

Министерство Российской Федерации
по делам гражданской обороны, чрезвычайным ситуациям
и ликвидации последствий стихийных бедствий

Академия Государственной противопожарной службы

Задачник ПО ТЕПЛОТЕХНИКЕ

Допущено Министерством Российской Федерации
по делам гражданской обороны, чрезвычайным ситуациям
и ликвидации последствий стихийных бедствий в качестве
учебного пособия для высших образовательных учреждений
МЧС России

Москва

2013

УДК 621.397
ББК 31.33я73
П88

Авторы:

С. В. Пузач, М. Н. Горячева, В. В. Андреев,
Ю. И. Козлов, В. Г. Лимонов

Рецензенты:

В. Т. Калугин, профессор кафедры динамики и управления полетом ракет и космических аппаратов МГТУ им. Н. Э. Баумана, доктор технических наук, профессор, лауреат премий Правительства РФ в области науки и техники;

М. Ю. Овсянников, начальник кафедры государственного надзора Ивановского института ГПС МЧС России кандидат технических наук, доцент;

А. А. Бондарев, начальник нормативно-технического отдела Департамента надзорной деятельности МЧС России

Задачник по теплотехнике: учеб. пособие / С. В. Пузач, П88 М. Н. Горячева, В. В. Андреев и др. – М. : Академия ГПС МЧС России, 2013. – 138 с.

ISBN 978-5-9229-0061-4

Задачник составлен в соответствии с программой курса «Теплотехника», изучаемого на кафедре инженерной теплофизики и гидравлики Академии ГПС МЧС России. Все задачи снабжены ответами, а типовые задачи – подробными пояснениями к решению, ссылками на необходимые расчетные формулы, приведенные в учебнике по дисциплине.

Структура задачника соответствует тематическому плану учебной дисциплины. Задачник предназначен для курсантов и слушателей высших образовательных учреждений пожарно-технического профиля МЧС России и студентов вузов, а также для инженерно-технических работников и специалистов.



УДК 621.397
ББК 31.33я73

© Академия Государственной противопожарной службы МЧС России, 2013

Введение

За последние годы на кафедре инженерной теплофизики и гидравлики профессорско-преподавательским составом был проведен комплекс работ, направленных на создание учебно-методической литературы по курсу «Теплотехника», одним из результатов которых было написание задачника по всему курсу дисциплины в соответствии с новой рабочей программой и изданным в 2006 г. учебником «Теплотехника» [1].

Содержание и структура задачника отличается от ранее выпущенных учебных пособий, поскольку он не только объединяет все разделы курса, но и содержит новый, ранее не представленный материал по разделам «Химическая термодинамика» и «Источники тепловой энергии».

Задачник состоит из трех частей и 31 параграфа. В первой части «Термодинамика» приводятся задачи по основам и законам термодинамики, процессам изменения состояния идеальных газов, термодинамическим свойствам жидкостей и паров, смесям газов и паров, свойствам влажного воздуха, циклам тепловых двигателей, основам химической термодинамики.

Во второй части «Теплопередача в пожарном деле» рассматриваются задачи стационарной и нестационарной теплопроводности, конвективного теплообмена, теплоотдачи при вынужденном и свободном движении жидкости, теплообмена при изменении агрегатного состояния вещества, конвективного тепломассообмена, теплообмена излучением и сложного теплообмена.

Третья часть задачника «Теплотехнические устройства. Проблемы использования теплоты» посвящена вопросам расчета теплообменных аппаратов и источникам тепловой энергии.

При разработке задач был использован опыт написания предыдущих пособий по дисциплине.

Задачник снабжен обширным справочным материалом в виде таблиц, диаграмм, номограмм и расчетных схем, объем которого позволяет исключить использование иной справочной литературы для решения всех поставленных в учебном пособии задач.

ТЕРМОДИНАМИКА

§ 1. Термодинамические параметры состояния и уравнения состояния

Задачи 1.1–1.9

1.1. В баллоне углекислотного огнетушителя емкостью 5 л находится 3,5 кг диоксида углерода CO_2 . Определите плотность ρ_{CO_2} при указанных условиях. Какой объем $V_{\text{н.у}}$ займет данная масса CO_2 при нормальных физических условиях: давление 101 325 Па и температура $T = 273,15 \text{ K}$?

1.2. Остаточное давление $p_{\text{ман}}$ в баллоне кислородного изолирующего противогаза по показаниям манометра равно 2,0 МПа при барометрическом давлении $p_{\text{бар}} = 725 \text{ мм рт. ст.}$ (барометрическое давление приведено к $0 \text{ }^\circ\text{C}$). Определите абсолютное давление кислорода O_2 в баллоне в Па.

1.3. При гидравлических испытаниях пеносмесителя пожарного насоса мановакуумметр на насосе показал давление манометрическое $p_{\text{ман}}$, равное 0,8 МПа, а дифманометр – разрежение в вакуум-камере 500 мм вод. ст. Определите абсолютное давление, развиваемое насосом, и абсолютное давление в вакуум-камере в Па, если показание барометра составляет 750 мм рт. ст. Все показания приборов приведены к $0 \text{ }^\circ\text{C}$.

1.4. Температура сжатого идеального газа в баллоне равна $15 \text{ }^\circ\text{C}$. Во время пожара температура газа t_r поднялась в нем до $450 \text{ }^\circ\text{C}$. Произойдет ли разрушение баллона, если известно, что при этой температуре он может выдержать давление не более 9,8 МПа (начальное давление газа в баллоне 4,8 МПа)?

1.5. Компрессором полевой зарядной углекислотной станции наполнили два одинаковых баллона равной массой различных газов: воздухом и CO_2 . Одинаково ли будет давление газов в баллонах при одной и той же температуре?

1.6. Давление сжатого воздуха в баллоне воздушно-пенного огнетушителя емкостью $V = 40 \text{ л}$ до включения установки составляло 1,2 МПа при температуре $t = 27 \text{ }^\circ\text{C}$. Определите массу израсходованного воздуха m , если после выключения установки давление его стало равным 0,4 МПа, а температура $t_b = 17 \text{ }^\circ\text{C}$.

1.7. Для пожаротушения в помещении объемом 100 м^3 можно использовать газообразный азот N_2 , CO_2 или водяной пар H_2O . Определите, какого из названных веществ понадобится меньше всего для создания 35%-й концентрации его по объему при давлении $p = 0,1 \text{ МПа}$ и температуре $t = 50 \text{ }^\circ\text{C}$. При решении задачи потерями веществ при заполнении помещения следует пренебречь.

1.8. Определите сечение f и диаметр d газохода системы аварийного дымоудаления с производительностью вентилятора $G = 3\ 600$ кг/ч, если абсолютное давление дымовых газов p равно $0,115$ МПа при температуре $t = 217$ °С, их плотность при нормальных физических условиях $\rho_n = 1,22$ кг/м³, а скорость газов в газоходе w составляет 8 м/с.

1.9. Определите, какое абсолютное давление установится в баллоне углекислотного огнетушителя, объем V которого равен 40 л, при температуре $t = 28$ °С, если масса его заряда равна 3 кг газообразного CO_2 . Расчеты произведите по уравнениям идеального и реального газов (уравнение Ван-дер-Ваальса).

§ 2. Смеси идеальных газов

Задачи 2.1–2.9

2.1. В сухих выхлопных газах двигателя пожарного автомобиля содержатся: CO_2 , O_2 , оксид углерода CO , азот N_2 . Их объемный состав следующий: $\text{CO}_2 = 13\ \%$; $\text{O}_2 = 6\ \%$; $\text{CO} = 1\ \%$. Найдите объемную долю азота в указанной газовой смеси и определите газовую постоянную смеси $R_{\text{см}}$, кажущуюся молекулярную массу $\mu_{\text{см}}$ и плотность смеси $\rho_{\text{см}}$ при давлении $p = 0,1$ МПа и температуре $t = 200$ °С.

2.2. По массе влажный воздух состоит из $23\ \%$ O_2 , $76\ \%$ N_2 и $1\ \%$ водяного пара H_2O . Определите объемный состав влажного воздуха и парциальные давления его составляющих, если барометрическое давление $p = 750$ мм рт. ст.

2.3. В результате объемного пожаротушения при температуре $t = 100$ °С и давлении $p = 106,64$ кПа образовалась огнетушащая смесь воздуха молекулярной массой $\mu_{\text{в}} = 29$ кг/кмоль и CO_2 с плотностью смеси $\rho_{\text{см}} = 1,125$ кг/м³. Определите объемный и массовый составы смеси.

2.4. В свободное пространство технологического аппарата, заполненное N_2 , испаряется бензол C_6H_6 . В некоторый момент газовая постоянная парогазовой смеси $R_{\text{см}}$ стала равной $156,87$ Дж/(кг·К). Определите массовый и объемный составы парогазовой смеси, а также парциальные давления ее компонентов, если давление в аппарате $p = 1,6$ МПа.

2.5. Определите пропускную способность газохода G в кг/с системы аварийного дымоудаления сечением $f = 0,15$ м² при абсолютном давлении $p = 0,1$ МПа и температуре $t = 127$ °С, если массовый состав газообразных продуктов горения следующий: $g_{\text{CO}_2} = 17,7\ \%$; $g_{\text{O}_2} = 7,5\ \%$; $g_{\text{CO}} = 3,7\ \%$; $g_{\text{N}_2} = 71,1\ \%$, а допустимая скорость движения газов в газоходе $w = 8$ м/с.

2.6. Определите общую массу смеси CO и CO_2 , если масса CO равна 12 кг, кажущаяся молекулярная масса смеси $\mu_{\text{см}}$ составляет 41 кг/кмоль.

2.7. Состав горючей смеси задан объемными долями водорода $r_{\text{H}_2} = 0,4$ и этана $r_{\text{C}_2\text{H}_6} = 0,6$. Определите теоретически необходимое количество воздуха для сжигания 1 м^3 смеси, приведенной к нормальным физическим условиям.

2.8. Объемный состав горючего газа, полученного при подземной газификации подмосковного угля, следующий: $\text{N}_2 = 63,6 \%$; $\text{H}_2 = 14,5 \%$; $\text{CO} = 10,0 \%$; $\text{CO}_2 = 9,5 \%$; $\text{H}_2\text{S} = 0,6 \%$ и $\text{CH}_4 = 1,8 \%$. Рассчитайте объем воздуха, теоретически необходимый для сжигания 1 м^3 газа (при нормальных физических условиях).

2.9. До какого давления нужно сжать газовую смесь, заданную объемными долями диоксида углерода $r_{\text{CO}_2} = 0,27$; кислорода $r_{\text{O}_2} = 0,04$; азота $r_{\text{N}_2} = 0,69$, чтобы при температуре $t = 27 \text{ }^\circ\text{C}$ плотность газовой смеси составила $\rho_{\text{см}} = 1,75 \text{ кг/м}^3$?

§ 3. Теплоемкости газов

Задачи 3.1–3.7

3.1. Определите количество тепла Q , затрачиваемого в течение $\tau = 1 \text{ ч}$ в калорифере на нагрев сушильного агента (воздуха) перед его подачей в сушилку пожарных рукавов, если расход воздуха G составляет $3 \text{ 000 м}^3/\text{ч}$; начальная температура воздуха $t_1 = 10 \text{ }^\circ\text{C}$; конечная температура воздуха $t_2 = 100 \text{ }^\circ\text{C}$; барометрическое давление $p_{\text{бар}} = 103,974 \text{ кПа}$ (780 мм рт. ст.).

3.2. Баллон емкостью $V = 100 \text{ л}$, заполненный CO до давления $p = 5 \text{ МПа}$ при температуре газа t_r , равной $20 \text{ }^\circ\text{C}$, находится в помещении, где возник пожар. Определите количество тепла Q , которое получил газ, если давление в нем стало 10 МПа .

3.3. Определите среднюю массовую теплоемкость $c_{p,m}$ продуктов горения (O_2 , N_2 , CO , CO_2) на пожаре, их состав в объемных долях равен: $r_{\text{O}_2} = 0,071$; $r_{\text{N}_2} = 0,80$; $r_{\text{CO}} = 0,007$; $r_{\text{CO}_2} = 0,122$, при этом зависимость теплоемкости от температуры учитывать не нужно. Изобарные массовые теплоемкости CO_2 , CO , N_2 , O_2 , соответственно, равны: $c_{p\text{CO}_2} = 0,856 \text{ кДж/(кг}\cdot\text{K)}$; $c_{p\text{CO}} = c_{p\text{N}_2} = 1,047 \text{ кДж/(кг}\cdot\text{K)}$; $c_{p\text{O}_2} = 0,916 \text{ кДж/(кг}\cdot\text{K)}$.

3.4. Определите количество тепла q , которое отводится от 1 кг сухих выхлопных газов (O_2 , N_2 , CO_2) двигателя пожарного автомобиля на подогрев воды в цистерне, объемный состав которых равен: $r_{\text{O}_2} = 0,007$; $r_{\text{N}_2} = 0,820$; $r_{\text{CO}_2} = 0,110$, если при постоянном давлении их температура снижается с 500 до $100 \text{ }^\circ\text{C}$.

3.5. При определении критического диаметра каналов огнепреградителя, установленного на продувочной линии ацетиленового газгольдера, изобарную объемную теплоемкость продуктов горения c'_p приняли равной $1,298 \text{ кДж}/(\text{м}^3 \cdot \text{К})$. Найдите среднюю объемную теплоемкость продуктов горения в диапазоне температур $420\text{--}1800 \text{ }^\circ\text{C}$, если при горении ацетилена C_2H_2 образуется смесь следующего состава (в молярных долях): $m_{\text{CO}_2} = 0,1613$; $m_{\text{H}_2\text{O}} = 0,0806$; $m_{\text{N}_2} = 0,7581$ – и сравните ее с теплоемкостью продуктов горения c'_p .

3.6. Определите среднюю молярную теплоемкость $c'_{p,\text{см}}$ продуктов горения метана CH_4 в интервале температур $600\text{--}1800 \text{ }^\circ\text{C}$.

3.7. Объемный состав газовой смеси следующий: $r_{\text{CO}_2} = 0,12$; $r_{\text{O}_2} = 0,20$; $r_{\text{N}_2} = 0,61$; $r_{\text{H}_2\text{O}} = 0,07$. Определите средние молярную $\mu c'_{p,\text{см}}$, объемную $c'_{p,\text{см}}$ и массовую $c_{p,\text{см}}$ теплоемкости газовой смеси, если интервал температур составляет $300\text{--}700 \text{ }^\circ\text{C}$.

Ответы к §§ 1–3

1.1. $V_{\text{н.у}} = 1,941 \text{ м}^3$. **1.2.** $p_{\text{абс}} = 2,097 \text{ МПа}$. **1.3.** На насосе $p_{\text{абс}} = 0,9106 \text{ МПа}$; в вакуум-камере $p_{\text{абс}} = 0,0951 \text{ МПа}$. **1.4.** Да, баллон разрушится. **1.5.** Давление газов в баллонах распределится пропорционально их газовым постоянным, следовательно, давление воздуха в баллоне будет в $1,519$ раз больше, чем давление газообразного CO_2 . **1.6.** $m = 0,366 \text{ кг}$. **1.7.** Воспользуемся уравнением состояния для произвольного количества газа (например, 1 м^3) и, предполагая, что нам понадобится заполнить веществом 35% объема помещения, получим:

$$G = \frac{0,35 p V}{RT} = \frac{35 \cdot 10^5 \cdot 1}{\frac{8314}{\mu} (273 + 50)} \approx 1,303 \text{ т. Откуда } G_{\text{N}_2} = 1,303 \cdot 28 = 36,484 \text{ кг};$$

$$G_{\text{CO}_2} = 1,303 \cdot 44 = 57,332 \text{ кг}; G_{\text{H}_2\text{O}} = 23,454 \text{ кг, т. е. менее всего понадобится}$$

водяного пара. **1.8.** Из уравнения неразрывности потока находим $f = \frac{G}{w\rho}$,

кроме того, $f = \frac{\pi d^2}{4}$, где ρ – плотность газа, d – диаметр газохода.

По уравнению состояния идеального газа находим плотность газа:

$$\rho = \frac{p\rho_n T_n}{T p_n} = \frac{11\,500 \cdot 1,22 \cdot 273}{490 \cdot 101\,325} = 0,771 \text{ кг/м}^3. \text{ Отсюда определяем необходимое}$$

сечение и диаметр газохода: $f = 0,162 \text{ м}^2$; $d = 0,454 \text{ м}$. **1.9.** $p = 4,266 \text{ МПа}$ (по уравнению идеального газа); $p = 3,54 \text{ МПа}$ (по уравнению Ван-дер-Ваальса).

2.1. Поскольку $\sum_{i=1}^{i=n} r_i = 1$, то $r_{\text{N}_2} = 1 - (r_{\text{CO}_2} + r_{\text{O}_2} + r_{\text{CO}}) = 1 - (0,13 + 0,06 + 0,01) = 0,8$.

Газовую постоянную $R_{\text{см}}$ и кажущуюся молекулярную массу $\mu_{\text{см}}$ газовой смеси определяем из уравнений: $\mu_{\text{см}} = \sum_{i=1}^{i=n} r_i \mu_i = 0,13 \cdot 44 + 0,06 \cdot 32 + 0,01 \cdot 28 =$
 $= 30,32 \text{ кг/кмоль}; R_{\text{см}} = \frac{8314}{\mu_{\text{см}}} = 274,21 \text{ Дж/(кг}\cdot\text{К)}$. Плотность газовой смеси

определяем из уравнения состояния идеального газа: $\rho_{\text{см}} = \frac{p}{R_{\text{см}} T} =$
 $= 0,771 \text{ кг/м}^3$. **2.2.** $r_{\text{O}_2} = 0,206$; $r_{\text{N}_2} = 0,778$; $r_{\text{H}_2\text{O}} = 0,016$; $p_{\text{O}_2} = 20,6 \text{ кПа}$; $p_{\text{N}_2} =$
 $= 77,8 \text{ кПа}$; $p_{\text{H}_2\text{O}} = 1,6 \text{ кПа}$. **2.3.** $\rho_{\text{н.см}} = 1,46 \text{ кг/м}^3$. Плотности компонентов смеси при нормальных физических условиях следующие: $\rho_{\text{CO}_2} = 1,98 \text{ кг/м}^3$;
 $\rho_{\text{B}} = 1,293 \text{ кг/м}^3$. Для данной смеси: $r_{\text{CO}_2} + r_{\text{B}} = 1$ и $\rho_{\text{см}} = r_{\text{CO}_2} \rho_{\text{CO}_2} + r_{\text{B}} \rho_{\text{B}}$.

Откуда $r_{\text{CO}_2} = \frac{\rho_{\text{см}} - \rho_{\text{B}}}{\rho_{\text{CO}_2} - \rho_{\text{B}}}$, т. е. $r_{\text{CO}_2} = 24,3 \%$, $r_{\text{B}} = 75,7 \%$. Далее: $\mu_{\text{см}} = \sum_{i=1}^{i=n} r_i \mu_i =$
 $= 0,243 \cdot 44 + 0,757 \cdot 29 = 32,645 \text{ кг/кмоль}$; $g_i = \frac{r_i \mu_i}{\mu_{\text{см}}}$; $g_{\text{CO}_2} = 0,328$; $g_{\text{B}} = 0,672$.

2.4. $g_{\text{N}_2} = 26,4 \%$; $g_{\text{C}_6\text{H}_6} = 73,6 \%$; $r_{\text{N}_2} = 50 \%$; $r_{\text{C}_6\text{H}_6} = 50 \%$; $p_{\text{N}_2} = 8 \text{ бар}$;
 $p_{\text{C}_6\text{H}_6} = 8 \text{ бар}$. **2.5.** $G = 1,09 \text{ кг/с}$. **2.6.** $R_{\text{см}} = 202,8 \text{ Дж/(кг}\cdot\text{К)}$; $g_{\text{CO}} = 12,8 \%$;

$g_{\text{CO}_2} = 87,2 \%$. Масса смеси $m = \frac{12}{0,128} = 93,75 \text{ кг}$. **2.7.** Реакции полного сгорания этана и водорода: $\text{C}_2\text{H}_6 + 3,5\text{O}_2 = 2\text{CO}_2 + 3\text{H}_2\text{O}$; $\text{H}_2 + 0,5\text{O}_2 = \text{H}_2\text{O}$. Из этих уравнений следует, что для сжигания 1 кмолья водорода требуется 0,5 кмолья кислорода, а для сжигания 1 кмолья этана – 3,5 кмолья кислорода. Учитывая, что для любого газа в идеальном состоянии $V_{\mu} = 22,4 \text{ м}^3/\text{кмоль}$ и что в воздухе содержится 21,0 % (об.) кислорода, найдем теоретически необходимое количество воздуха для сжигания 1 м³ смеси:

$V_{\text{B}} = \frac{(0,5r_{\text{H}_2} + 3,5r_{\text{C}_2\text{H}_6})}{0,21} = 10,948 \text{ нм}^3/\text{нм}^3 \text{ газа}$. **2.8.** $V_{\text{B}} = 0,798 \text{ нм}^3/\text{нм}^3 \text{ газа}$.

2.9. $p_{\text{абс}} = 0,228 \text{ МПа}$. **3.1.** Массовый расход воздуха: $G = 2\,917,65 \text{ кг/ч}$. Приняв, что теплоемкость зависит от температуры линейно, находим $Q = 264\,744 \text{ кВт}$. **3.2.** $m = 5,747 \text{ кг}$; $t_2 = 313^\circ\text{C}$; $Q = 1\,258,72 \text{ кДж}$. **3.3.** Массовый состав продуктов горения находим по уравнению:

$g_i = \frac{r_i \mu_i}{\sum_{i=1}^n r_i \mu_i} = \frac{r_i \mu_i}{\mu_{\text{см}}}$; $g_{\text{CO}_2} = 0,178$; $g_{\text{CO}} = 0,006$; $g_{\text{N}_2} = 0,741$; $g_{\text{O}_2} = 0,075$.

По условию массовые теплоемкости компонентов газовой смеси равны: $c_{\text{pCO}_2} = 0,856 \text{ кДж/(кг}\cdot\text{К)}$; $c_{\text{pO}_2} = 0,916 \text{ кДж/(кг}\cdot\text{К)}$; $c_{\text{pCO}} = c_{\text{pN}_2} = 1,047 \text{ кДж/(кг}\cdot\text{К)}$;

тогда $c_{\text{p.см}} = \sum_{i=1}^{i=n} g_i c_{\text{p}_i} = 1,003 \text{ кДж/(кг}\cdot\text{К)}$. **3.4.** Массовый состав выхлопных

газов равен: $g_{O_2} = 0,075$; $g_{N_2} = 0,764$; $g_{CO_2} = 0,161$. Средняя массовая

теплоемкость выхлопных газов составит: $c_{p,см} \Big|_{100}^{500} = 1,143 \text{ Дж}/(\text{м}^3 \cdot \text{К})$

и $q = -457,2 \text{ кДж/кг}$. **3.5.** $c'_{p,см} = \sum_{i=1}^{i=n} m_i c'_{pi}$; $c'_{p,см} \Big|_{420}^{1800} = 1,488 \text{ Дж}/(\text{м}^3 \cdot \text{К})$.

Расхождение составит 12,77 %. **3.6.** $CH_4 + 2(O_2 + 3,76N_2) = CO_2 + 2H_2O + 2 \cdot 3,76N_2$ – находим объемный состав продуктов горения: $r_{CO_2} = 0,095$; $r_{H_2O} = 0,190$; $r_{N_2} = 0,715$. По табл. 1 находим среднюю молярную теплоемкость смеси, а затем вычисляем среднюю объемную теплоемкость смеси

в том же интервале температур: $\overline{c'_{p,см}} = \frac{\mu c_{p,см}}{22,4} = 1,739 \text{ кДж}/(\text{нм}^3 \cdot \text{К})$.

3.7. По табл. 2 находим теплоемкости смеси $\mu c_{p,см} = \sum_{i=1}^{i=n} r_i (\mu c_p)_i$, равные 31,51 кДж/(кмоль·К) при температуре $t_1 = 300 \text{ }^\circ\text{C}$ и 33,20 кДж/(кмоль·К) при $t_2 = 700 \text{ }^\circ\text{C}$. Средняя молярная теплоемкость смеси в интервале

температур 300–700 $^\circ\text{C}$ будет равна: $\overline{\mu c_{p,см}} = \frac{\mu c_{p,см2} t_2 - \mu c_{p,см1} t_1}{t_2 - t_1} =$

$= 34,465 \text{ кДж}/(\text{кмоль} \cdot \text{К})$. Тогда средняя объемная теплоемкость смеси в указ-

анном интервале температур составит: $\overline{c'_{p,см}} = \frac{\overline{\mu c_{p,см}}}{22,4} = 1,538 \text{ кДж}/(\text{нм}^3 \cdot \text{К})$.

Кажущаяся молекулярная масса смеси будет в итоге: $\mu_{см} = \sum_{i=1}^{i=n} r_i \mu_i =$
 $= 30,02 \text{ кг/кмоль}$, отсюда средняя массовая теплоемкость смеси в указанном

интервале температур: $\overline{c_{p,см}} = \frac{\overline{\mu c_{p,см}}}{\mu_{см}} = 1,148 \text{ кДж}/(\text{кг} \cdot \text{К})$.

§ 4. Политропные процессы

Задачи 4.1–4.11

4.1. На сжатие 3 кг CO_2 полевой зарядной углекислотной станцией затрачено 800 кДж работы, при этом внутренняя энергия газа увеличилась на 295 кДж. Рассчитайте необходимое количество тепла Q и укажите, подводится оно или отводится. Определите изменение температуры газа ΔT , если его молярная теплоемкость μc_v равна 29,31 кДж/(кмоль·К).

4.2. Определите расход воздуха Q для охлаждения двигателя пожарной автоцистерны, мощность N которого равна 85 кВт, если 75 % энергии двигателя расходуется на выделение тепла, а температура охлаждающего воздуха повышается на 15 К.

4.3. Продукты горения бензина (CO_2 , H_2O , O_2 , N_2) расширяются в двигателе внутреннего сгорания пожарного автомобиля от 3 до 0,3 МПа по политропному процессу с показателем политропы $n = 1,27$. Начальная температура газов t_1 равна 2100°C . Массовый состав продуктов горения 1 кг бензина следующий: $\text{CO}_2 = 3,135$ кг, $\text{H}_2\text{O} = 1,305$ кг, $\text{O}_2 = 0,34$ кг, $\text{N}_2 = 12,61$ кг. Определите работу расширения газов L , если одновременно подается в цилиндр 2 г бензина.

4.4. Из огнетушителя ОУ-8 выпустили $3/4$ содержащегося в нем CO_2 . До какой температуры t_2 понизится оставшаяся часть CO_2 , если первоначальное абсолютное давление было $p_1 = 15$ МПа, а температура $t_1 = 20^\circ\text{C}$? При решении данной задачи расширение оставшейся части CO_2 следует считать политропным с показателем политропы $n = 1,2$.

4.5. Компрессор турбореактивного двигателя газовой турбины всасывает воздух при давлении $p_1 = 0,1$ МПа, температуре $T_1 = 283$ К и подает его в камеру сгорания при давлении $p_2 = 0,73$ МПа и температуре $T_2 = 470$ К. Определите показатель политропного процесса сжатия n для 1 кг воздуха.

4.6. Давление воздуха p при температуре $T = 300$ К в герметичном трубопроводе составляет 0,105 МПа. Трубопровод присоединен к закрытому баллону со сжатым воздухом, давление которого равно 20 МПа. Определите температуру T воздуха в трубопроводе при внезапном открытии вентиля в баллоне.

4.7. Сколько тепла Q понадобится для изотермического расширения газообразного N_2 , выпускаемого из баллона емкостью $V = 40$ л, если его первоначальная температура $T_1 = 293$ К, давление $p_1 = 20$ МПа, а давление после понижающего редуктора $p_2 = 0,6$ МПа?

4.8. В баллоне $V = 40$ л находится O_2 при избыточном давлении $p_{\text{ман}} = 14,75$ МПа и температуре $t_1 = 17^\circ\text{C}$. При пожаре газ в баллоне нагрелся до $t_2 = 150^\circ\text{C}$. Определите избыточное давление $p_{\text{ман}}$ O_2 и изменение его внутренней энергии ΔU . Изохорная массовая теплоемкость кислорода $c_v = 662$ Дж/(кг·К), а барометрическое давление $p_{\text{атм}} = 0,1$ МПа.

4.9. Воздух, объемом $V = 40$ л при давлении $p_1 = 0,4$ МПа и $t = 60^\circ\text{C}$, политропически расширяется до трехкратного объема и давления $p_2 = 0,1$ МПа. Определите показатель политропы n , работу процесса расширения L , количество теплоты Q и изменение внутренней энергии в процессе ΔU , если изохорная массовая теплоемкость воздуха $c_v = 716$ Дж/(кг·К).

4.10. В политропном процессе от 1 кмоль CO_2 отведено 2 000 кДж теплоты, в результате чего газ охладился на $98,6^\circ\text{C}$. Начальное давление газа $p_1 = 0,2$ МПа, температура $t_1 = 127^\circ\text{C}$. Определите показатель политропы n , начальные и конечные параметры газа (p , T , v), изменение его внутренней энергии ΔU , энтальпии ΔI и энтропии ΔS , а также работу в процессе L , если изобарная молярная теплоемкость μ_{c_p} у CO_2 равна 37,1 кДж/(кмоль·К).

4.11. В сосуде объемом $V = 2 \text{ м}^3$ находится CO_2 при избыточном давлении $p_{\text{ман}} = 0,15 \text{ МПа}$ и температуре $t = 40 \text{ }^\circ\text{C}$. Сосуд оборудован предохранительным клапаном, срабатывающем при давлении $0,2 \text{ МПа}$. При пожаре сосуд нагрелся до $t = 500 \text{ }^\circ\text{C}$, а затем во время тушения был охлажден до $t = 20 \text{ }^\circ\text{C}$. Изобразите в p - v -координатах процессы, происходящие с газом. Определите параметры газа в характерных точках, массу газа до и после пожара, изменение внутренней энергии ΔU и энтальпии газа ΔI . При решении задачи барометрическое давление следует считать равным $0,1 \text{ МПа}$, а изохорную молярную теплоемкость CO_2 $\mu_{cp} = 29,1 \text{ кДж}/(\text{кмоль} \cdot \text{К})$.

§ 5. Адиабатное истечение газов

Задачи 5.1–5.8

5.1. Определите необходимую площадь мембранных предохранительных клапанов для отвода продуктов взрыва из трубопровода f , по которому транспортируется бензоловоздушная смесь, если мембраны срабатывают при давлении $p_1 = 0,12 \text{ МПа}$, избыточное количество продуктов горения $\Delta V = 16,5 \text{ м}^3$, их удельный объем $v_1 = 5,35 \text{ м}^3/\text{кг}$, время горения смеси $\tau = 0,2 \text{ с}$, барометрическое давление $p_{\text{бар}} = 0,096 \text{ МПа}$, коэффициент расхода $\mu = 0,7$.

5.2. В сушильной камере при сушке пожарных рукавов поддерживается вакуум $p_1 = 46,655 \text{ кПа}$ (350 мм рт. ст.), атмосферное давление $p_{\text{атм}}$ составляет $102,641 \text{ кПа}$ (770 мм рт. ст.), температура воздуха $T = 300 \text{ К}$, коэффициент расхода $\mu = 0,75$. Определите количество воздуха, поступающего в сушилку извне за 1 ч через щели общей площадью 6 мм^2 .

5.3. В течение какого времени τ может образоваться взрывоопасная концентрация газов в помещении компрессорной станции объемом $V = 4 \text{ 200 м}^3$, если произойдет авария трубопровода с этиленом C_2H_6 . Диаметр трубопровода $d = 0,025 \text{ м}$, давление этилена $p_1 = 4 \text{ МПа}$ при температуре $T_1 = 313 \text{ К}$. Коэффициент расхода $\mu = 0,9$. Нижний концентрационный предел распространения пламени этилена в смеси с воздухом $C_{\text{НКПР}} = 40 \text{ г/м}^3$.

5.4. Сравните критические скорости истечения воздуха, H_2 и CO_2 , если температура перед сужающимся соплом $T = 288 \text{ К}$.

5.5. Определите давление p_1 и температуру T_1 O_2 в баллоне, если известно, что его истечение в атмосферу происходит с критической скоростью $w = 266 \text{ м/с}$, коэффициент скорости $\varphi = 0,9$, а барометрическое давление $p_{\text{бар}} = 0,101 \text{ МПа}$.

5.6. Определите сечение отверстия f в вентиле ОУ-8, обеспечивающее в начальный момент истечения расход CO_2 $G = 0,09 \text{ кг/с}$ в среду с давлением $p_2 = 0,1 \text{ МПа}$, если известно что давление газа $p_1 = 16 \text{ МПа}$, температура $T_1 = 300 \text{ К}$, а коэффициент расхода $\mu = 0,75$.

5.7. Рассчитайте сечение отверстий f для истечения равных количеств $G = 0,25$ кг/с N_2 , CO_2 и сухого насыщенного водяного пара H_2O , начальные параметры которых одинаковы: $p_1 = 0,8$ МПа и $t_1 = 170$ °С. Истечение всей смеси происходит в среду с $p_c = 0,1$ МПа. Сопротивлением и сужением струй при решении данной задачи следует пренебречь.

5.8. Пожар возник в помещении, где хранился баллон с газообразным N_2 , емкостью $V = 40$ л под давлением $p_1 = 20$ МПа при температуре $t_1 = 40$ °С. Предпринята попытка предотвратить взрыв баллона, выпустив из него газ (сечение отверстия в вентиле баллона $f = 6$ мм²). Определите время τ , в течение которого баллон освободится от избыточного давления. Процесс расширения азота N_2 в баллоне нужно принять изотермическим, коэффициент расхода $\mu = 0,75$.

§ 6. Процессы сжатия газа в компрессоре

Задачи 6.1–6.9

6.1. Определите теоретические затраты работы $L_{ад}$ на сжатие в компрессоре от $p_1 = 0,1$ МПа до $p_2 = 0,5$ МПа 1 м³ воздуха. Расчеты проводите по термодинамической формуле для адиабатного сжатия при постоянной адиабаты $k = 1,4$.

6.2. Определите мощность N , потребляемую одноступенчатым поршневым компрессором, который сжимает $V = 460$ м³/ч аммиака при нормальных условиях от $p_1 = 0,25$ МПа до $p_2 = 1,2$ МПа 460 м³/ч. Начальная температура аммиака $t_1 = -10$ °С; КПД компрессора $\eta = 0,7$. Определите также температуру аммиака в конце сжатия. Расчеты проводите по термодинамическим формулам для адиабатного сжатия при постоянной адиабаты $k = 1,29$.

6.3. В одноступенчатом поршневом компрессоре, предназначенном для наполнения углекислотных огнетушителей, вредное пространство составляет 8,5 % от объема, описываемого поршнем. Считая процесс расширения сжатого газа из вредного пространств адиабатным, постоянную адиабаты $k = 1,29$, определите, при каком предельном давлении нагнетания производительность компрессора станет равной нулю, если давление всасывания $p_{вс} = 0,2$ МПа.

6.4. Оцените возможность возгорания отложений органической пыли (температура самовоспламенения $t_{св} = 230$ °С) на поверхности цилиндров компрессора с воздушным охлаждением: а) одноступенчатого; б) двухступенчатого с промежуточным охлаждением сжимаемого воздуха до начальной температуры $t_1 = 20$ °С. Рассмотрите: 1) политропный процесс сжатия, показатель политропного процесса сжатия $n = 1,3$; 2) адиабатный процесс сжатия, постоянная адиабаты $k = 1,4$ (толстый слой пыли). Воздух сжимается от 0,1 до 2,0 МПа для каждого процесса. Вычислите теоретическую затрату работы для каждого случая.

6.5. Для наполнения кислородных баллонов используется двухступенчатый компрессор с промежуточным охлаждением газа до начальной температуры. Давление на входе в компрессор $p_1 = 0,1$ МПа, а температура $t_1 = 20$ °С. Давление в рабочем баллоне компрессора на его выходе p_k составляет 15 МПа. Объемная подача компрессора $V = 1,7 \cdot 10^{-5}$ м³/с (при начальных параметрах). Определите теоретическую мощность привода компрессора N_k и количество тепла Q , которое необходимо отводить от кислорода. Сжатие газа в обеих ступенях политропное с показателем политропного процесса сжатия $n = 1,25$.

6.6. Всасывающий аппарат создает в полости пожарного насоса вакуум 0,08 МПа. Давление атмосферного воздуха $p_1 = 0,1$ МПа. Считая процесс сжатия воздуха в шиберном вакуум-насосе политропным, показатель политропного процесса сжатия $n = 1,25$, определите теоретические затраты работы l для создания вакуума: а) 0,03 МПа; б) 0,07 МПа; в) 0,08 МПа.

6.7. Всасывающий аппарат, работающий как поршневой компрессор, за 35 с создает в полости пожарного насоса и всасывающих рукавах, общим объемом 0,3 м³, вакуум 0,077 МПа. Давление атмосферного воздуха $p_1 = 0,1$ МПа, а температура $t_1 = 20$ °С. Считая процесс сжатия воздуха в вакуум-насосе политропным, показатель политропного процесса сжатия $n = 1,3$, определите теоретическую мощность привода компрессора N_k .

6.8. Для обеспечения работы на пожаре пневмоинструмента автомобиль технической службы оборудован двухступенчатым компрессором, сжимающим наружный воздух при давлении атмосферного воздуха $p_1 = 0,1$ МПа и температуре $t_1 = 20$ °С до давления компрессора $p_k = 0,7$ МПа. После первой ступени воздух охлаждается до начальной температуры. Объемная подача компрессора V равна 0,09 м³/с при числе оборотов $\nu = 17,5$ об./с и начальных параметрах. Сжатие в обеих ступенях политропное, показатель политропного процесса сжатия $n = 1,3$, относительный объем вредного пространства $\epsilon = 0,08$. Процесс расширения сжатого газа из вредного пространства адиабатный, постоянная адиабаты $k = 1,4$. Определите теоретическую мощность привода компрессора N_k и объем цилиндра. Какой должна быть мощность привода, если сжатие производить в одноступенчатом компрессоре?

6.9. При наполнении углекислотных огнетушителей CO_2 давление изменяется от 0,1 до 12 МПа. Начальная температура газа t_1 и температура после холодильников t_2 равна 20 °С. Относительный объем вредного пространства $\epsilon = 0,08$. Сжатие газа политропное, показатель политропного процесса сжатия $n = 1,26$; процесс расширения сжатого газа из вредного пространства адиабатный, постоянная адиабаты $k = 1,3$. Производительность компрессоров $V = 5 \cdot 10^{-3}$ м³/с при начальных параметрах и числе оборотов $\nu = 50$ об./с. Определите теоретическую мощность привода компрессора N_k , объемные КПД λ и объем цилиндров V : а) двухступенчатого; б) трехступенчатого компрессоров с промежуточным охлаждением между ступенями.

Ответы к §§ 4–6

4.1. $Q = 295 - 800 = -505$ кДж; знак *минус* указывает на то, что тепло в процессе сжатия отводится, $\Delta T = \frac{\Delta U \mu}{3\mu c_v} = 147,6$ К. **4.2.** $G = 4,208$ кг/с.

4.3. $T_2 = T_1 \left(\frac{p_2}{p_1} \right)^{\frac{n-1}{n}} = 1\,454,4$ К. Масса смеси газов, образующихся при сго-

рании 1 кг бензина $m_1 = 17,39$ кг. Массовый состав: $g_{\text{CO}_2} = \frac{3,135}{17,39} = 0,180$,

$g_{\text{H}_2\text{O}} = \frac{1,305}{17,39} = 0,075$, $g_{\text{O}_2} = \frac{0,34}{17,39} = 0,020$, $g_{\text{H}_2} = \frac{12,61}{17,39} = 0,725$; газовая постоян-

ная $R = \sum_{i=1}^{i=n} g_i R_i = 289$ Дж/(кг·К). Масса смеси газов, образующихся

в цилиндре при сгорании 2 г бензина: $m = 2 \cdot 10^{-3} \cdot m_1$ кг. Работа расширения:

$L = \frac{mR(T_1 - T_2)}{n-1} = 34\,197$ Дж. **4.4.** $p_1 V = RT_1$; $p_2 V = \frac{1}{4} RT_2$ или $\frac{p_1}{p_2} = 4 \frac{T_1}{T_2}$,

кроме того, $\frac{p_1}{p_2} = \left(\frac{T_1}{T_2} \right)^{\frac{n}{n-1}}$. Отсюда $\frac{T_1}{T_2} = 4^{(n-1)}$; $t_2 = -50,9$ °С. **4.5.** $n = 1,346$.

4.6. Воздух, заключенный в трубопровод, подвергнется быстрому сжатию, которое можно считать адиабатным. Температура воздуха в трубопроводе

повысится до $T_2 = 1\,344$ К. **4.7.** $Q = p_1 V \ln \left(\frac{p_1}{p_2} \right) = 2\,805,25$ кДж. **4.8.** $p_{2\text{ман}} =$

$= 21,56$ МПа; $\Delta U = \frac{c_v p_1 V \Delta T}{RT_1} = 694\,125$ Дж. **4.9.** Показатель политропы

$n = \frac{\ln \left(\frac{p_2}{p_1} \right)}{\ln \left(\frac{V_2}{V_1} \right)} = 1,262$. Работа процесса расширения $L = \frac{p_1 V_1 \left[1 - \left(\frac{V_1}{V_2} \right)^{n-1} \right]}{n-1} = 15\,274$ Дж.

Температура в конце процесса $T_2 = T_1 \left(\frac{p_2}{p_1} \right)^{\frac{n-1}{n}} = 249,72$ К. Количество теп-

лоты $Q = c_v \frac{(n-k) p_1 V}{(n-1) RT} (T_2 - T_1) = 5\,258$ Дж. Изменение внутренней энергии

$\Delta U = \varphi Q = \frac{n-1}{n-k} Q = -10\,016$ Дж. **4.10.** $v_1 = \frac{RT_1}{p_1} = 0,38$ м³/кг. Изменение

энтальпии газа $\Delta I = \mu c_p \Delta T = -37,1 \cdot 10^3 \cdot 98,6 = -3\,658$ кДж/кмоль. Изохорная молярная теплоемкость $\mu c_v = \mu c_p - R_\mu = 28,78$ кДж/(кмоль·К), показатель

адиабаты $k = \frac{\mu c_p}{\mu c_v} = 1,29$. Изменение внутренней энергии $\Delta U = \mu c_v \Delta T =$

$= -2\,837,7$ кДж/кмоль. Распределение энергии в процессе $\varphi = \frac{\Delta U}{Q} =$

$= \frac{-2\,837,7}{-2\,000} = 1,42$. Показатель политропного процесса $n = \frac{\varphi k - 1}{\varphi - 1} = 1,98$.

Работа в процессе $L = Q - \Delta U = 837,7$ кДж/кмоль. Молярная теплоемкость

газа $\mu c = \frac{\mu c_v (nk - 1)}{n - 1} = 20,28$ кДж/(кмоль·К). Температура в конце про-

цесса $T_2 = 400 - 98,6 = 301,4$ К. Изменение энтропии газа $\Delta S = \mu c \ln \frac{T_2}{T_1} =$

$= -5\,739$ кДж/кмоль; $p_2 = p_1 \left(\frac{T_2}{T_1} \right)^{\frac{n}{n-1}} = 0,113$ МПа; $v_2 = v_1 \left(\frac{T_1}{T_2} \right)^{\frac{1}{n-1}} = 0,507$ м³/кг.

4.11. Рассмотрите сначала изохорный процесс нагревания, потом после открытия клапана изобарный процесс нагревания, затем изохорный процесс охлаждения газа; $m_1 = 8,454$ кг; $m_2 = 4,1$ кг; $\Delta U = -955\,539$ Дж; $\Delta I = -1\,228\,081$ Дж.

5.1. В продуктах горения смеси бензол-воздух находится большая доля азота. Для упрощения расчетов примем $k = 1,4$. Так как $\beta = \frac{p_2}{p_1} = \frac{0,096}{0,12} =$

$= 0,8 > \beta_{кр} = 0,528$, то истечение смеси будет происходить в дозвуковой области. Отверстия предохранительных клапанов должны обеспечить мас-

совый расход продуктов горения: $G = \frac{\Delta V}{v_1 \tau} = \frac{16,5}{5,35 \cdot 0,2} = 15,42$ кг/с.

Необходимую площадь мембранных предохранительных клапанов опреде-

лим по формуле $f = \frac{G}{\mu \sqrt{2 \frac{kp_1}{(k-1)v_1} \left(\beta^{\frac{2}{k}} - \beta^{\frac{k+1}{k}} \right)}} = 0,262$ м². **5.2.** $G = 3,874$ кг/ч.

5.3. 1. $\beta = 0,025 < \beta_{кр} = 0,546$; 2. $G_{\max} = 3,868$ кг/с; 3. $\tau = 43,4$ с. **5.4.** Скорость воздуха 310,6 м/с; скорость Н₂ = 1 181,8 м/с; скорость СО₂ = 248 м/с.

5.5. $p_1 = p_{кр} = 0,191$ МПа; $T_1 = 288,2$ К. **5.6.** $\beta = 0,00625 < \beta_{кр}$; $G_{\max} = 0,09$ кг/с; $f = 2,68$ мм². **5.7.** $f_{\text{CO}_2} = 135,5$ мм²; $f_{\text{N}_2} = 165,4$ мм²; $f_{\text{H}_2\text{O}} = 222,2$ мм².

5.8. $\tau = 66,6$ с. **6.1.** $L_{\text{ад}} = \frac{k}{k-1} p_1 V_1 \left[\left(\frac{p_2}{p_1} \right)^{\frac{k-1}{k}} - 1 \right] = \frac{1,4}{0,4} 10^5 \cdot 1 \left(5^{\frac{0,4}{1,4}} - 1 \right) = 204,324$ кДж.

6.2. $k = 1,29$; $R = \frac{8314}{17} = 489$ Дж/(кг·К); удельная массовая работа сжатия

$$l_{\text{ад}} = \frac{k}{k-1} R T_1 \left[\left(\frac{p_2}{p_1} \right)^{\frac{k-1}{k}} - 1 \right] = \frac{1,29}{0,29} 489^5 \cdot 263 \left[\left(\frac{1,2}{0,25} \right)^{\frac{0,29}{1,29}} - 1 \right] = 240 \text{ кДж/кг.}$$

Массовый расход аммиака $G = 460 \cdot 0,76 = 350$ кг/ч, здесь $\rho_0 = \frac{17}{22,4} = 0,76$ кг/нм³ –

плотность аммиака при нормальных условиях. Потребляемая компрессором мощность $N_{\text{к}} = \frac{G l_{\text{ад}}}{\eta} = \frac{350 \cdot 240\,000}{3\,600 \cdot 0,7} = 33,4$ кВт. Температура в конце

сжатия $T_2 = T_1 \left(\frac{p_2}{p_1} \right)^{\frac{k}{k-1}} = 374$ К. **6.3.** Объемный КПД компрессора

$$\lambda = 1 - \varepsilon \left[\left(\frac{p_2}{p_1} \right)^{\frac{1}{k}} - 1 \right], \text{ где } \varepsilon = 0,085. \text{ Производительность компрессора равна}$$

нулю, когда его объемный КПД равен нулю. Отсюда $\left(\frac{p_2}{p_1} \right)^{\frac{1}{1,29}} = 12,76$;

$p_2 = 26,7 \cdot 0,2 = 5,34$ МПа. **6.4.** 1а) $t_1 = 312$ °С; $l = 363,065$ кДж/кг; 2а) $t_1 = 417$ °С; $l = 398,373$ кДж/кг. Возгорание пыли возможно, так как $t_1 > t_{\text{св}}$; 1б) $t_1 = 141$ °С; $l = 300,933$ кДж/кг; 2б) $t_1 = 177$ °С; $l = 314,406$ кДж/кг. Возгорание пыли не произойдет, так как $t_1 < t_{\text{св}}$. **6.5.** Отношение давлений

на входе и выходе для одной ступени: $x = \frac{p_3}{p_2} = \frac{p_2}{p_1} = \sqrt{\frac{p_3}{p_1}} = \sqrt{\frac{15}{1}} = 3,873$.

Работа, затрачиваемая на каждую ступень за 1 с (мощность на одну ступень N_1):

$$L_1 = \frac{n}{n-1} p_1 V_1 \left[\left(\frac{p_2}{p_1} \right)^{\frac{n-1}{n}} - 1 \right] = 124,4 \text{ Вт. Мощность двигателя компрессора:}$$

$N_{\text{к}} = z L_1 = 248,8$ Вт. Температура кислорода в конце политропного сжатия

в 1-й (2-й) ступени: $T_2 = T_1 \left(\frac{p_2}{p_1} \right)^{\frac{n-1}{n}} = 384$ К. Массовая подача компрессора:

$G = \frac{p_1 V}{RT_1} = 1,05 \cdot 10^{-3}$ кг/с. Количество тепла, отводимого за 1 с от кислорода

в цилиндре одной ступени: $Q_1 = \frac{G c_{pO_2} (n-k)(T_2 - T_1)}{n-1} = -37,765$ Вт.

Количество тепла, отводимого за 1 с от воздуха в промежуточном холодильнике, составит: $Q_2 = \frac{G c_{p.B} (T_1 - T_2)}{n-1} \approx -96$ Вт. Общее количество отводи-

мого за 1 с тепла: $Q = zQ_1 + Q_2 = 171,55$ Вт. **6.6.** Теоретическая работа рассчи-

тывается по формуле $l = \frac{n}{n-1} p_1 \left[\left(\frac{p_2}{p_1} \right)^{\frac{n-1}{n}} - 1 \right]$. Тогда: а) $l = 25\,879$ Дж/м³;

б) $l = 40\,800$ Дж/м³; в) $l = 37\,972$ Дж/м³. **6.7.** $N_k = 345$ Вт. **6.8.** $N_k = 19,637$ Вт; $V_{1(I)} = 5,645 \cdot 10^{-3}$ м³; $V_{1(II)} = 2,67 \cdot 10^{-3}$ м³; $N_{одн} = 22,11$ кВт. **6.9.** а) $N_k = 3,096$ кВт; $\lambda = 0,545$; $V_{1(I)} = 1,835 \cdot 10^{-4}$ м³; $V_{1(II)} = 1,66 \cdot 10^{-5}$ м³; б) $N_k = 2,835$ кВт; $\lambda = 0,796$; $V_{1(I)} = 1,256 \cdot 10^{-4}$ м³; $V_{1(II)} = 2,538 \cdot 10^{-5}$ м³; $V_{1(III)} = 5,03 \cdot 10^{-6}$ м³.

§ 7. Расчет термодинамических процессов изменения состояния пара

Задачи 7.1–7.9

7.1. Манометр, установленный на магистральном трубопроводе стационарной установки парового пожаротушения, показывает давление сухого насыщенного пара Н₂О $p_{ман} = 0,07$ МПа. С какими параметрами t , v , i , s , u будет поступать пар в распределительный перфорированный трубопровод, если барометрическое давление $p_{бар} = 0,1$ МПа?

7.2. Систему парового пожаротушения можно подключить к технологическому паропроводу, в котором водяной пар со степенью сухости $x = 0,96$ находится под давлением $p = 0,3$ МПа. С какой температурой t и плотностью ρ пар будет поступать в распределительный трубопровод при включении установки в действие?

7.3. Для тушения пожара в сушильную камеру объемом $V = 120$ м³ подано 10 кг водяного пара Н₂О под давлением $p = 0,1$ МПа и степенью сухости $x = 0,97$. Определите концентрацию пара c в объеме сушильной камеры и необходимое количество пара V , чтобы концентрация его увеличилась до 35 % (об.).

7.4. В установку парового пожаротушения водяной пар Н₂О поступает при $p_1 = 0,14$ МПа и $t_1 = 150$ °С. При выходе в помещение пар расширяется по адиабатному закону до давления $p_2 = 0,1$ МПа. Определите объем пара V в конце расширения, если через установку его было подано 30 кг.

Оглавление

Введение	3
ТЕРМОДИНАМИКА	
§ 1. Термодинамические параметры состояния и уравнения состояния	
Задачи 1.1–1.9	4
§ 2. Смеси идеальных газов	
Задачи 2.1–2.9	5
§ 3. Теплоемкости газов	
Задачи 3.1–3.7	6
<i>Ответы к §§ 1–3</i>	7
§ 4. Политропные процессы	
Задачи 4.1–4.11	9
§ 5. Адиабатное истечение газов	
Задачи 5.1–5.8	11
§ 6. Процессы сжатия газа в компрессоре	
Задачи 6.1–6.9	12
<i>Ответы к §§ 4–6</i>	14
§ 7. Расчет термодинамических процессов изменения состояния пара	
Задачи 7.1–7.9	17
§ 8. Истечение и дросселирование газов и паров	
Задачи 8.1–8.7	18
<i>Ответы к §§ 7–8</i>	19
§ 9. Смешение газов и паров. Влажный воздух	
Задачи 9.1–9.11	21
<i>Ответы к § 9</i>	23
§ 10. Циклы тепловых двигателей	
Задачи 10.1–10.13	24
§ 11. Циклы холодильных установок	
Задачи 11.1–11.18	27
<i>Ответы к §§ 10–11</i>	29
§ 12. Основы химической термодинамики	
Задачи 12.1–12.8	32
<i>Ответы к § 12</i>	34
ТЕПЛОПЕРЕДАЧА В ПОЖАРНОМ ДЕЛЕ	
§ 13. Стационарная теплопроводность	
Задачи 13.1–13.10	36
<i>Ответы к § 13</i>	37
§ 14. Граничные условия первого рода	
Задачи 14.1–14.9	38
§ 15. Граничные условия второго рода	
Задачи 15.1–15.7	39
§ 16. Граничные условия третьего рода	
Задачи 16.1–16.14	40
<i>Ответы к §§ 14–16</i>	42
§ 17. Теплоотдача при продольном обтекании плоской поверхности	
Задачи 17.1–17.6	56

§ 18. Теплоотдача при течении жидкости в каналах	
Задачи 18.1–18.12	57
§ 19. Теплоотдача при поперечном обтекании труб	
Задачи 19.1–19.6	59
<i>Ответы к §§ 17–19</i>	60
§ 20. Теплоотдача в неограниченном пространстве	
Задачи 20.1–20.6	66
§ 21. Теплоотдача в ограниченном пространстве	
Задачи 21.1–21.4	67
<i>Ответы к §§ 20–21</i>	67
§ 22. Теплообмен при кипении	
Задачи 22.1–22.8	70
§ 23. Теплообмен при конденсации пара	
Задачи 23.1–23.10	71
<i>Ответы к §§ 22–23</i>	72
§ 24. Конвективный теплообмен	
Задачи 24.1–24.4	76
<i>Ответы к § 24</i>	77
§ 25. Теплообмен излучением между твердыми телами, разделенными прозрачной средой	
Задачи 25.1–25.16	79
§ 26. Теплообмен излучением в поглощающей среде	
Задачи 26.1–26.4	82
<i>Ответы к §§ 25–26</i>	83
§ 27. Сложный теплообмен	
Задачи 27.1–27.7	92
<i>Ответы к § 27</i>	93
ТЕПЛОТЕХНИЧЕСКИЕ УСТРОЙСТВА. ПРОБЛЕМЫ ИСПОЛЬЗОВАНИЯ ТЕПЛОТЫ	
§ 28. Тепловой расчет теплообменных аппаратов	
Задачи 28.1–28.5	96
§ 29. Конструктивный расчет теплообменных аппаратов	
Задачи 29.1–29.5	97
§ 30. Поверочный расчет теплообменных аппаратов	
Задачи 30.1–30.4	98
<i>Ответы к §§ 28–30</i>	99
§ 31. Источники тепловой энергии	
Задачи 31.1–31.7	105
<i>Ответы к § 31</i>	106
Приложение.....	108
Литература	135

Учебное издание

ПУЗАЧ Сергей Викторович
ГОРЯЧЕВА Марина Николаевна
АНДРЕЕВ Владимир Викторович
КОЗЛОВ Юрий Иванович
ЛИМОНОВ Вячеслав Григорьевич

Задачник ПО ТЕПЛОТЕХНИКЕ

Учебное пособие

Редактор *Л. А. Маслова*
Технический редактор *Е. Н. Титкова*
Корректор *Л. А. Маслова*

Подписано в печать 20.06.2013. Формат 60×90 ¹/₁₆.
Печ. л. 8,5. Уч.-изд. л. 6,3. Бумага офсетная.
Тираж 400 экз. Заказ 305.

Академия ГПС МЧС России
129366, Москва, ул. Бориса Галушкина, 4