_{\text{ст}} = 327^\circ\text{C}$ , а наружной  $t''_{\text{ст}} = 47^\circ\text{C}$ . Определить потери теплоты через изоляцию с 1 метра длины трубы и температуру на границе соприкосновения отдельных слоёв.

Ответ:  $q_l = 296,5$  Вт/м,  $t'_{\text{сл}} = 326,9^\circ\text{C}$ ,  $t''_{\text{сл}} = 238,25^\circ\text{C}$ .

10.18. Шаровой реактор, внутренний диаметр которого равен 1 м, имеет общую толщину стенки и слоя изоляции 65 мм с эквивалентным коэффициентом теплопроводности 1,2 Вт/(м·К). Определить плотность теплового потока, проходящего через внутреннюю и наружную стенки

реактора, если температуры внутренней и внешней поверхностей соответственно равны  $160^{\circ}\text{C}$  и  $60^{\circ}\text{C}$ .

Ответ:  $q_1 = 2\,086,1 \text{ Вт/м}^2$ ,  $q_2 = 1\,633,7 \text{ Вт/м}^2$ .

10.19. Стенка камеры сгорания реактивного двигателя с внутренним диаметром  $d_{\text{в}} = 200$  мм и наружным диаметром  $d_{\text{н}} = 206$  мм покрыта с внутренней стороны слоем тугоплавкого материала толщиной 1 мм. Коэффициенты теплопроводности стенки камеры сгорания и покрытия соответственно равны 42 и 1,4 Вт/(м·К), температуры на внутренней и наружной поверхности стенок равны 2 500 К и 500 К. Определить плотность теплового потока на единицу длины стенки и температуру поверхности стенки в зоне контакта, если термическое сопротивление контакта равно  $0,8 \cdot 10^{-3}$  К/Вт.

Ответ:  $q_l = 1\,446\,572,6 \text{ Вт/м}$ ,  $T = 846,4 \text{ К}$ .

10.20. Электрический кабель, диаметром  $d = 40$  мм зарытый в сухой грунт  $\lambda = 0,29$  Вт/(м·К) на глубину  $h = 1,5$  м, выделяет тепло  $q = 29 \text{ Вт/м}^2$ . Определить максимальную температуру на поверхности кабеля, если температура поверхности земли  $t_0 = 15^{\circ}\text{C}$ .

Ответ:  $t = 78,5^{\circ}\text{C}$ .

10.21. При работе печи с обмуровкой, выполненной из шамотного [ $\lambda_1 = 0,84 (1 + 0,695 \cdot 10^{-3}t)$  Вт/(м·К),  $\delta_1 = 0,24$  м] и красного [ $\lambda_{\text{к}} = 0,70$  Вт/(м·К)] кирпича, температуры на внутренних поверхностях слоёв составляли  $t_1$  и  $t_{\text{к}} = 850^{\circ}\text{C}$ . После замены части слоя красного кирпича (толщиной  $\delta_3$ ) промежуточной засыпкой из диатомовой крошки [ $\lambda_2 = 0,113 (1 + 0,002t)$  Вт/(м·К),  $\delta_2 = 0,092$  м] без изменения  $t_1$  и плотности теплового потока  $q$ , получено, что  $t_{\text{к}} = 430^{\circ}\text{C}$ . Определить  $t_1$ ,  $q$  и уменьшение толщины обмуровки  $\Delta\delta$ .

Ответ:  $q = -1\,176 \text{ Вт/м}^2$ ,  $t_1 = 1\,052^{\circ}\text{C}$ ,  $\Delta\delta = 0,58 \text{ м}$ .

10.22. Электрический провод с сопротивлением  $R = 10$  Ом/м заключён в цилиндрическую цементную трубу с  $\lambda = 0,159 \ln(t)$  Вт/(м·К). Внешний и внутренний радиусы трубы:  $r_1 = 10$  мм;  $r_2 = 5$  мм. По проводу течёт электрический ток  $J = 10$  А, создавая на внутренней поверх-

ности изоляции постоянную температуру в  $150^{\circ}\text{C}$ . Определить: количество теплоты, рассеиваемой с 1 м трубы; средний коэффициент теплопроводности в вычисленном интервале температур.

Ответ:  $W = 810 \text{ Вт}$ ;  $\lambda_{\text{ср}} = 0,687 \text{ Вт}/(\text{м}\cdot\text{К})$ .

10.23. Стальная пластина толщиной  $2b = 20 \text{ мм}$ , нагретая до температуры  $t_0 = 140^{\circ}\text{C}$  находится в воздушной среде с температурой  $t_{\text{ж}} = 15^{\circ}\text{C}$ . Определить температуру в центре и на поверхности пластины, а также потерю тепла (в процентном отношении) через  $\tau = 20 \text{ мин}$  после начала охлаждения. Коэффициенты теплопроводности и температуропроводности для стали равны соответственно  $\lambda = 42 \text{ Вт}/(\text{м}\cdot\text{К})$  и  $a = 1,18 \cdot 10^{-6} \text{ м}^2/\text{с}$ . Коэффициент теплоотдачи от поверхности пластины к воздуху  $\alpha = 65 \text{ Вт}/(\text{м}^2\cdot\text{К})$ .

Ответ:  $t_{\text{ц}} = 115^{\circ}\text{C}$ ;  $t_{\text{п}} = 117,5^{\circ}\text{C}$ ;  $\Delta Q = 19\%$ .

## 11. Конвективный теплообмен

11.1. Определить коэффициент теплоотдачи при течении воды в горизонтальной трубе диаметром  $d = 0,008 \text{ м}$  и длиной  $l = 6 \text{ м}$ , если скорость течения  $w = 0,1 \text{ м/с}$ , температура воды  $t_{\text{ж}} = 80^{\circ}\text{C}$ , температура стенки  $t_{\text{ст}} = 20^{\circ}\text{C}$ .

Решение: Число Рейнольдса

$$Re = \frac{wd}{\nu} = \frac{0,1 \frac{\text{м}}{\text{с}} \cdot 0,008 \text{ м}}{0,365 \cdot 10^{-6} \frac{\text{м}^2}{\text{с}}} = 2192,$$

режим течения – ламинарный.

Число Грасгофа

$$Gr = \frac{gd^3\beta\Delta T}{\nu^2} = \frac{9,81 \frac{\text{м}}{\text{с}^2} \cdot 0,008^3 \cdot 6,32 \cdot 10^{-4} \frac{1}{\text{К}} \cdot 60 \text{ К}}{\left(0,365 \cdot 10^{-6} \frac{\text{м}^2}{\text{с}}\right)^2} = 1,43 \cdot 10^6.$$

$Gr \cdot Pr > 8 \cdot 10^5$  – режим вязкостно-гравитационный.

$$\begin{aligned} Nu &= 0,15 Re^{0,33} Pr_{\text{ж}}^{0,43} Gr^{0,1} \left(\frac{Pr_{\text{ж}}}{Pr_{\text{ст}}}\right)^{0,25} = \\ &= 0,15 \cdot 2190^{0,33} \cdot 2,21^{0,43} \cdot (1,43 \cdot 10^6)^{0,1} \left(\frac{2,21}{7,02}\right)^{0,25} = 8,252. \end{aligned}$$

Коэффициент теплоотдачи

$$\alpha = Nu \frac{\lambda_{\text{ж}}}{d} = 8,252 \cdot \frac{0,675 \frac{\text{Вт}}{\text{м} \cdot \text{К}}}{0,008 \text{ м}} = 696 \frac{\text{Вт}}{\text{м}^2 \cdot \text{К}}$$

Ответ:  $\alpha = 696 \text{ Вт}/(\text{м}^2 \cdot \text{К})$ .

11.2. Определить коэффициент теплоотдачи от воздуха температурой  $t = 120^\circ\text{C}$ , движущегося со скоростью  $w = 10 \text{ м/с}$  по прямой трубе диаметром  $d = 0,1 \text{ м}$  и длиной  $l = 2 \text{ м}$ .

Решение: Число Рейнольдса

$$Re = \frac{wd}{\nu} = \frac{10 \frac{\text{м}}{\text{с}} \cdot 0,1 \text{ м}}{25,45 \cdot 10^{-6} \frac{\text{м}^2}{\text{с}}} = 39290,$$

режим течения – турбулентный.

Для воздуха

$$Nu = 0,018 Re^{0,8} = 0,018 \cdot 39290^{0,8} = 85,3.$$

Поправочный коэффициент при  $l/d = 20$  и  $Re$  равен  $\varepsilon = 1,13$ .

Коэффициент теплоотдачи

$$\alpha = Nu \frac{\lambda}{d} \varepsilon = 85,3 \cdot \frac{0,0334 \frac{\text{Вт}}{\text{м} \cdot \text{К}}}{0,1 \text{ м}} \cdot 1,13 = 32,2 \frac{\text{Вт}}{\text{м}^2 \cdot \text{К}}$$

Ответ:  $\alpha = 32,2 \text{ Вт}/(\text{м}^2 \cdot \text{К})$ .

11.3. Определить коэффициент теплоотдачи от пластины длиной  $l = 2 \text{ м}$  температурой  $T_{\text{ст}} = 353 \text{ К}$  к воздуху температурой  $T_{\text{ж}} = 293 \text{ К}$ , движущемуся со скоростью  $w = 4 \text{ м/с}$ .

Решение: Число Рейнольдса

$$Re = \frac{wl}{\nu} = \frac{4 \frac{\text{м}}{\text{с}} \cdot 2 \text{ м}}{15,06 \cdot 10^{-6} \frac{\text{м}^2}{\text{с}}} = 531\,209,$$

режим течения – турбулентный.

Для воздуха

$$Nu = 0,032 Re^{0,8} = 0,032 \cdot 531\,209^{0,8} = 1217.$$

Коэффициент теплоотдачи

$$\alpha = Nu \frac{\lambda}{l} = 1217 \cdot \frac{0,0223 \frac{\text{Вт}}{\text{м} \cdot \text{К}}}{2 \text{ м}} = 13,57 \frac{\text{Вт}}{\text{м}^2 \cdot \text{К}}$$

Ответ:  $\alpha = 13,57 \text{ Вт}/(\text{м}^2 \cdot \text{К})$ .

11.4. Определить коэффициент теплоотдачи свободной конвекцией от вертикального трубопровода высотой  $h = 6$  м температурой  $T_{ст} = 523$  К к воздуху температурой  $T_{ж} = 293$  К

Решение: Число Грасгофа

$$Gr = \frac{gh^3\beta\Delta T}{\nu^2} = \frac{9,81 \frac{\text{м}}{\text{с}^2} \cdot (6 \text{ м})^3 \cdot \frac{1}{293 \text{ К}} \cdot 230 \text{ К}}{\left(15,06 \cdot 10^{-6} \frac{\text{м}^2}{\text{с}}\right)^2} = 7,34 \cdot 10^{12}.$$

$Gr \cdot Pr = 7,34 \cdot 10^{12} \cdot 0,703 = 5,16 \cdot 10^{12}$  – режим движения турбулентный.

Для воздуха

$$Nu = 0,15 (Gr \cdot Pr)^{0,33} = 0,15 \cdot (5,16 \cdot 10^{12})^{0,33} = 2351.$$

Коэффициент теплоотдачи

$$\alpha = Nu \frac{\lambda}{h} = 2351 \cdot \frac{0,026 \frac{\text{Вт}}{\text{м} \cdot \text{К}}}{6 \text{ м}} = 10,2 \frac{\text{Вт}}{\text{м}^2 \cdot \text{К}}.$$

Ответ:  $\alpha = 10,2 \text{ Вт}/(\text{м}^2 \cdot \text{К})$ .

11.5. Вычислить коэффициент теплоотдачи при кипении воды и количество пара, получаемого в испарителе, общая поверхность которого  $F = 5 \text{ м}^2$ , а температура равна  $t_{ст} = 156^\circ\text{С}$ . Давление пара 4,5 бар.

Решение:

По справочным данным температура насыщения, при заданном давлении,  $t_{н} = 148^\circ\text{С}$ , а теплота парообразования  $r = 2\,120,9 \text{ кДж}/\text{кг}$ .

Коэффициент теплоотдачи при постоянном температурном напоре

$$\alpha = 46\Delta t^{2,33} p^{0,5} = 46 \cdot (8 \text{ К})^{2,33} \cdot (4,5 \text{ бар})^{0,5} = 12\,404 \frac{\text{Вт}}{\text{м}^2 \cdot \text{К}}.$$

Количество подводимой теплоты

$$Q = \alpha \Delta t F = 12404 \frac{\text{Вт}}{\text{м}^2 \cdot \text{К}} \cdot 8 \text{ К} \cdot 5 \text{ м}^2 = 496\,160 \text{ Вт}.$$

Производительность испарителя

$$m = \frac{Q}{r} = \frac{496\,160 \text{ Вт}}{2\,120\,900 \frac{\text{Дж}}{\text{кг}}} = 0,234 \frac{\text{кг}}{\text{с}} = 842 \frac{\text{кг}}{\text{ч}}.$$

Ответ:  $\alpha = 12\,404 \text{ Вт}/(\text{м}^2 \cdot \text{К})$ ;  $m = 842 \text{ кг}/\text{ч}$ .

11.6. По трубе диаметром  $d = 16$  мм и длиной  $l = 2,1$  м течет горячая вода, отдающая теплоту через стенку воздуху, омывающему трубу снаружи. Расход воды через трубу  $G = 0,0091$  кг/с температура воды на входе  $t_{ж1} = 90^\circ\text{C}$ , на выходе  $t_{ж2} = 30^\circ\text{C}$ , средняя температура стенки трубы  $20^\circ\text{C}$ . Вычислить значение критериев Нуссельта  $Nu$ , Рейнольдса  $Re$  и Грасгофа  $Gr$  приняв в качестве определяющей температуры среднеарифметическую температуру жидкости. Коэффициент теплоотдачи отнести к средней арифметической разности температур между водой и стенкой.

Ответ:  $Nu = 10,6$ ;  $Re = 1\,549,8$ ;  $Gr = 24\,165,4$ .

11.7. Плоская пластина толщиной  $0,5$  м и длиной  $0,5$  м обдувается воздухом со скоростью  $4$  м/с. Определить коэффициент теплоотдачи и тепловой поток, если температура стенки  $100^\circ\text{C}$ , а температура воздуха  $40^\circ\text{C}$ . При решении задачи использовать источник [3] или табл. 1 приложения.

Ответ:  $\alpha = 20,1$  Вт/(м<sup>2</sup>·К);  $W = 302$  Вт.

11.8. Гладкая плита шириной  $b = 1$  м и длиной  $l = 1,2$  м обдувается воздухом со скоростью  $w = 0,4$  м/с. Определить коэффициент теплоотдачи и тепловой поток, если температуры поверхности плиты  $t_{ст} = 60^\circ\text{C}$  и воздуха  $t_{ж} = 20^\circ\text{C}$ .

Ответ:  $\alpha = 2,77$  Вт/(м<sup>2</sup>·К);  $W = 133$  Вт.

11.9. Для условия задачи 11.8 определить средний коэффициент теплоотдачи и тепловой поток, приняв, что плита омывается водой.

Ответ:  $\alpha = 1\,849,47$  Вт/(м<sup>2</sup>·К);  $W = 88\,774,7$  Вт.

11.10. Воздушный поток движется по прямому трубопроводу со скоростью  $15$  м/с. Определить тепловой поток от воздуха к стенке, если средняя температура воздуха  $100^\circ\text{C}$ , а стенки трубопровода  $40^\circ\text{C}$ . Диаметр трубопровода  $0,08$  м, а длина его  $1$  м.

Ответ:  $W = 708$  Вт.

11.11. По трубе прямоугольного сечения  $h \times b = 200 \times 600$  мм и длиной  $3$  м движется воздух со скоростью  $12$  м/с. Средние температуры по длине трубы составляют: воздуха  $300^\circ\text{C}$ , стенки  $100^\circ\text{C}$ . Определить коэффициент теплоотдачи от воздуха к стенке трубы и тепловой поток.

Ответ:  $\alpha = 24$  Вт/(м<sup>2</sup>·К);  $W = 13\,565$  Вт.

11.12. По каналу круглого сечения диаметром 1 см, длиной 50 см, с температурой стенки, равной  $t_{ст} = 100^\circ\text{C}$  движется со средней скоростью 1 см/с воздух с температурой  $t_{ж} = 20^\circ\text{C}$ . Определить коэффициент теплоотдачи.

Ответ:  $\alpha = 0,62 \text{ Вт}/(\text{м}^2 \cdot \text{К})$ .

11.13. По каналу сечением  $5 \times 5$  см, длиной 33 см, с температурой стенки, равной  $t_{ст} = 100^\circ\text{C}$  движется со средней скоростью 50 см/с воздух с температурой  $t_{ж} = 20^\circ\text{C}$ . Определить коэффициент теплоотдачи.

Ответ:  $\alpha = 4,64 \text{ Вт}/(\text{м}^2 \cdot \text{К})$ .

11.14. По каналу сечением  $4 \times 3$  см, длиной 40 см, с температурой стенки, равной  $t_{ст} = 100^\circ\text{C}$  движется со средней скоростью 5 м/с воздух с температурой  $t_{ж} = 20^\circ\text{C}$ . Определить коэффициент теплоотдачи.

Ответ:  $\alpha = 29,4 \text{ Вт}/(\text{м}^2 \cdot \text{К})$ .

11.15. Определить коэффициент теплоотдачи и количество передаваемой теплоты при течении воды в горизонтальной трубе диаметром  $d = 10$  мм и длиной  $l = 1,2$ , если средние по длине температуры стенки трубы и воды соответственно равны  $t_{ст} = 60^\circ\text{C}$  и  $t_{ж} = 30^\circ\text{C}$ , а расход воды  $G = 7 \cdot 10^{-3}$  кг/с.

Ответ:  $\alpha = 3\,901,2 \text{ Вт}/(\text{м}^2 \cdot \text{К})$ ;  $Q = 763,9$  кДж.

11.16. Определить, во сколько раз изменится средний коэффициент теплоотдачи при свободной конвекции (ламинарный режим течения) трубопровода диаметром 0,5 м и длиной 2 м к окружающему воздуху с изменением его горизонтального расположения на вертикальное при прочих равных условиях.

Ответ: увеличится в 2,83 раза.

11.17. По медной тонкостенной трубе диаметром 20 мм и длиной 0,5 м, обдуваемой поперечным потоком воздуха с температурой  $40^\circ\text{C}$ , движется вода с температурой  $100^\circ\text{C}$ . Определить средний коэффициент теплоотдачи от трубы к воздуху, если скорость его движения  $w = 10$  м/с.

Ответ:  $\alpha = 36,9 \text{ Вт}/(\text{м} \cdot \text{К})$ .

11.18. Для условия задачи 11.16 определить средний коэффициент теплоотдачи трубы, если угол между направлением движения воздушного потока и осью трубы равен  $40^\circ$ .

Ответ:  $\alpha = 28,4 \text{ Вт}/(\text{м}^2 \cdot \text{К})$ .

11.19. Определить коэффициент теплоотдачи для шестирядного коридорного пучка труб диаметром 20 мм при движении в нем воздуха, если средняя температура воздуха  $150^\circ\text{С}$ , а средняя скорость его движения в узком сечении 15 м/с.

Ответ:  $\alpha = 129,9 \text{ Вт}/(\text{м}^2 \cdot \text{К})$ .

11.20. Определить коэффициент теплоотдачи для десятирядного шахматного пучка труб диаметром 25 мм при течении в нем воздуха, если средняя температура последнего  $200^\circ\text{С}$ , а средняя скорость движения в узком сечении 10 м/с.

Ответ:  $\alpha = 105,3 \text{ Вт}/(\text{м}^2 \cdot \text{К})$ .

11.21. Определить коэффициенты теплоотдачи и температурные напоры при пузырьковом кипении воды для давлений  $p_1 = 12$  бар и  $p_2 = 120$  бар при постоянной плотности теплового потока  $q = 1,8 \text{ МВт}/\text{м}^2$ .

Ответ:  $\alpha_1 = 106\,463 \text{ Вт}/(\text{м}^2 \cdot \text{К})$ ;  $\alpha_2 = 1\,227\,235 \text{ Вт}/(\text{м}^2 \cdot \text{К})$ .

11.22. Определить наибольшую плотность теплового потока, проходящего через поверхность нагрева при пузырьковом режиме кипения воды в условиях большого объема при температуре  $180^\circ\text{С}$ .

Ответ:  $q_{\text{кр}} = 47\,174,7 \text{ Вт}/\text{м}^2$ .

11.23. Определить коэффициент теплоотдачи, тепловой поток и количество выпадающего конденсата на поверхности горизонтальной трубы длиной 1,6 м, диаметром 22 мм. Температура поверхности  $30^\circ\text{С}$ , температура насыщения  $50^\circ\text{С}$ .

Ответ:  $\alpha = 8\,603 \text{ Вт}/(\text{м}^2 \cdot \text{К})$ ;  $W = 19\,017,4 \text{ Вт}$ ;  $G = 28,74 \text{ кг}/\text{ч}$ .

## 12. Тепловое излучение

12.1. Определить теплообмен излучением между двумя параллельными поверхностями с температурами  $T_1 = 800$  К и  $T_2 = 400$  К и коэффициентами излучения  $c_1 = 5,1$  Вт/(м<sup>2</sup>·К<sup>4</sup>) и  $c_2 = 4,2$  Вт/(м<sup>2</sup>·К<sup>4</sup>).

Решение: Эквивалентный коэффициент излучения

$$\begin{aligned} c_3 &= \frac{1}{\frac{1}{c_1} + \frac{1}{c_2} - \frac{1}{c_s}} = \\ &= \frac{1}{\frac{1}{5,1 \frac{\text{Вт}}{\text{м}^2 \cdot \text{К}^4}} + \frac{1}{4,2 \frac{\text{Вт}}{\text{м}^2 \cdot \text{К}^4}} - \frac{1}{5,67 \frac{\text{Вт}}{\text{м}^2 \cdot \text{К}^4}}} = 3,879 \frac{\text{Вт}}{\text{м}^2 \cdot \text{К}^4}. \end{aligned}$$

Плотность теплового потока, передаваемого излучением

$$\begin{aligned} q &= c_3 \left[ \left( \frac{T_1}{100} \right)^4 - \left( \frac{T_2}{100} \right)^4 \right] = \\ &= 3,879 \frac{\text{Вт}}{\text{м}^2 \cdot \text{К}^4} \left[ \left( \frac{800 \text{ К}}{100} \right)^4 - \left( \frac{400 \text{ К}}{100} \right)^4 \right] = 14\,895 \frac{\text{Вт}}{\text{м}^2}. \end{aligned}$$

Ответ:  $q = 14\,895$  Вт/м<sup>2</sup>.

12.2. Определить величину теплообмена излучением между стальным подогревателем длиной  $l = 2$  м, диаметром  $d = 1$  м, температурой поверхности  $T_1 = 430$  К, с окисленной поверхностью с  $c_1 = 5,2$  Вт/(м<sup>2</sup>·К<sup>4</sup>), и стенами помещения длиной 10 м, шириной 8 м, высотой 4 м,  $c_2 = 3,5$  Вт/(м<sup>2</sup>·К<sup>4</sup>). Температура в помещении  $T_2 = 300$  К.

Решение: Отношение площадей поверхностей

$$\begin{aligned} \varphi &= \frac{F_1}{F_2} = \frac{2\pi \frac{d^2}{4} + \pi dl}{2wh + 2l_1h + 2l_1w} = \\ &= \frac{2\pi \frac{(1 \text{ м})^2}{4} + \pi \cdot 1 \text{ м} \cdot 2 \text{ м}}{2 \cdot 10 \text{ м} \cdot 4 \text{ м} + 2 \cdot 8 \text{ м} \cdot 4 \text{ м} + 2 \cdot 8 \text{ м} \cdot 10 \text{ м}} = 0,026. \end{aligned}$$

Эквивалентный коэффициент излучения

$$c = \frac{1}{\frac{1}{c_1} + \varphi \left( \frac{1}{c_2} - \frac{1}{c_s} \right)} =$$

$$= \frac{1}{\frac{1}{5,2 \frac{\text{Вт}}{\text{м}^2 \cdot \text{К}^4}} + 0,026 \left( \frac{1}{3,5 \frac{\text{Вт}}{\text{м}^2 \cdot \text{К}^4}} - \frac{1}{5,67 \frac{\text{Вт}}{\text{м}^2 \cdot \text{К}^4}} \right)} = 5,124 \frac{\text{Вт}}{\text{м}^2 \cdot \text{К}^4}$$

Плотность теплового потока

$$q = c \left[ \left( \frac{T_1}{100} \right)^4 - \left( \frac{T_2}{100} \right)^4 \right] =$$

$$= 5,124 \frac{\text{Вт}}{\text{м}^2 \cdot \text{К}^4} \left[ \left( \frac{430 \text{ К}}{100} \right)^4 - \left( \frac{300 \text{ К}}{100} \right)^4 \right] = 1\,337 \frac{\text{Вт}}{\text{м}^2}.$$

Ответ:  $q = 1\,337 \text{ Вт/м}^2$ .

12.3. Определить температуру дымовых газов при выходе из топочной камеры если расход топлива  $G_T = 2000 \text{ кг/ч}$ , количество продуктов сгорания на 1 кг сжигаемого топлива  $V_T = 6 \text{ м}^3/\text{кг}$ , температура сгорания топлива  $T_T = 2000 \text{ К}$ , теплоёмкость продуктов сгорания  $c'_p = 1740 \text{ Дж}/(\text{м}^3 \cdot \text{К})$ , поверхность котла  $F = 10 \text{ м}^2$ .

Решение: Топочный критерий

$$K_T = \frac{3600 \cdot c_s \cdot 10^{-8} F T_T^3}{G_T V_T c'_p} =$$

$$= \frac{3600 \cdot 5,67 \frac{\text{Вт}}{\text{м}^2 \cdot \text{К}^4} \cdot 10^{-8} \cdot 10 \text{ м}^2 \cdot (2000 \text{ К})^3}{2000 \frac{\text{кг}}{\text{ч}} \cdot 6 \frac{\text{м}^3}{\text{кг}} \cdot 1740 \frac{\text{Дж}}{\text{м}^3 \cdot \text{К}}} = 0,782.$$

Относительная температура дымовых газов может быть найдена из решения уравнения

$$\varepsilon K_T \theta^4 + \theta - 1 = 0,$$

где  $\varepsilon = 0,85$  – условный коэффициент излучения топки.

В результате получим  $\theta = T/T_T = 0,769$ , откуда  $T = 1538 \text{ К}$ .

Ответ:  $T = 1538 \text{ К}$ .

12.4. Стальная заготовка с начальной температурой  $27^\circ\text{С}$  помещена в печь, температура стенок которой  $927^\circ\text{С}$ . Определить величину

плотности теплового потока, воспринимаемого заготовкой в начальный период времени за счет лучистой энергии, если отношение площадей поверхностей заготовки и печи равно  $1/30$ , степени черноты заготовки и стенок печи соответственно равны  $0,7$  и  $0,85$ .

Ответ:  $q = 81\,628 \text{ Вт/м}^2$ .

12.5. Какой будет плотность теплового потока, если в условии задачи 12.4 принять отношение площадей поверхностей заготовки и печи равным нулю?

Ответ:  $q = 81\,979 \text{ Вт/м}^2$ .

12.6. В сосуд Дьюара налита жидкость с температурой  $87^\circ\text{C}$ . Степень черноты посеребренных стенок сосуда равна  $0,02$ . Температура внешней стенки сосуда и окружающей среды равны  $17^\circ\text{C}$ , а температура внутренней стенки равна температуре жидкости. Определить толщину изоляционного слоя, состоящего из шерстяного войлока с коэффициентом теплопроводности  $0,048 \text{ Вт/(м}\cdot\text{K)}$ , которым можно заменить посеребренные стенки при условии неизменности теплоизоляционных свойств сосуда.

Ответ:  $\delta = 0,603 \text{ м}$ .

12.7. Определить потери тепловой энергии за счет лучеиспускания паропроводом без тепловой изоляции, проходящим внутри помещения. Наружный диаметр паропровода  $150 \text{ мм}$ , длина  $100 \text{ м}$ , температура наружной поверхности  $127^\circ\text{C}$ , температура воздуха в помещении  $27^\circ\text{C}$ . Степень черноты материала трубы равна  $0,8$ .

Ответ:  $W = 37,39 \text{ Вт}$ .

12.8. Для условий задачи 12.7 определить суммарный коэффициент лучистой конвективной теплоотдачи.

Ответ:  $\alpha_\Sigma = 14,22 \text{ Вт/(м}^2\cdot\text{K)}$ .

12.9. Определить количество экранов, позволяющих уменьшить лучистый теплообмен между двумя плоскими параллельными пластинами в  $10$  раз, если степени черноты поверхностей пластин и экранов равны соответственно  $0,8$  и  $0,4$ .

Ответ:  $n = 4$ .

12.10. Определить количество экранов, позволяющих уменьшить лучистый теплообмен между двумя плоскими параллельными пластинами в 10 раз, считая, что степень черноты поверхностей пластин и экранов одинакова.

Ответ:  $n = 9$ .

### 13. Теплопередача. Теплообменные аппараты

13.1. В прямоточном теплообменном аппарате требуется охладить  $V_1 = 0,25 \text{ м}^3/\text{ч}$  горячего теплоносителя плотностью  $\rho_1 = 1100 \text{ кг}/\text{м}^3$  и теплоёмкостью  $c_{p1} = 3046 \text{ Дж}/(\text{кг}\cdot\text{К})$ . Начальная температура жидкости  $t'_1 = 120^\circ\text{C}$ . Для охлаждения используется  $V_2 = 1 \text{ м}^3/\text{ч}$  воды при температуре  $t'_2 = 10^\circ\text{C}$ . Площадь поверхности теплообмена  $F = 8 \text{ м}^2$ , а коэффициент теплопередачи  $k = 35 \text{ Вт}/(\text{м}^2\cdot\text{К})$ . Определить конечные температуры теплоносителей.

Решение: Условные эквиваленты равны

$$W_1 = \frac{V_1}{3600} \rho_1 c_{p1} = \frac{0,25 \frac{\text{м}^3}{\text{ч}}}{3600} \cdot 1100 \frac{\text{кг}}{\text{м}^3} \cdot 3046 \frac{\text{Дж}}{\text{кг}\cdot\text{К}} = 233 \frac{\text{Вт}}{\text{К}},$$

$$W_2 = \frac{V_2}{3600} \rho_2 c_{p2} = \frac{1 \frac{\text{м}^3}{\text{ч}}}{3600} \cdot 1000 \frac{\text{кг}}{\text{м}^3} \cdot 4190 \frac{\text{Дж}}{\text{кг}\cdot\text{К}} = 1164 \frac{\text{Вт}}{\text{К}}.$$

Вычисляем промежуточный коэффициент

$$\psi = \frac{1 - e^{-\left(1 + \frac{W_1}{W_2}\right) \frac{kF}{W_1}}}{1 + \frac{W_1}{W_2}} = \frac{1 - e^{-\left(1 + \frac{233 \frac{\text{Вт}}{\text{К}}}{1164 \frac{\text{Вт}}{\text{К}}}\right) \frac{35 \frac{\text{Вт}}{\text{м}^2\cdot\text{К}} \cdot 8 \text{ м}^2}{233 \frac{\text{Вт}}{\text{К}}}}}{1 + \frac{233 \frac{\text{Вт}}{\text{К}}}{1164 \frac{\text{Вт}}{\text{К}}}} = 0,636.$$

Температура горячего теплоносителя на выходе составит  $t''_1 = t'_1 - \psi(t'_1 - t'_2) = 120^\circ\text{C} - 0,636 \cdot (120^\circ\text{C} - 10^\circ\text{C}) = 50^\circ\text{C}$ .

Тепловой поток от горячего теплоносителя составит

$$\Omega = W_1(t'_1 - t''_1) = 233 \frac{\text{Вт}}{\text{К}} \cdot (120^\circ\text{C} - 50^\circ\text{C}) = 16\,310 \text{ Вт}.$$

Конечная температура холодного теплоносителя

$$t''_2 = t'_2 + \frac{\Omega}{W_2} = 10^\circ\text{C} + \frac{16\,310 \text{ Вт}}{1164 \frac{\text{Вт}}{\text{К}}} = 24^\circ\text{C}.$$

Ответ:  $t''_1 = 50^\circ\text{C}$ ;  $t''_2 = 24^\circ\text{C}$ .

13.2. Определить плотность теплового потока, передаваемого через чугунную гладкую и оперённую стенки. Коэффициент оребрения стенки равен 10. Толщина стенки 12 мм. Коэффициенты теплоотдачи от рабочего тела к стенке и от стенки к окружающему воздуху соответственно равны  $300 \text{ Вт}/(\text{м}^2 \cdot \text{К})$  и  $12 \text{ Вт}/(\text{м}^2 \cdot \text{К})$ . Температуры рабочего тела и воздуха соответственно равны  $150^\circ\text{C}$  и  $40^\circ\text{C}$ . Коэффициент теплопроводности чугуна  $57 \text{ Вт}/(\text{м} \cdot \text{К})$ .

Ответ:  $q = 1\,266 \text{ Вт}/\text{м}^2$ ;  $q_p = 9\,261 \text{ Вт}/\text{м}^2$ .

13.3. Для условий задачи 13.2 определить величину коэффициента оребрения ребристой стенки, обеспечивающего увеличение коэффициента теплопередачи в 1,3 раза.

Ответ:  $k_p = 15$ .

13.4. Масляно-воздушный теплообменник рассеивает  $120 \text{ Вт}$  теплоты в окружающую среду. Определить необходимое количество алюминиевых труб внутренним диаметром  $10 \text{ мм}$  и длиной  $0,5 \text{ м}$ , если коэффициент теплоотдачи от масла к стенке  $350 \text{ Вт}/(\text{м}^2 \cdot \text{К})$ , толщина стенки труб  $2 \text{ мм}$ , коэффициент теплоотдачи от стенки к воздуху  $150 \text{ Вт}/(\text{м}^2 \cdot \text{К})$ , средняя температура масла  $85^\circ\text{C}$ , а воздуха  $30^\circ\text{C}$ . Коэффициент теплопроводности алюминия принять равным  $204 \text{ Вт}/(\text{м} \cdot \text{К})$ .

Ответ:  $n = 76$ .

13.5. В масляно-воздушном теплообменнике температура масла изменяется от  $60^\circ\text{C}$  до  $52^\circ\text{C}$ , а воздуха от  $20^\circ\text{C}$  до  $28^\circ\text{C}$ . Определить среднелогарифмический температурный напор при: а) прямотоке, б) противотоке, в) однократном перекрестном токе без перемешивания одного из теплоносителей, г) однократном перекрестном токе с перемешиванием обоих теплоносителей.

Ответ: а)  $\Delta t = 31,3^\circ\text{C}$ ; б)  $\Delta t = 32^\circ\text{C}$ ; в)  $\Delta t = 25,6^\circ\text{C}$ ; г)  $\Delta t = 32^\circ\text{C}$ .

13.6. В противоточном водяном теплообменнике типа «труба в трубе» определить площадь поверхности нагрева, если горячая вода поступает с температурой  $95^\circ\text{C}$  и ее расход равен  $12 \text{ кг}/\text{с}$ . Горячая вода движется по внутренней стальной трубе с внутренним диаметром  $37 \text{ мм}$  и внешним диаметром  $40 \text{ мм}$ . Нагреваемая вода движется по кольцевому каналу между трубами и нагревается от  $20^\circ\text{C}$  до  $45^\circ\text{C}$ .

Внутренний диаметр внешней трубы 54 мм. Расход нагреваемой воды составляет 1,3 кг/с. Теплообменом с окружающей средой пренебречь.

Ответ:  $F = 3,04 \text{ м}^2$ .

13.7. В теплообменнике необходимо охладить воздух при его расходе 300 кг/ч. Начальная температура воздуха 110°C. Для охлаждения применяют воду, расход которой составляет 0,74 м<sup>3</sup>/ч при температуре 60°C. Коэффициент теплопередачи охладителя  $k = 100 \text{ Вт}/(\text{м}^2 \cdot \text{К})$ , а его поверхность 0,67 м<sup>2</sup>. Определить конечные температуры теплоносителей и тепловую нагрузку охладителя при: а) прямотоке, б) противотоке.

Ответ: а)  $t_1 = 83^\circ\text{C}$ ;  $t_2 = 62,7^\circ\text{C}$ ;  $Q = 2,268 \text{ кВт}$ ; б)  $t_1 = 78,5^\circ\text{C}$ ,  $t_2 = 91,5^\circ\text{C}$ ;  $Q = 26,6 \text{ кВт}$ .

13.8. Водовоздушный радиатор, состоящий из прямоугольных оребренных трубок с внутренним сечением 15,4×6,4 мм, отводит 35 кДж теплоты в секунду. Определить необходимое количество трубок при их длине 0,65 м, если коэффициент оребрения равен 2,18, коэффициент теплоотдачи от воды к стенке 2 330 Вт/(м<sup>2</sup>·К), толщина стенок 0,3 мм, коэффициент теплоотдачи от стенки к воздуху 186 Вт/(м<sup>2</sup>·К), средние температуры воды 360 К, воздуха 310 К. Материал стенки – медь,  $\lambda = 384 \text{ Вт}/(\text{м} \cdot \text{К})$ .

Ответ:  $n = 100$ .

13.9. Определить коэффициенты теплоотдачи в противоточном теплообменнике тепловой мощностью 100 кВт, с площадью теплопередающей поверхности 9 м<sup>2</sup> при среднелогарифмическом температурном напоре 5°C, если толщина стальной стенки равна 5 мм, скорость движения холодной воды 2,2 м/с, а горячей 1,8 м/с. Режим движения горячей и холодной воды считать турбулентным. Эквивалентные диаметры проходных сечений принять одинаковыми. Для стали коэффициент теплопроводности принять 16 Вт/(м·К).

Ответ:  $\alpha_1 = 15\,807 \text{ Вт}/(\text{м}^2 \cdot \text{К})$ ;  $\alpha_2 = 13\,462,6 \text{ Вт}/(\text{м}^2 \cdot \text{К})$ .

13.10. Определить, во сколько раз изменится коэффициент теплопередачи в теплообменнике, у которого медные трубки заменены алюминиевыми, при коэффициентах теплоотдачи  $\alpha_1 = 3\,500 \text{ Вт}/(\text{м}^2 \cdot \text{К})$  и

$\alpha_2 = 150 \text{ Вт}/(\text{м}^2 \cdot \text{К})$ . Толщина металлической стенки 1 мм, а коэффициенты теплопроводности меди и алюминия равны соответственно  $\lambda_{\text{м}} = 384 \text{ Вт}/(\text{м} \cdot \text{К})$ ,  $\lambda_{\text{а}} = 204 \text{ Вт}/(\text{м} \cdot \text{К})$ .

Ответ: уменьшится на 0,1%.

13.11. Тепловая нагрузка водовоздушного автомобильного радиатора составляет 50 кВт. Определить секундный расход воздуха, подаваемого вентилятором двигателя, если коэффициент теплопередачи теплообменника равен  $350 \text{ Вт}/(\text{м}^2 \cdot \text{К})$ , площадь поверхности охлаждения составляет  $3 \text{ м}^2$ , температура воды на входе в радиатор и на выходе из него равна соответственно  $95^\circ\text{С}$  и  $90^\circ\text{С}$ , температура воздуха на входе в радиатор  $40^\circ\text{С}$ . Примечание: при определении температурного напора использовать среднеарифметическую разность температур теплоносителей. Значение  $c_p = 1,005 \text{ кДж}/(\text{кг} \cdot \text{К})$ .

Ответ:  $G = 5,1 \text{ кг}/\text{ч}$ .

13.12. Определить дополнительную тепловую нагрузку водяного радиатора дизеля при охлаждении водой выпускного коллектора (теплообменника типа «труба в трубе»). Производительность циркуляционного насоса равна 350 л/мин, среднюю температуру воды принять равной  $90^\circ\text{С}$  при ее нагреве на  $1^\circ\text{С}$ .

Ответ:  $W = 23,7 \text{ кВт}$ .

## ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Приведенные в сборнике задачи охватывают большинство разделов дисциплин «Термодинамика» и «Тепломассообмен». Примеры решения задач позволяют студентам проверить правильность собственных рассуждений во время самостоятельной работы, а также показывают один из наиболее оптимальных путей решения, выбор которого может оказаться важен в практической деятельности.

Самостоятельная работа над изучаемым материалом, в частности самостоятельное решение задач, должна заложить прочный фундамент профессиональных знаний будущих инженеров в области теплотехники, теплоэнергетики и энергомашиностроения.

## РЕКОМЕНДАТЕЛЬНЫЙ БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Техническая термодинамика: Учеб. для машиностроит. спец. вузов / В.И. Крутов, С.И. Исаев, И.А. Кожин и др; Под ред. В.И. Крутова. 3-е изд., перераб. и доп. - М., Высш. шк., 1991. - 384 с.
2. Теплотехника: Учеб. для вузов. В.Н. Луканин, М.Г. Шатров, Г.М. Камфер и др.; Под ред. В.Н. Луканина.- 3 –е изд., испр. –М.: Высш. шк., 2002. - 671 с.: ил.
3. Нащокин В.В. Техническая термодинамика и теплопередача: Учеб. пособие для вузов. - М.: Высш. шк., 1980. - 496 с.
4. Задачник по технической термодинамике и теории тепломассообмена: Учеб. пособие для энергомашиностроит. спец. вузов / В.Н. Афанасьев, С.И. Исаев, И.А. Кожин и др.; Под. ред. В.И. Кругова и Г.Б. Петражицкого. - М.: Высш. шк., 1986. - 383 с.
5. Теория тепломассообмена: Учеб. для энергомашиностроит. спец. вузов / С.И. Исаев, И.А. Кожин, В.И. Кофанов и др.; Под. ред. А.И. Леонтьева. - М.: Высш. шк., 1979. - 495 с.
6. Теплотехника: учебно-методическое пособие по решению задач / сост.: А.С. Ненишев, А.Л. Иванов. – Омск: СибАДИ, 2009. – 22 с.

## ПРИЛОЖЕНИЕ

Таблица 1

### *Единицы давления*

	Пас- каль (Па)	Бар (бар)	Техниче- ская атмо- сфера (ат)	Физиче- ская атмо- сфера (атм)	Милли- метр ртут- ного столба (мм.рт. ст.)	Милли- метр во- дяного столба (мм. вод. ст.)	Фунт-сила на квад- ратный дюйм ( <i>psi</i> )
1 Па	1	$10^{-5}$	$1,0197 \cdot 10^{-5}$	$9,8692 \cdot 10^{-6}$	$7,5006 \cdot 10^{-3}$	0,101972	$1,4504 \cdot 10^{-4}$
1 бар	$10^5$	1	1,01972	0,98692	750,06	10197,2	14,504
1 ат	98066	0,980665	1	0,96784	735,56	$10^4$	14,223
1 атм	101325	1,01325	1,03323	1	760	10332,3	14,696
1 мм.рт.ст.	133,32	$1,3332 \cdot 10^{-3}$	$1,3595 \cdot 10^{-3}$	$1,3158 \cdot 10^{-3}$	1	13,595	0,019337
1 мм.вод.ст.	9,8065	$9,806 \cdot 10^{-5}$	$10^{-4}$	$9,6784 \cdot 10^{-5}$	0,073556	1	$1,4223 \cdot 10^{-3}$
1 psi	6894,7	0,068948	0,070307	0,068046	51,715	703,07	1

Таблица 2

## Теплоёмкость воздуха

Тем- пера- тура, °С	Мольная теплоёмкость, Дж/(кмоль·К)				Массовая теплоём- кость, кДж/(кг·К)		Объёмная теплоём- кость, кДж/(м <sup>3</sup> ·К)	
	$\mu_{c_p}$	$\mu_{c_v}$	$\mu_{c_{pm}}$	$\mu_{c_{vm}}$	$c_{pm}$	$c_{vm}$	$c'_{pm}$	$c'_{vm}$
0	29,073	20,758	29,073	20,758	1,0036	0,7164	1,2971	0,9261
100	29,266	20,951	29,151	20,838	1,0061	0,7193	1,3004	0,9295
200	29,676	21,361	29,299	20,984	1,0115	0,7243	1,0710	0,9362
300	30,266	21,951	29,521	21,206	1,0191	0,7319	1,3172	0,9462
400	30,949	22,634	29,789	21,474	1,0283	0,7415	1,3289	0,9579
500	31,640	23,325	30,095	21,780	1,0387	0,7519	1,3427	0,9718
600	32,301	23,986	30,405	22,090	1,0496	0,7624	1,3565	0,9856
700	32,900	24,585	30,723	22,408	1,0605	0,7733	1,3708	0,9998
800	33,432	25,117	31,028	22,713	1,0710	0,7842	1,3842	1,0312
900	33,905	25,590	31,321	23,006	1,0815	0,7942	1,3976	1,0262
1000	34,315	26,000	31,598	23,283	1,0907	0,8039	1,4097	1,0387
1100	34,679	26,394	31,962	23,547	1,0999	0,8127	1,4214	1,0505
1200	35,002	26,687	32,109	23,794	1,1082	0,8215	1,4327	1,0618
1300	35,291	26,976	32,343	24,028	1,1166	0,8294	1,4432	1,0722
1400	35,546	27,231	32,565	24,250	1,1242	0,8369	1,4528	1,0819
1500	35,772	27,457	32,774	24,459	1,1313	0,8441	1,4620	1,0911
1600	35,977	27,662	32,967	24,652	1,1380	0,8508	1,4708	1,0999
1700	36,170	27,855	33,151	24,836	1,1443	0,8570	1,4788	1,1078
1800	36,346	28,031	33,319	25,004	1,1501	0,8633	1,4867	1,1158
1900	36,509	28,194	33,482	25,167	1,1560	0,8688	1,4939	1,1229
2000	36,655	28,340	33,641	25,326	1,1610	0,8742	1,5010	1,1296
2100	36,798	28,483	33,787	25,472	1,1664	0,8792	1,5072	1,1363
2200	36,928	28,613	33,926	25,611	1,1710	0,8843	1,5135	1,1426
2300	37,053	28,738	34,060	25,745	1,1757	0,8889	1,5194	1,1484
2400	37,170	28,855	34,185	25,870	1,1803	0,8930	1,5253	1,1543
2500	37,279	28,964	34,307	25,992	1,1840	0,8972	1,5303	1,1593

Таблица 3

## Теплоёмкость водяного пара

Температура, °С	Мольная теплоёмкость, Дж/(кмоль·К)				Массовая теплоёмкость, кДж/(кг·К)		Объёмная теплоёмкость, кДж/(м <sup>3</sup> ·К)	
	$\mu c_p$	$\mu c_v$	$\mu c_{pm}$	$\mu c_{vm}$	$c_{pm}$	$c_{vm}$	$c'_{pm}$	$c'_{vm}$
0	33,499	25,184	33,499	25,184	1,8594	1,3980	1,4943	1,1237
100	34,055	25,740	33,741	25,426	1,8728	1,4114	1,5052	1,1342
200	34,964	26,649	34,118	25,803	1,8937	1,4323	1,5223	1,1514
300	36,036	27,721	34,575	26,260	1,9192	1,4574	1,5424	1,1715
400	37,191	28,876	35,090	26,775	1,9477	1,4863	1,5654	1,1945
500	38,406	30,091	35,630	27,315	1,9778	1,5160	1,5897	1,2188
600	39,662	31,347	36,195	27,880	2,0092	1,5474	1,6148	1,2439
700	40,951	32,636	36,789	28,474	2,0419	1,5805	1,6412	1,2703
800	42,249	33,934	37,392	29,077	2,0754	1,6140	1,6680	1,2971
900	43,513	35,198	38,008	29,693	2,1097	1,6483	1,6957	1,3247
1000	44,723	36,408	38,619	30,304	2,1436	1,6823	1,7229	1,3519
1100	45,858	37,543	39,226	30,911	2,1771	1,7158	1,7501	1,3791
1200	46,913	38,598	39,825	31,510	2,2106	1,7488	1,7769	1,4059
1300	47,897	39,582	40,407	32,092	2,2429	1,7815	1,8028	1,4319
1400	48,801	40,486	40,976	32,661	2,2743	1,8129	1,8280	1,4570
1500	49,639	41,324	41,525	33,210	2,3048	1,8434	1,8527	1,4817
1600	50,409	42,094	42,056	33,741	2,3346	1,8728	1,8761	1,5052
1700	51,133	42,818	42,576	34,261	2,3630	1,9016	1,8996	1,5286
1800	51,782	43,467	43,070	34,755	4,3907	1,9293	1,9213	1,5504
1900	52,377	44,062	43,539	35,224	2,4166	1,9552	1,9423	1,5713
2000	52,930	44,615	43,995	35,680	2,4422	1,9804	1,9628	1,5918
2100	53,449	45,134	44,435	36,120	2,4664	2,0051	1,9824	1,6115
2200	53,930	45,615	44,853	36,538	2,4895	2,0281	2,0009	1,6299
2300	54,370	46,055	45,255	36,940	2,5121	2,0503	2,0189	1,6479
2400	54,780	46,465	45,644	37,330	2,5334	2,0720	2,0365	1,6655
2500	55,161	46,846	46,017	37,702	2,5544	2,0926	2,0528	1,6815
2600	55,525	47,210	46,381	38,066	2,5745	2,1131	2,0691	1,6982
2700	55,864	47,549	47,729	38,414	2,5937	2,1323	2,0864	1,7137
2800	56,187	47,872	47,060	38,745	2,6121	2,1508	2,0997	1,7287
2900	56,488	48,173	47,378	39,063	2,6297	2,1683	2,1135	1,7425

Таблица 4

## Теплоёмкость азота

Тем- пера- тура, °С	Мольная теплоёмкость, Дж/(кмоль·К)				Массовая теплоём- кость, кДж/(кг·К)		Объёмная теплоём- кость, кДж/(м <sup>3</sup> ·К)	
	$\mu c_p$	$\mu c_v$	$\mu c_{pm}$	$\mu c_{vm}$	$c_{pm}$	$c_{vm}$	$c'_{pm}$	$c'_{vm}$
0	29,115	20,800	29,115	20,800	1,0392	0,7423	1,2987	0,9278
100	29,199	20,884	29,144	20,829	1,0404	0,7427	1,3004	0,9295
200	29,471	21,156	29,228	20,913	1,0434	0,7465	1,3038	0,9328
300	29,952	21,637	29,383	21,068	1,0488	0,7519	1,3109	0,9399
400	30,576	22,261	29,601	21,286	1,0567	0,7599	1,3205	0,9496
500	31,250	22,935	29,864	21,549	1,0660	0,7691	1,3322	0,9613
600	31,920	23,605	30,149	21,834	1,0760	0,7792	1,3452	0,9743
700	32,540	24,225	30,451	22,136	1,0869	0,7900	1,3586	0,9877
800	33,101	24,786	30,748	22,433	1,0974	0,8005	1,3716	1,0006
900	33,599	25,284	31,037	22,722	1,1078	0,8110	1,3845	1,0136
1 000	34,039	25,724	31,313	22,998	1,1179	0,8210	1,3971	1,0178
1 100	34,424	26,109	31,577	23,262	1,1271	0,8302	1,4089	1,0279
1 200	34,773	26,448	31,828	23,513	1,1359	0,8395	1,4202	1,0492
1 300	35,070	26,745	32,067	23,752	1,1447	0,8478	1,4306	1,0597
1 400	35,330	27,005	32,293	23,978	1,1526	0,8558	1,4407	1,0697
1 500	35,556	27,231	32,502	24,187	1,1602	0,8633	1,4499	1,0789
1 600	35,757	27,432	32,699	24,384	1,1673	0,8704	1,4587	1,0877
1 700	35,937	27,612	32,883	24,568	1,1736	0,8771	1,4671	1,0961
1 800	36,100	27,775	33,055	24,740	1,1798	0,8830	1,4746	1,1036
1 900	36,247	27,922	33,218	24,903	1,1857	0,8889	1,4821	1,1112
2 000	36,377	28,052	33,373	25,058	1,1911	0,8943	1,4888	1,1179
2 100	36,494	28,169	33,520	25,205	1,1966	0,8997	1,4955	1,1246
2 200	36,603	28,278	33,658	25,343	1,2012	0,9048	1,5018	1,1304
2 300	36,703	28,378	33,787	25,472	1,2058	0,9094	1,5072	1,1363
2 400	36,795	28,470	33,909	25,594	1,2104	0,9136	1,5127	1,1417
2 500	36,879	28,554	34,022	25,707	1,2142	0,9177	1,5177	1,1468

Таблица 5

## Свойства воды и сухого пара

$p$ , бар	$t_{II}$ , °C	$v''$ , м <sup>3</sup> /кг	$\rho$ , кг/м <sup>3</sup>	$h'$ , кДж/кг	$h''$ , кДж/кг	$s'$ , кДж/(кг·К)	$s''$ , кДж/(кг·К)		
0,04	29,95	0,0010042	34,930	0,02863	121,33	2 553,7	2 432,3	0,4225	8,4737
0,05	32,89	0,0010054	28,240	0,03541	137,79	2 560,9	2 423,1	0,4764	8,3943
0,06	36,17	0,0010056	23,770	0,04208	151,49	2 567,1	2 415,6	0,5209	8,3297
0,08	42,53	0,0010085	18,130	0,05516	173,89	2 576,4	2 402,5	0,5919	8,2263
0,10	45,82	0,0010102	14,700	0,06805	191,84	2 583,9	2 392,1	0,6496	8,1494
0,14	52,57	0,0010132	10,690	0,09353	220,05	2 596,1	2 376,0	0,7368	8,0305
0,18	57,82	0,0010159	8,4480	0,1184	242,03	2 605,4	2 363,3	0,8040	7,9445
0,20	60,08	0,0010171	7,6520	0,1307	251,48	2 609,2	2 357,7	0,8324	7,9075
0,30	69,12	0,0010223	5,2320	0,1911	289,30	2 624,6	2 335,3	0,9441	7,7673
0,40	75,87	0,0010264	3,9990	0,2501	317,62	2 636,3	2 318,7	1,0261	7,6710
0,60	85,94	0,0010330	2,7340	0,3658	359,90	2 653,1	2 293,2	1,1453	7,5313
0,80	93,50	0,0010385	2,0890	0,4787	391,75	2 665,3	2 273,5	1,2331	7,4342
1,00	99,62	0,0010432	1,6960	0,5896	417,47	2 674,9	2 257,5	1,3026	7,3579
1,20	104,80	0,0010472	1,4300	0,6992	439,34	2 683,0	2 243,6	1,3610	7,2972
1,60	113,31	0,0010543	1,0920	0,916	475,41	2 696,3	2 220,8	1,4550	7,2017
2,00	120,23	0,0010606	0,8860	1,129	501,74	2 706,8	2 202,0	1,5306	7,1279
3,00	133,54	0,0010733	0,6055	1,652	561,70	2 725,5	2 163,9	1,6716	6,9922
4,00	143,62	0,0010836	0,4623	2,163	604,30	2 738,7	2 134,1	1,7766	6,8969
6,00	158,84	0,0011009	0,31560	3,169	670,6	2 756,9	2 086,3	1,9311	6,7609
8,00	170,41	0,0011149	0,24030	4,161	720,9	2 769,0	2 048,1	2,0461	6,6630
10,00	179,88	0,0011273	0,22450	5,143	762,4	2 777,8	2 015,3	2,1383	6,5867
12,00	187,95	0,0011385	0,16330	6,125	793,4	2 764,6	1 986,2	2,2156	6,5224
14,00	195,04	0,0011488	0,14080	7,102	830,0	2 789,7	1 959,7	2,2841	6,4699
16,00	201,36	0,0011587	0,12380	8,080	858,3	2 793,5	1 935,2	2,3437	6,4221
20,00	212,36	0,0011768	0,09961	10,000	908,6	2 799,2	1 890,7	2,4471	6,3411
24,00	221,77	0,0011932	0,08324	12,010	951,8	2 801,8	1 850,0	2,5346	6,2727
28,00	230,04	0,0012088	0,07142	14,000	990,2	2 803,1	1 812,8	2,6101	6,2129
30,00	233,83	0,0012164	0,06663	15,010	1008,4	2 803,5	1 794,7	2,6455	6,1859
35,00	242,54	0,0012344	0,05706	17,530	1049,8	2 802,8	1 753,0	2,7251	6,1242
40,00	250,33	0,0012520	0,04977	20,090	1087,5	2 800,6	1 713,2	2,7965	6,0689
50,00	263,91	0,0012858	0,03943	25,360	1154,2	2 793,9	1 639,6	2,9210	5,9739
60,00	275,56	0,0013185	0,03243	30,840	1213,9	2 784,4	1 570,5	3,0276	5,8894
70,00	285,80	0,0013510	0,02738	36,530	1267,6	2 772,3	1 504,7	3,1221	5,8143
80,00	294,98	0,0013838	0,02352	42,520	1317,3	2 758,6	1 441,2	3,2079	5,7448
90,00	303,31	0,0014174	0,02049	48,800	1363,9	2 742,6	1 378,8	3,2866	5,6783
100,00	310,96	0,0014522	0,01803	55,470	1107,9	2 724,8	1 316,9	3,3601	5,6147
110,00	318,04	0,0014886	0,01597	62,620	1450,2	2 705,2	1 255,0	3,4297	5,5528
120,00	324,64	0,0015270	0,01426	70,150	1491,1	2 684,6	1 193,5	3,4966	5,4930
130,00	330,81	0,0015680	0,01278	78,220	1531,3	2 662,3	1 131,1	3,5606	5,4333
140,00	330,63	0,0016110	0,01149	87,040	1570,8	2 637,9	1 067,0	3,6233	5,3731

Таблица 6

*Характеристики газов*

Газ	Химическое обозначение	Молекулярная масса (округленно), кг/кмоль	Плотность при нормальных физических условиях, кг/м <sup>3</sup>	Газовая постоянная, Дж/(кг·К)
Воздух	–	29	1,293	287,0
Азот	N <sub>2</sub>	28	1,249	296,9
Кислород	O <sub>2</sub>	32	1,429	259,8
Водород	H <sub>2</sub>	2	0,089	4 157,0
Гелий	He	4	0,178	2 078,5
Монооксид углерода	CO	28	1,249	296,9
Диоксид углерода	CO <sub>2</sub>	44	1,287	188,9
Метан	CH <sub>4</sub>	16	0,717	519,6
Аммиак	NH <sub>3</sub>	17	0,771	489,0
Ацетилен	C <sub>2</sub> H <sub>2</sub>	26	1,160	319,8
Водяной пар	H <sub>2</sub> O	18	0,804	461,9

## ОГЛАВЛЕНИЕ

ВВЕДЕНИЕ .....	3
1. Основные понятия, идеальный газ, смеси идеальных газов.....	4
2. Процессы идеального газа в закрытой системе .....	13
3. Сжатие газа в компрессоре .....	19
4. Процессы идеального газа .....	22
5. Второе начало термодинамики. Теория циклов. Циклы ДВС.....	29
6. Реальные газы и пары. Циклы холодильных установок .....	38
7. Дифференциальные уравнения термодинамики .....	44
8. Водяной пар, влажный воздух, циклы паротурбинных установок .....	46
9. Процессы изменения состояния газа в открытой системе. Циклы газотурбинных и реактивных установок.....	51
10. Теплопроводность .....	56
11. Конвективный теплообмен.....	62
12. Тепловое излучение.....	68
13. Теплопередача. Теплообменные аппараты.....	71
ЗАКЛЮЧЕНИЕ.....	75
РЕКОМЕНДАТЕЛЬНЫЙ БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК .....	76
ПРИЛОЖЕНИЕ .....	77

*Учебное издание*

СБОРНИК ЗАДАЧ ПО ТЕРМОДИНАМИКЕ

Авторы-составители:  
АБАЛЯЕВ Андрей Юрьевич  
ЛЮХТЕР Александр Борисович

*Издается в авторской редакции*

Подписано в печать 20.05.22.  
Формат 60×84/16. Усл. печ. л. 4,88. Тираж 50 экз.  
Заказ

Издательство  
Владимирского государственного университета  
имени Александра Григорьевича и Николая Григорьевича Столетовых.  
600000, Владимир, ул. Горького, 87.