



ЗАДАЧНИК **по технической** **термодинамике** **и теории** **теплообмена**



bhv[®]



ЗАДАЧНИК по технической термодинамике и теории теплообмена

2-е издание, стереотипное

Под редакцией

В. И. Крутова и Г. Б. Петражицкого

**Допущено УМО вузов России по образованию в области
энергетики и электротехники в качестве учебного пособия
для студентов высших учебных заведений,
обучающихся по направлению подготовки 140500
"Энергомашиностроение"**

Санкт-Петербург

«БХВ-Петербург»

2011

УДК 536.7(075.8)

ББК 31.31я73

3-15

**Афанасьев В. Н., Исаев С. И., Кожин И. А., Корнейчук Н. К.,
Кофанов В. И., Крутов В. И., Леонтьев А. И., Миронов Б. М.,
Никитин В. М., Павлова И. Б., Петражицкий Г. Б., Пылаев А. М.,
Федотов Е. И., Хвостов В. И., Чукаев А. Г., Шишов Е. В.,
Югов В. П.**

3-15 Задачник по технической термодинамике и теории
теплообмена: учеб. пособие / В. Н. Афанасьев,
С. И. Исаев, И. А. Кожин и др.; Под ред. В. И. Крутова
и Г. Б. Петражицкого. — 2-е изд., стереотипное. — СПб.:
БХВ-Петербург, 2011. — 384 с.: ил. — (Учебная
литература для вузов)

ISBN 978-5-9775-0592-5

Книга содержит задачи, необходимые для практического усвоения курсов «Техническая термодинамика» и «Теория теплообмена». Все задачи имеют ответы, а типовые приведены с решениями. Значительное внимание уделено численным методам решения с помощью ЭВМ. В задачник включены девять домашних заданий с методическими указаниями по их выполнению.

Для студентов технических вузов

УДК 536.7(075.8)

ББК 31.31я73

ПРЕДИСЛОВИЕ

Решение задач повышения эффективности и интенсификации всех отраслей народного хозяйства требует ускоренного внедрения во все сферы промышленности и сельскохозяйственного производства последних достижений науки и техники. Важная роль в решении этих задач принадлежит энергетике, в теоретическую базу которой входят термодинамика и теория теплообмена.

Термодинамика является теоретической основой ряда специальных дисциплин и играет определяющую роль при подготовке инженеров широкого профиля.

Содержание задачника соответствует утвержденным учебным программам по курсам «Техническая термодинамика» и «Теория теплообмена» для энергомашиностроительных специальностей вузов. Для закрепления теоретических знаний, полученных на лекциях, в программах предусмотрено проведение практических занятий и выполнение домашних заданий. Издание задачника, являющегося учебным пособием, связано с необходимостью практического усвоения методов расчета термодинамических процессов и циклов, а также процессов тепло- и массообмена.

Методы решения большей части задач, составляющих содержание задачника, основаны на законах термодинамики и, в частности, на первом законе, являющемся конкретной формулировкой всеобщего закона сохранения и превращения энергии, открытие которого способствовало утверждению в науке диалектического метода познания природы и материалистического подхода к изучению явлений.

При составлении задач особое внимание обращалось на их техническое приложение. Типовые задачи приведены с решениями.

В соответствии с учебными программами в сборник включены задачи по газовым процессам при переменной теплоемкости, работоспособности термодинамических систем и эксергии, истечению из сосуда ограниченной вместимости, термодинамике безмашинного преобразования энергии, численным методам решения задач нестационарной теплопроводности с помощью ЭВМ, контактному теплообмену, теплообмену при течении жидкометаллических теплоносителей, расчету теплообмена методами теории пограничного слоя, теплообмену при больших скоростях и температурах газового потока, теплообмену при кипении и конденсации, а также радиационному теплообмену в поглощающих и излучающих средах, которым в существующих задачниках по термодинамике и теплопередаче уделялось относительно мало внимания. Эта тематика непосредственно

связана с авиационной и космической техникой, ядерной энергетикой, техникой безмашинного преобразования энергии, а также рядом других областей новой техники и охватывает широкий круг актуальных задач.

Одной из методических особенностей задачника является применение программ на языке ФОРТРАН для численного решения практически важных задач, не поддающихся решению точными методами.

В задачник включены также девять домашних заданий, охватывающих основные разделы курсов, и необходимые для решения задач справочные данные.

Задачник написан коллективом преподавателей кафедры теоретических основ теплотехники Московского ордена Ленина, ордена Октябрьской Революции и ордена Трудового Красного Знамени высшего технического училища им. Н. Э. Баумана. Задачи сгруппированы по главам. Последовательность расположения глав, форма изложения материала и содержание задач согласованы с учебниками «Техническая термодинамика» [21], «Теория тепломассообмена» [19] и «Курс химической термодинамики» [6], написанными коллективом той же кафедры, которые при подготовке задачника принимались в качестве базовых.

Материал книги распределен между авторами следующим образом: С. И. Исаев (гл. 8, § 9.4, 11.3); И. А. Кожин (§ 4.2, 14.2); Н. К. Корнейчук (гл. 7); В. И. Кофанов (§ 5.2, гл. 13, § 15.1, гл. 20, ДЗ-4) (ДЗ — домашнее задание); В. И. Крутов (гл. 1); Б. М. Миронов (гл. 6, § 19.1); В. М. Никитин (§ 11.2, 15.3, 18.1); И. Б. Павлова (гл. 10); Г. Б. Петражицкий (§ 14.3, гл. 17, ДЗ-7); А. М. Пылаев (§ 14.1, 14.4, ДЗ-6); Е. И. Федотов (Приложение); В. И. Хвостов (§ 3.2, 19.2, ДЗ-2); А. Г. Чукаев (ДЗ-5); Е. В. Шишов (гл. 2, § 5.1); В. П. Югов (§ 15.2, ДЗ-1, ДЗ-8); § 18.2 написан В. Н. Афанасьевым и Б. М. Мироновым, ДЗ-3 — С. И. Исаевым и А. М. Пылаевым, § 3.1, 11.1 — В. И. Крутовым и И. Б. Павловой, § 4.1, 4.3 — А. И. Леонтьевым и А. Г. Чукаевым, ДЗ-9 — Б. М. Мироновым и А. Г. Чукаевым, гл. 16 — И. Б. Павловой и Е. В. Шишовым, § 9.1, 9.2, 9.3 — Г. Б. Петражицким и А. М. Пылаевым, гл. 12 — В. И. Хвостовым и А. Г. Чукаевым совместно. Библиотека программ (см. Приложение) для расчета параметров состояния реального газа (азота) составлена В. П. Юговым.

Авторы выражают глубокую благодарность кафедре теоретических основ теплотехники МЭИ (завкафедрой д-р техн. наук, проф. В. В. Сычев) и д-ру техн. наук, проф. В. К. Кошкину за рецензирование задачника и ценные замечания, которые позволили повысить качество рукописи.

Замечания и пожелания по улучшению книги просим присылать по адресу: 190005, Санкт-Петербург, Измайловский проспект, д. 29, издательство "БХВ-Петербург".

ГЛАВА I

**ПАРАМЕТРЫ СОСТОЯНИЯ
ТЕРМОДИНАМИЧЕСКОЙ СИСТЕМЫ. УРАВНЕНИЕ
СОСТОЯНИЯ ИДЕАЛЬНОГО ГАЗА***

1.1. Определить барометрическое давление при 0 °С в гектопаскалях (гПа), если ртутный барометр при 30 °С показывает 755 мм рт. ст.

Р е ш е н и е. При измерении давления высотой столба жидкости необходимо учитывать изменение ее плотности в зависимости от температуры среды. При отклонении температуры среды (следовательно, жидкости в приборе) от 0 °С следует вводить поправку на показание прибора. Для ртути эти поправки имеют следующие значения:

Температура среды, °С	±5	±10	±15	±20	±25	±30
Поправка в мм на						
1000 мм рт. ст.	0,87	1,72	2,59	3,45	4,31	5,17

Если ртутным барометром измерено давление при температуре среды t , °С, то

$$B_0 = B (1 \mp x/1000),$$

где B_0 — барометрическое давление при температуре 0 °С, мм рт. ст.; B — барометрическое давление при температуре t , °С; x — поправка, мм рт. ст. (П р и м е ч а н и е. В тех задачах, в которых температура среды не указывается, барометрическое давление следует считать уже приведенным к 0 °С).

Для данной задачи $B_0 = 755 (1 - 5,17/1000) = 751,1$ мм рт. ст. Так как 1 гПа = 100 Па, то 1 гПа соответствует $750,06 \cdot 10^{-3}$ мм рт. ст. (табл. 1.1). Следовательно, барометрическое давление, приведенное к 0 °С и выраженное в гектопаскалях, составляет $751,1/(750,06 \cdot 10^{-3}) = 1001,4$ гПа.

1.2. Для условий задачи 1.1 выразить приведенное барометрическое давление в следующих единицах: ат, атм, мм вод. ст., кгс/м², бар.

* При расчете параметров состояния реальных газов целесообразно использовать ЭВМ. В Приложении приведена библиотека ФОРТРАН-программ для расчета термодинамических и теплофизических свойств азота в диапазоне температур 65—1500 К и давлений 0,1—100 МПа.

Таблица 1.1

Единица	Килограмм-сила на квадратный метр (кгс/м ²)	Паскаль (Па)	Техническая атмосфера (ат)	Физическая атмосфера (атм)
1 кгс/м ²	1	9,80665	$1 \cdot 10^{-4}$	$0,96783 \cdot 10^{-4}$
1 Па	0,101972	1	$0,101972 \cdot 10^{-4}$	$0,986923 \cdot 10^{-5}$
1 ат	$1 \cdot 10^4$	$9,80665 \cdot 10^4$	1	0,96783
1 атм	$1,03323 \cdot 10^4$	$1,01235 \cdot 10^5$	1,03323	1
1 бар	10197,2	$1 \cdot 10^5$	1,01972	1,01972
1 мм рт. ст.	13,595	133,322	$13,56 \cdot 10^{-4}$	$13,16 \cdot 10^{-4}$
1 мм вод. ст.	1	9,80665	$1 \cdot 10^{-4}$	$0,96784 \cdot 10^{-4}$

Продолжение табл. 1.1

Единица	Бар	Миллиметр ртутного столба (мм рт. ст.)	Миллиметр водяного столба (мм вод. ст.)
1 кгс/м ²	$9,80665 \cdot 10^{-5}$	$735,55 \cdot 10^{-4}$	1
1 Па	$1 \cdot 10^{-5}$	$750,06 \cdot 10^{-5}$	0,101972
1 ат	0,980665	735,55	$1 \cdot 10^4$
1 атм	1,01325	760	$1,03323 \cdot 10^4$
1 бар	1	750,06	10197,2
1 мм рт. ст.	0,001333	1	13,595
1 мм вод. ст.	$0,980665 \cdot 10^{-4}$	$735,55 \cdot 10^{-4}$	1

1.3. В процессе сжатия в компрессоре давление воздуха в некоторые моменты составляло $4 \cdot 10^3$ кгс/м², 6000 кгс/м² и 0,8 кгс/см². Выразить наибольшее из указанных давлений в мегапаскалях (МПа), а наименьшее — в мм рт. ст. Вычислить среднее арифметическое трех значений давления и выразить его в физических атмосферах и барах.

1.4. В трубке манометра 1 (рис. 1.1), соединяющейся с окружающей средой, имеется столб воды высотой 50 мм (избыточное давление). Определить давление p в ресивере 2 и выразить его в килопаскалях (кПа), если разность уровней ртути в манометре составляет 120 мм, а барометрическое давление $B = 0,95$ атм.

1.5. Из ресивера 1 (рис. 1.2) воздух поступает в коллектор двигателя 2. Разрежение в ресивере измеряется вакуумметром с наклонной трубкой. Угол наклона трубки к горизонтали 30° , вакуумметр заполнен водой. Определить давление p (Па) в ресивере, если показание вакуумметра

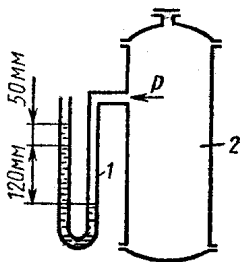


Рис. 1.1

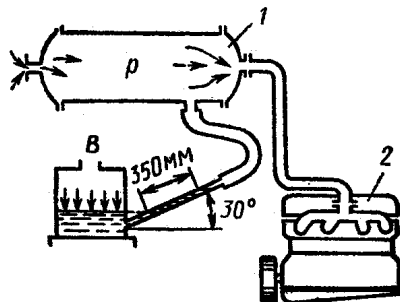


Рис. 1.2

$p_{\text{вак}} = 350$ мм вод. ст. (разрежение), а давление окружающей среды $B = 1000$ гПа.

1.6. Для пуска двигателя внутреннего сгорания (ДВС) используется сжатый воздух, хранящийся в баллоне. Определить отношение давлений в баллоне до и после пуска ДВС, если до пуска показание манометра было $p_{1\text{изб}} = 54 \cdot 10^5$ Па, а после пуска $p_{2\text{изб}} = 29,4 \cdot 10^5$ Па. Барометрическое давление 742 мм рт. ст. при температуре 293,15 К.

1.7. Давление пара на входе в турбину 2 (рис. 1.3) атомной электростанции (АЭС) по паспортным данным $p_0 = 6,65$ МПа. Давление пара на выходе из реактора 1

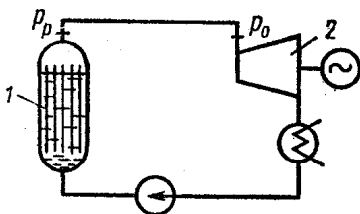


Рис. 1.3

измерено манометром, градуированным в технических атмосферах, и равно $p_{\text{изб}} = 68,6$ ат при показании барометра в помещении АЭС $B = 745$ мм рт. ст. Для обеспечения соблюдения паспортных данных турбины оценить максимально допустимую потерю давления Δp (МПа) в трубопроводе.

1.8. Определить давление на днище контейнера ракеты, установленной на подводной лодке, если днище находится на глубине 15,5 м, барометрическое давление при температуре 253,15 К составляет 0,1 МПа.

1.9. По данным испытаний паровой турбины, разрежение в ее конденсаторе составляет 94 % при барометрическом давлении 97 кПа и 0 °С. Каково давление в конденсаторе?

1.10. Давление в конденсаторе паровой турбины по паспортным данным 4 кПа. Каково значение разрежения

(%), если турбина работает при условиях: $B = 96$ кПа при $t = 25^\circ\text{C}$?

1.11. В машинном отделении атомохода давление по водяному манометру 100 мм вод. ст. Барометр на палубе показывает 750 мм рт. ст. Показание манометра на выходе из парогенератора 19 ат, показание вакуумметра конденсатора 640 мм рт. ст. (парогенератор и конденсатор расположены в машинном отделении). Определить давление (Па) в машинном отделении, на выходе из парогенератора и в конденсаторе.

1.12. Определить барометрическое давление, плотность и температуру воздуха на высоте 9500 м, если известно, что на уровне моря давление составляет 101 325 Па, а температура 273,15 К.

Решение. С подъемом на высоту барометрическое давление, плотность и температура понижаются. В пределах тропосферы (до высоты 11 км) законы понижения этих величин могут быть описаны следующими формулами:

$$B_T = B'_0 (1 - H/44\,300)^{5,256},$$

где B_T — барометрическое давление в тропосфере при температуре 0°C , мм рт. ст.; B'_0 — барометрическое давление на уровне моря при температуре 0°C , мм рт. ст.; H — высота над уровнем моря, м;

$$\rho_T = \rho_0 (1 - H/44\,300)^{4,256},$$

где ρ_T — плотность воздуха в тропосфере, $\text{кг}/\text{м}^3$; ρ_0 — плотность воздуха на уровне моря, $\text{кг}/\text{м}^3$;

$$T_T = T_0 - 0,0065H,$$

где T_T — температура воздуха в тропосфере, К; T_0 — температура воздуха на уровне моря, К.

Для данной задачи:

$$B_T = 101\,325 (1 - 9500/44\,300)^{5,256} = 0,285 \cdot 10^5 \text{ Па.}$$

Из уравнения состояния идеального газа:

$$\rho_0 = B'_0 / (RT_0) = 101\,325 / (287 \cdot 273,15) = 1,29 \text{ кг}/\text{м}^3.$$

Здесь $R = 287$ Дж/(кг·К) — удельная газовая постоянная воздуха.

$$\rho_T = 1,29 (1 - 9500/44\,300)^{4,256} = 0,462 \text{ кг}/\text{м}^3;$$

$$T_T = 273,15 - 0,0065 \cdot 9500 = 211,4 \text{ К.}$$

1.13. В помещении летательного аппарата, на борту которого установлена барокамера, давление по водяному манометру 50 мм вод. ст. В барокамере создано разрежение 180 мм рт. ст. Найти давление в барокамере в момент, когда летательный аппарат находится на высоте 6 км над уровнем моря. Давление атмосферы на уровне моря 1013 гПа.

1.14. Избыточное давление в баллоне, заполненном кислородом, составляет $p_{\text{изб}} = 40$ ат. Определить избыточное давление кислорода $p'_{\text{изб}}$ (Па) в баллоне после подъема его на высоту 8000 м, если барометрическое давление на уровне моря 770 мм рт. ст. при температуре 303,15 К.

1.15. После пуска ДВС давление сжатого воздуха в пусковом баллоне понизилось от 3,5 до 2,9 МПа. Определить объем израсходованного воздуха при температуре и давлении окружающей среды 18 °С и 1008 гПа, если вместимость пускового баллона 0,2 м³, температура воздуха в баллоне до пуска 18 °С, а после пуска 10 °С.

Р е ш е н и е. Масса израсходованного воздуха:

$$m_1 = p_1 V / (RT_1) = 3500 \cdot 0,2 / (0,287 \cdot 291) = 8,38 \text{ кг};$$

$$m_2 = p_2 V / (RT_2) = 2900 \cdot 0,2 / (0,287 \cdot 283) = 7,14 \text{ кг};$$

$$m = m_1 - m_2 = 8,38 - 7,14 = 1,24 \text{ кг}.$$

Объем израсходованного воздуха

$$V_0 = mRT_0 / p_0 = 1,24 \cdot 0,287 \cdot 291 / 100,8 = 1,028 \text{ м}^3.$$

1.16. В баллоне вместимостью 0,10 м³ находится кислород при давлении 6 МПа и температуре 25 °С. После того как из него была выпущена часть газа, показание манометра стало 3 МПа, а температура кислорода понизилась до 15 °С. Определить массу выпущенного и плотность оставшегося в баллоне кислорода, если давление окружающей среды 1000 гПа.

1.17. В резервуар вместимостью 8,5 м³ компрессор подает воздух при температуре 15 °С и давлении 988 гПа. За какое время компрессор, подача которого составляет 3 м³/мин, наполнит резервуар до давления $p_{\text{изб}} = 1,8$ МПа, если температура воздуха в резервуаре при указанном давлении 47 °С? Перед накачиванием резервуар был сообщен с атмосферой.

1.18. Баллон вместимостью 0,055 м³ наполнен углекислым газом (СО₂). Давление сжатого газа по манометру $p_{\text{изб}} = 15$ МПа. Определить температуру сжатого газа, если его объем при нормальных условиях* составляет $V^n = 7,5$ м³.

* Нормальные условия в дальнейшем обозначены н. у.

1.19. Давление в барокамере, имеющей размеры $2 \times 2 \times 1$ м, измерено манометром и равно $p_{\text{изб}} = 200$ гПа, температура 17°C . Определить массу воздуха, которую необходимо откачать из барокамеры, чтобы создать в ней разрежение $p_{\text{вак}} = 420$ гПа, не изменяя температуры. Барометрическое давление равно 1008 гПа.

1.20. Определить плотность углекислого газа при н.у.

1.21. Молярный объем некоторого двухатомного газа при давлении $p = 0,02$ МПа и температуре T в три раза больше, чем при н.у. Определить эту температуру. Какой это газ, если его плотность при указанных p и T равна $0,4167$ кг/м³?

1.22. Масса баллона с газом $m_1 = 2,9$ кг, при этом давление в баллоне по манометру $p_1 = 4$ МПа. После израсходования части газа при неизменной температуре давление в баллоне понизилось до $p_2 = 1,5$ МПа, при этом масса баллона с газом уменьшилась до $m_2 = 1,4$ кг. Определить плотность газа при давлении 1013 гПа, если вместимость баллона $0,5$ м³.

1.23. В поршневом компрессоре газ сжимается при движении поршня по направлению к днищу цилиндра; сжатый газ подается в резервуар высокого давления. Объем цилиндров $0,012$ м³. Определить частоту вращения вала компрессора n , с⁻¹, если на нагнетание воздуха в резервуар вместимостью $1,2$ м³ до давления 4 МПа при температуре окружающей среды затрачено 10 мин, а начальное давление в резервуаре равно 0,8 МПа, температура и давление окружающей среды 10°C и 0,1 МПа.

1.24. Турбореактивный самолет летит на высоте 5500 м над уровнем моря. Температура и давление газов на входе в турбину равны 715°C и 0,45 МПа. Определить избыточное давление газов на выходе из турбины, если температура газов в этом сечении 388°C , а плотность в 4,5 раза меньше, чем на входе в турбину. Давление атмосферы на уровне моря 1000 гПа. Считать, что газы имеют физические свойства воздуха.

1.25. На АЭС работает газотурбинная установка (ГТУ) закрытого типа, использующая в качестве рабочего тела углекислый газ. Температура газа на входе в турбину 550°C , давление 8 МПа. Мощность установки 230 МВт, удельный расход рабочего тела составляет $55 \cdot 10^3$ кг/(МВт·ч). Определить объемную подачу компрессора V^n (м³/мин) при н. у., плотность газа на входе в турбину и необходимую площадь выходного сечения соплового аппарата, если скорость выте-

кающих из него газов при указанных параметрах равна 90 м/с.

Р е ш е н и е. Массовый расход углекислого газа в установке

$$M = 230 \cdot 55 \cdot 10^3 = 12,65 \cdot 10^6 \text{ кг/ч} = 3514 \text{ кг/с.}$$

Объемная подача компрессора при н. у.

$$V^n = 60MRT^n/p^n = 60 \cdot 3514 \cdot 8,314 \cdot 273 / (44 \cdot 101,33) = \\ = 10,73 \cdot 10^4 \text{ м}^3/\text{мин.}$$

Плотность углекислого газа на входе в турбину

$$\rho = p/(RT) = 8000 \cdot 44 / [8,314 (550 + 273)] = 51,47 \text{ кг/м}^3.$$

Площадь выходного сечения соплового аппарата

$$F = M/(\rho w) = 3514 / (51,47 \cdot 90) = 0,758 \text{ м}^2.$$

1.26. ДВС мощностью 120 кВт расходует 0,024 кг топлива на 1 кг рабочего тела. Определить объемный расход ($\text{м}^3/\text{с}$) рабочего тела, если удельный расход топлива составляет 190 г/(кВт·ч). Воздух всасывается в цилиндры ДВС из помещения с параметрами $p = 1000$ гПа, $T = 290$ К. Считать, что рабочее тело имеет физические свойства сухого воздуха.

1.27. Определить подъемную силу воздушного шара, имеющего баллон объемом 4000 м^3 и заполненного водородом. Давление и температура окружающего воздуха 1013 гПа и 273 К. Массой оболочки пренебречь; считать, что давление и температура водорода и окружающего воздуха одинаковы.

1.28. Расход пропана ($\text{CH}_3\text{CH}_2\text{CH}_3$) для газовых горелок в химической лаборатории составляет $0,27 \text{ м}^3$ за рабочую неделю. Пропан поставляется в баллонах вместимостью $12 \cdot 10^{-4} \text{ м}^3$, заполняемых на станции при температуре 10°C до давления 6 МПа. Хранение и потребление пропана в лаборатории происходит при температуре 22°C и барометрическом давлении 1000 гПа. Сколько баллонов с пропаном необходимо иметь в неделю? Каково максимальное показание манометра, присоединенного к баллону с пропаном в лаборатории?

1.29. Масса воздуха, заключенного между днищем цилиндра и поршнем, 0,5 кг. Диаметр цилиндра 0,5 м, давление и температура внутри цилиндра 0,35 МПа и 400 К. При

неизменном давлении движущийся без трения поршень перемещается на 20 см. Определить начальное расстояние поршня от днища цилиндра и температуру в цилиндре после перемещения поршня.

ГЛАВА 2

ТЕПЛОЕМКОСТЬ, ВНУТРЕННЯЯ ЭНЕРГИЯ И ЭНТАЛЬПИЯ ИДЕАЛЬНОГО ГАЗА. СМЕСИ ГАЗОВ

2.1. Коэффициент Пуассона для двухатомных газов равен 1,4. Определить, какое количество теплоты требуется для нагревания 5 м^3 газа на 200 градусов при постоянном объеме и н. у.

2.2. Подсчитать массовую теплоемкость кислорода O_2 и объемную теплоемкость (при н. у.) двуокиси азота NO_2 при $p = \text{const}$, если молярная теплоемкость μ_{c_v} , кДж/(кмоль·К), одноатомного газа — 12,6, двухатомного — 20,9, трех- и многоатомного — 29,3.

2.3. Исходя из заданной зависимости истинной молярной теплоемкости [кДж/(кмоль·К)] водорода от температуры

$$\mu_{c_v} = 20,8034 + 0,838 \cdot 10^{-3} T - 2,0112 \cdot 10^{-6} T^2,$$

вычислить значения следующих истинных теплоемкостей водорода при $T = 473 \text{ К}$: μ_{c_p} , кДж/(кмоль·К); c_p и c_v , кДж/(кг·К); c'_p и c'_v , кДж/(м³·К).

2.4. Построить график зависимости истинной массовой теплоемкости водяного пара от температуры в интервале 100 ... 400 °С, если известна зависимость истинной молярной теплоемкости [кДж/(кмоль·К)] пара от температуры:

$$\mu_{c_p} = 36,9 - 0,00797T + 0,93 \cdot 10^{-5} T^2.$$

Пользуясь полученными результатами, подсчитать среднюю массовую теплоемкость водяного пара при $v = \text{const}$ в указанном интервале температур и сравнить со значением, взятым из табл. 2 Приложения.

2.5. Найти изменение внутренней энергии 20 кг ацетиленна при изменении его температуры от 300 до 600 °С, если зависимость истинной молярной теплоемкости [кДж/(кмоль × К)] ацетиленна от температуры выражается уравнением

$$\mu_{c_p} = 26,8696 + 64,0232 \cdot 10^{-3} T - 23,1288 \cdot 10^{-6} T^2.$$

2.6. Углекислый газ находится в емкости вместимостью 200 л при давлении 0,35 МПа и температуре 100 °С. Подсчитать изменение внутренней энергии газа при увеличении его температуры до 200 °С, если известны следующие значения средних молярных теплоемкостей углекислого газа:

$$\mu c_p \Big|_0^{100} = 38,118 \text{ кДж}/(\text{кмоль} \cdot \text{К});$$

$$\mu c_p \Big|_0^{200} = 40,065 \text{ кДж}/(\text{кмоль} \cdot \text{К}).$$

Р е ш е н и е. Средняя молярная теплоемкость в интервале температур от 100 до 200 °С

$$\begin{aligned} \mu c_p \Big|_{t_1}^{t_2} &= \left[\mu c_p \Big|_0^{t_2} - \mu c_p \Big|_0^{t_1} \right] / (t_2 - t_1) = \mu c_p \Big|_{100}^{200} = \\ &= (40,065 \cdot 200 - 38,118 \cdot 100) / (200 - 100) = \\ &= 42,0121 \text{ кДж}/(\text{кмоль} \cdot \text{К}). \end{aligned}$$

Следовательно, средняя объемная теплоемкость при $v = \text{const}$

$$\begin{aligned} c'_v \Big|_{t_1}^{t_2} &= \mu c_p \Big|_{t_1}^{t_2} - \mu R / (\mu v^n) = c'_v \Big|_{100}^{200} = (42,0121 - 8,314) / 22,4 = \\ &= 1,5043 \text{ кДж}/(\text{кмоль} \cdot \text{К}). \end{aligned}$$

Объем, занимаемый газом, приведенный к н. у.,

$$\begin{aligned} v^n &= p v T^n / (p^n T) = (0,35 \cdot 10^3 \cdot 0,2 \cdot 273) / (101,33 \cdot 373) = \\ &= 0,506 \text{ м}^3 \end{aligned}$$

и тогда

$$\begin{aligned} \Delta U &= v^n c'_v \Big|_{t_1}^{t_2} (t_2 - t_1) = 0,506 \cdot 1,5043 (200 - 100) = \\ &= 7612 \text{ кДж}. \end{aligned}$$

2.7. Воздух при нормальном давлении $p_0 = 0,5$ МПа и температуре $t_0 = 300$ °С адиабатно расширяется до давления 0,1 МПа. Определить изменение его внутренней энергии и энтальпии.

Р е ш е н и е. Температура воздуха в конце расширения

$$\begin{aligned} T &= T_0 (p/p_0)^{(k-1)/k} = 573 [1 \cdot 10^5 / (5 \cdot 10^5)]^{0,4/1,4} = \\ &= 361,8 \text{ К} = 88,8^\circ\text{С}. \end{aligned}$$

По табл. 2 Приложения находим значения средних молярных теплоемкостей при $p = \text{const}$

$$\mu c_p \int_0^{300} = 29,525 \text{ кДж}/(\text{кмоль} \cdot \text{К});$$

$$\mu c_p \int_0^{88,8} = 29,147 \text{ кДж}/(\text{кмоль} \cdot \text{К}).$$

Значения средних массовых теплоемкостей определяем по формулам:

$$c_p \int_0^{300} = \mu c_p \int_0^{300} / \mu_B = 29,525 / 28,29 = 1,044 \text{ кДж}/(\text{кг} \cdot \text{К});$$

$$c_p \int_0^{88,8} = \mu c_p \int_0^{88,8} / \mu_B = 29,147 / 28,29 = 1,03 \text{ кДж}/(\text{кг} \cdot \text{К}).$$

где $\mu_B = 28,29$ кг/кмоль.

Используя формулу Майера, находим

$$\begin{aligned} \mu c_p \int_0^{300} &= \mu c_p \int_0^{300} - \mu R = 29,525 - 8,314 = \\ &= 21,21 \text{ кДж}/(\text{кмоль} \cdot \text{К}); \end{aligned}$$

$$c_v \int_0^{300} = \mu c_p \int_0^{300} / \mu_B = 0,7497 \text{ кДж}/(\text{кг} \cdot \text{К});$$

$$\begin{aligned} \mu c_v \int_0^{88,8} &= \mu c_p \int_0^{88,8} - \mu R = 29,147 - 8,314 = \\ &= 20,833 \text{ кДж}/(\text{кмоль} \cdot \text{К}); \end{aligned}$$

$$c_v \int_0^{8,88} = \mu c_v \int_0^{88,8} / 28,29 = 0,736 \text{ кДж}/(\text{кг} \cdot \text{К}).$$

Изменение внутренней энергии

$$\begin{aligned} \Delta u &= c_v \int_0^{88,8} T - c_v \int_0^{300} T_0 = 0,736 \cdot 88,8 - 0,7497 \cdot 300 = \\ &= -159,55 \text{ кДж}/\text{кг}. \end{aligned}$$

Изменение энтальпии

$$\begin{aligned} \Delta i &= c_p \int_0^{88,8} T - c_p \int_0^{300} T_0 = 1,03 \cdot 88,8 - 1,044 \cdot 300 = \\ &= -221,74 \text{ кДж}/\text{кг}. \end{aligned}$$

2.8. При расширении 2,5 кг воздуха температура его изменяется от 500 до 200 °С. Определить изменение внутренней энергии воздуха, пользуясь таблицами Приложения: а) считая среднюю теплоемкость воздуха не зависящей от температуры; б) учитывая зависимость средней теплоемкости от температуры.

2.9. Кислород занимает объем 2 м³ и имеет параметры 500 °С и 0,65 МПа. Определить конечные значения температуры и плотности газа, если в изобарном процессе его внутренняя энергия уменьшилась на 2500 кДж. Определить также изменение энтальпии кислорода.

2.10. Расход воздуха через теплообменник составляет 150 м³/ч (н. у.). Воздух нагревается от 20 до 300 °С. Определить изменение внутренней энергии и энтальпии воздуха в теплообменнике, пользуясь таблицами Приложения: а) по средним теплоемкостям; б) по значениям внутренней энергии и энтальпии.

2.11. Объемные доли компонентов смеси идеальных газов: 25 % CO₂ и 75 % O₂. Давление смеси равно 0,085 МПа, температура 100 °С. Найти парциальные давления компонентов, массовые доли компонентов, молярную массу и газовую постоянную смеси, а также плотность смеси при н. у. и условиях, указанных в задаче.

Р е ш е н и е. Парциальные давления компонентов

$$p_{\text{CO}_2} = r_{\text{CO}_2} p_{\text{см}} = 0,25 \cdot 0,085 = 0,02125 \text{ МПа};$$

$$p_{\text{O}_2} = r_{\text{O}_2} p_{\text{см}} = 0,75 \cdot 0,085 = 0,063 \text{ МПа}.$$

Массовые доли компонентов:

$$g_{\text{CO}_2} = (\mu_{\text{CO}_2} r_{\text{CO}_2}) / (\mu_{\text{CO}_2} r_{\text{CO}_2} + \mu_{\text{O}_2} r_{\text{O}_2}) = \\ = (44 \cdot 0,25) / (44 \cdot 0,25 + 32 \cdot 0,75) = 0,314;$$

$$g_{\text{O}_2} = (\mu_{\text{O}_2} r_{\text{O}_2}) / (\mu_{\text{CO}_2} r_{\text{CO}_2} + \mu_{\text{O}_2} r_{\text{O}_2}) = \\ = (32 \cdot 0,75) / (44 \cdot 0,25 + 32 \cdot 0,75) = 0,686.$$

Молярная масса смеси

$$\mu_{\text{см}} = \mu_{\text{CO}_2} r_{\text{CO}_2} + \mu_{\text{O}_2} r_{\text{O}_2} = 44 \cdot 0,25 + 32 \cdot 0,75 = \\ = 32 \text{ кг/кмоль}.$$

Газовая постоянная смеси

$$R_{\text{см}} = 8,314 / \mu_{\text{см}} = 8,314 / 32 = 0,238 \text{ кДж/(кг} \cdot \text{К)}.$$

Плотность смеси

$$\rho_{\text{см}} = p_{\text{см}} / (R_{\text{см}} T_{\text{см}}) = 0,085 \cdot 10^3 / (0,238 \cdot 378) = 0,957 \text{ кг/м}^3.$$

Плотность смеси при н. у.

$$\rho_{\text{см}}^{\text{н}} = \mu_{\text{см}} / (\mu v^{\text{н}}) = 35 / 22,4 = 1,562 \text{ кг/м}^3.$$

2.12. Для смеси газов из предыдущей задачи найти: истинные молярную массовую и объемную (при н. у.) теплоемкости смеси для температуры 500 °С при $p = \text{const}$ и при $v = \text{const}$; средние молярную, массовую и объемную теплоемкости смеси для интервала температур 1000 ... 500 °С при $p = \text{const}$; количество теплоты, затраченное на нагревание 5 м³ (н. у.) смеси при $p = \text{const}$ в том же интервале температур.

Решение. Значения теплоемкостей компонентов смеси определяем по таблицам Приложения; значения теплоемкостей смеси подсчитываем по формулам.

Истинные теплоемкости смеси при $p = \text{const}$ и $t = 500$ °С:

$$\begin{aligned} \mu c_{p\text{см}} &= r_{\text{CO}_2} \mu c_{p\text{CO}_2} + r_{\text{O}_2} \mu c_{p\text{O}_2} = 0,25 \cdot 50,822 + \\ &+ 0,75 \cdot 33,554 = 37,87 \text{ кДж/(кмоль} \cdot \text{К)}; \end{aligned}$$

$$c_{p\text{см}} = \mu c_{p\text{см}} / \mu_{\text{см}} = 37,87 / 35 = 1,082 \text{ кДж/(кг} \cdot \text{К)};$$

$$c'_{p\text{см}} = \mu c_{p\text{см}} / (\mu v^{\text{н}}) = 37,87 / 22,4 = 1,69 \text{ кДж/(м}^3 \cdot \text{К)}.$$

Истинные теплоемкости смеси при $v = \text{const}$:

$$\begin{aligned} \mu c_{v\text{см}} &= \mu c_{p\text{см}} - 8,314 = 37,87 - 8,314 = \\ &= 29,56 \text{ кДж/(кмоль} \cdot \text{К)}; \end{aligned}$$

$$c_{v\text{см}} = \mu c_{v\text{см}} / \mu_{\text{см}} = 29,56 / 35 = 0,845 \text{ кДж/(кг} \cdot \text{К)};$$

$$c'_{v\text{см}} = \mu c_{v\text{см}} / (\mu v^{\text{н}}) = 29,56 / 22,4 = 1,32 \text{ кДж/(м}^3 \cdot \text{К)}.$$

Средняя теплоемкость смеси при $p = \text{const}$ в интервале температур 0 ... 1000 °С

$$\begin{aligned} \mu c_{p\text{см}} \int_0^{1000} &= r_{\text{CO}_2} \mu c_{p\text{CO}_2} \int_0^{t_2} + r_{\text{O}_2} \mu c_{p\text{O}_2} \int_0^{t_1} = 0,25 \cdot 49,399 + \\ &+ 0,75 \cdot 33,122 = 37,19 \text{ кДж/(кмоль} \cdot \text{К)}. \end{aligned}$$

В интервале температур 0 ... 500 °С

$$\begin{aligned} \mu c_{p\text{см}} \int_0^{500} &= r_{\text{CO}_2} \mu c_{p\text{CO}_2} \int_0^{t_2} + r_{\text{O}_2} \mu c_{p\text{O}_2} \int_0^{t_2} = 0,25 \cdot 44,579 + \\ &+ 0,75 \cdot 31,338 = 34,65 \text{ кДж/(кмоль} \cdot \text{К)}. \end{aligned}$$

В интервале температур 1000 ... 500 °С:

$$\mu c_{p\text{см}} \Big|_{1000}^{500} = \left[\mu c_{p\text{см}} \Big|_0^{t_2} - \mu c_{p\text{см}} \Big|_0^{t_1} \right] / (t_2 - t_1) =$$

$$= \frac{34,65 \cdot 500 - 37,19 \cdot 1000}{500 - 1000} = 39,73 \text{ кДж}/(\text{кмоль} \cdot \text{К});$$

$$c_{p\text{см}} \Big|_{1000}^{500} = \mu c_{p\text{см}} \Big|_{1000}^{500} / \mu_{\text{см}} = 39,73 / 35 =$$

$$= 1,135 \text{ кДж}/(\text{кг} \cdot \text{К});$$

$$c'_{p\text{см}} \Big|_{1000}^{500} = \mu c_{p\text{см}} \Big|_{1000}^{500} / (\mu v^n) = 39,73 / 22,4 =$$

$$= 1,774 \text{ кДж}/(\text{м}^3 \cdot \text{К}).$$

Количество теплоты, затрачиваемое на нагревание 5 м³ (н.у.) смеси при $p = \text{const}$,

$$Q = v^n c'_{p\text{см}} \Big|_{t_1}^{t_2} (t_1 - t_2) = 5 \cdot 1,774 (1000 - 500) = 4434 \text{ кДж}.$$

2.13. Объемные доли компонентов влажного воздуха: 21 % кислорода; 78,1 % азота и 0,9 % водяного пара. Определить массовые доли, состав и парциальные давления компонентов воздуха при давлении смеси 0,1 МПа, газовую постоянную воздуха и плотность при н.у.

2.14. Определить парциальные плотности азота, кислорода и водяного пара в воздухе (см. условия предыдущей задачи), если температура воздуха равна 300 К.

2.15. Состав продуктов сгорания органического топлива в объемных долях: 13 % CO₂; 8 % O₂; 79 % N₂. Найти кажущуюся молярную массу, газовую постоянную и удельный объем продуктов сгорания, а также парциальные давления компонентов, если давление и температура продуктов сгорания равны 95 кПа и 650 °С соответственно.

2.16. Под колоколом цилиндрического газгольдера постоянного давления находится доменный газ (состав в объемных долях: 12 % CO₂; 29 % CO; 1 % H₂; 0,3 % CH₄; 57,7 % N₂) при температуре 20 °С и давлении 0,106 МПа; колокол расположен на высоте 2 м; диаметр колокола 5 м. Определить начальную массу газа и скорость опускания колокола, если при равномерном потреблении газа его расход составляет 12 м³/ч.

2.17. Баллоны для автомобилей с газовыми двигателями заполняются на станции до давления 20 МПа при температуре 17 °С. Определить массу газа в баллоне с размерами $D = 220$ мм, $H = 1200$ мм, а также плотность смеси и парциальные плотности компонентов смеси в баллоне после израсходования половины первоначальной массы газа, если состав газа в объемных долях: 71,9 % метана (CH_4); 10,1 % этана (C_2H_6); 3,2 % пропана (C_3H_8); 2,7 % бутана (C_4H_{10}); 1,7 % пентана (C_5H_{12}) и 10,4 % углекислого газа (CO_2), а давление в баллоне постоянно.

2.18. Определить значения газовой постоянной, кажущейся молярной массы и плотности при н. у., а также при температуре 400 °С и давлении $p = 0,1013$ МПа. Смесь газов задана следующим массовым составом: 30 % H_2 ; 10 % CO_2 ; 60 % N_2 .

2.19. Найти парциальные объемы компонентов смеси, состоящей из 40 % H_2 , 10 % CO_2 и 50 % SO_2 по массе. Объем, занимаемый смесью, 2 м³, температура смеси 200 °С и давление 0,2 МПа.

2.20. Для смеси, заданной в задаче 2.19, определить парциальные давления компонентов.

2.21. Смесь задана объемными долями: 20 % CO и 80 % CO_2 . Определить ее газовую постоянную и плотность при н.у. ($T = 273,15$ К, $p = 1,01325$ Н/м²).

2.22. Смесь, заданная в объемных долях: 20 % H_2O , 35 % CO_2 и 45 % N_2 , находится при температуре 200 °С. Определить истинные молярные и массовые теплоемкости смеси при постоянном давлении и объеме.

2.23. Для смеси газов, заданной в предыдущей задаче, определить количество теплоты, необходимое для нагрева 1 кг смеси при постоянном объеме от 200 до 400 °С.

2.24. Смесь задана массовыми долями: 80 % CO_2 ; 20 % O_2 . Определить ее истинные молярную, массовую и объемную теплоемкости при температуре 400 °С и постоянном давлении $p = 0,1$ МПа.

2.25. Смесь, состоящая из следующих количеств веществ: 2 кмоль N_2 , 1 кмоль O_2 и 3 кмоль CO_2 , нагревается при $p = \text{const}$ от 100 до 400 °С. Определить изменение внутренней энергии смеси, пользуясь таблицами Приложения: а) истинных теплоемкостей компонентов; б) средних теплоемкостей.

2.26. Для смеси предыдущей задачи определить значение ее энтальпии и парциальные объемы компонентов после нагревания, если давление смеси равно 0,12 МПа.

2.27. Состав смеси в массовых долях: 20 % гелия (He) и 80 % ксенона (Xe). Определить энтальпию смеси при $p = 0,1$ МПа и $T = 1000$ К, используя таблицы термодинамических свойств газов [4].

Решение. По таблице термодинамических свойств гелия [4] при $p = 0,1$ МПа и $T = 100$ К $i_{\text{He}} = 3776,4$ кДж/кг. Это значение энтальпии гелия определяется путем линейной интерполяции в интервале температур 700 ... 750 °С. По таблице термодинамических свойств ксенона при $p = 0,1$ МПа и $T = 1000$ К $i_{\text{Xe}} = 279,3$ кДж/кг.

В таблице для ксенона за начало отсчета энтальпии принят 0 К, а в таблице для гелия 0 °С. Поэтому при подсчете энтальпии смеси следует к значению i_{He} прибавить значение $i_0 = 1428,3$ кДж/кг, указанное в начале таблицы термодинамических свойств гелия, чтобы начало отсчета энтальпии компонентов было общим.

Тогда получим

$$i_{\text{см}} = g_{\text{He}} i_{\text{He}} + g_{\text{Xe}} i_{\text{Xe}} = 0,2 \cdot 5204,7 + 0,8 \cdot 279,3 = 1264 \text{ кДж/кг.}$$

2.28. Используя условия задачи 2.25 и таблицы термодинамических свойств [16], определить изменение внутренней энергии и энтальпии газовой смеси в расчете на 1 кг смеси.

2.29. Одним из видов потерь в ДВС является потеря теплоты с выпускными газами. При теплобалансовом испытании ДВС были получены следующие данные: температура окружающей среды $t_0 = 20$ °С; температура выпускных газов $t_r = 400$ °С; состав выпускных газов (кмоль/ч): $n_{\text{CO}_2} = 2,3$; $n_{\text{H}_2\text{O}} = 1,4$; $n_{\text{CO}} = 0,01$; $n_{\text{N}_2} = 15,3$; $n_{\text{O}_2} = 1,3$; коэффициент избытка воздуха $\alpha = 2,05$; расход топлива $M = 20$ кг/ч. Подсчитать потерю теплоты с выпускными газами, если состав дизельного топлива в объемных долях: С = 86 %; Н = 13 %; О = 1 %.

Решение. По табличным данным [4], энтальпия выпускных газов при температуре $t_r = 400$ °С

$$I_2 = n_{\text{CO}_2} \mu I_{\text{CO}_2} + n_{\text{H}_2\text{O}} \mu I_{\text{H}_2\text{O}} + n_{\text{CO}} \mu I_{\text{CO}} + n_{\text{N}_2} \mu I_{\text{N}_2} + n_{\text{O}_2} \mu I_{\text{O}_2} = 2,3 \cdot 25798 + 1,4 \cdot 23087 + 0,01 \cdot 19857 + 15,3 \cdot 19776 + 1,3 \cdot 20272 = 420780 \text{ кДж/ч.}$$

Количество воздуха, теоретически необходимого для полного сгорания 1 кг топлива,

$$L_0 = (C/12 + H/4 - O/32)/21 = (86/12 + 13/4 - 1/32)/21 = 0,495 \text{ кмоль/кг.}$$

Количество всасываемого воздуха

$$n_v = \alpha L_0 M = 2,05 \cdot 0,495 \cdot 20 = 20,3 \text{ кмоль/ч.}$$

Энтальпия всасываемого воздуха при $t = 20^\circ\text{C}$

$$I_1 = n_v \mu_{I_v} = 20,3 \cdot 8496,6 = 172\,440 \text{ кДж/ч.}$$

Потеря теплоты с выпускными газами

$$Q = I_2 - I_1 = 420\,780 - 172\,440 = 248\,340 \text{ кДж/ч.}$$

2.30. Продукты сгорания расширяются в турбине до давления 0,102 МПа, при этом их температура изменяется от 800 до 400 °С. Определить изменение энтальпии в процессе, а также плотность и изобарную массовую теплоемкость продуктов сгорания в конце расширения. Состав продуктов сгорания: $n_{\text{CO}_2} = 2$ кмоль/ч; $n_{\text{H}_2\text{O}} = 1,6$ кмоль/ч; $n_{\text{CO}} = 0,05$ кмоль/ч; $n_{\text{O}_2} = 1,1$ кмоль/ч; $n_{\text{N}_2} = ?$ кмоль/ч. Элементарный состав топлива взять из задачи 2.29, расход топлива 22,5 кг/ч; коэффициент избытка воздуха $\alpha = 1,7$.

ГЛАВА 3

ПЕРВЫЙ ЗАКОН ТЕРМОДИНАМИКИ

§ 3.1. Приложение первого закона термодинамики к процессам изменения физического состояния газа

3.1. Масса воздуха, заключенного в жесткую оболочку, равна 8,5 кг, температура воздуха 70 °С. Определить изменение энтальпии воздуха и давление в конце изохорного охлаждения, если отведенное количество теплоты составляет 300 кДж. Начальное давление равно 0,8 МПа.

3.2. В теоретическом цикле (см. рис. 11.1) четырехтактного ДВС теплота подводится к рабочему телу в процессе $v = \text{const}$. Каким должен быть объем камеры сгорания, чтобы в результате подвода к рабочему телу теплового потока 10 кВт давление оказалось равным 6,4 МПа. Давление и температура в конце сжатия 4,2 МПа и 297 °С, рабочее тело

имеет физические свойства воздуха. Частота вращения коленчатого вала 2000 об/мин.

Решение. Температура рабочего тела после подвода теплоты в процессе $v = \text{const}$

$$T_2 = T_1 p_2 / p_1 = 570 \cdot 6,4 / 4,2 = 868,6 \text{ К,}$$

следовательно, массовый расход рабочего тела составляет

$$M = Q_v / [c_v (T_2 - T_1)] = 10 / [0,718 (868,6 - 570)] = 0,047 \text{ кг/с.}$$

Минутный объемный расход рабочего тела при p_1 и T_1

$$V_1 = 60 M R T_1 / p_1 = 60 \cdot 0,047 \cdot 0,287 \cdot 570 / (1000 \cdot 4,2) = 0,109 \text{ м}^3/\text{мин.}$$

Так как один цикл четырехтактного двигателя осуществляется за два оборота коленчатого вала, то объем камеры сгорания двигателя

$$V = 2V_1 / n = 2 \cdot 0,109 / 2000 = 0,109 \cdot 10^{-3} \text{ м}^3 \text{ (или м}^3/\text{цикл).}$$

3.3. Углекислый газ (CO_2), занимающий объем 450 см^3 и имеющий в начале процесса давление $0,1 \text{ МПа}$, нагревается при постоянном объеме от 100 до 500°C . Определить давление в конце нагревания, подведенное количество теплоты и изменение энтальпии, если изобарная средняя молярная теплоемкость углекислого газа равна $49,7 \text{ кДж/(кмоль} \times \text{К)}$.

3.4. От воздуха массой 5 кг при постоянном объеме отводится 1800 кДж теплоты, при этом давление воздуха уменьшается в три раза. Определить температуру воздуха после охлаждения, приняв $c_v = 0,718 \text{ кДж/(кг} \cdot \text{К)}$.

3.5. Пусковой баллон ДВС заполняется продуктами сгорания так, что в конце заполнения они имеют давление $2,4 \text{ МПа}$ при температуре 220°C . Определить давление газа в баллоне, когда его температура сравняется с температурой окружающей среды, равной 15°C , и выделенное количество теплоты, если вместимость баллона равна 100 л , теплоемкость продуктов сгорания $c_v = 0,735 \text{ кДж/(кг} \cdot \text{К)}$, показатель адиабаты $1,38$.

3.6. В баллоне вместимостью 40 л избыточное давление воздуха должно иметь значение $12,43 \text{ МПа}$. Температура и давление в помещении, где установлен баллон, 18°C и $0,102 \text{ МПа}$. Какую массу воздуха следует выпустить из баллона для поддержания в нем заданного давления, если

за счет солнечной радиации температура сжатого воздуха повысилась на 10 К? Определить также избыточное давление в баллоне, если при указанных условиях массу воздуха в нем не уменьшать.

3.7. Воздух расширяется в процессе $p = 0,5 \text{ МПа} = \text{const}$, при этом его объем изменяется от 0,35 до 1,8 м³. Температура в конце расширения равна 1500 °С. Определить температуру воздуха в начале процесса расширения, подведенное количество теплоты, работу, совершенную в этом процессе, изменения внутренней энергии и энтальпии воздуха.

Решение. Температура воздуха в начале изобарного расширения

$$T_1 = T_2 V_1 / V_2 = 1773 \cdot 0,35 / 1,8 = 345 \text{ К.}$$

Масса воздуха

$$m = p V_1 / (R T_1) = 500 \cdot 0,35 / (0,287 \cdot 345) = 1,77 \text{ кг.}$$

Подведенное количество теплоты

$$Q_p = m c_p (T_2 - T_1) = 1,77 \cdot 1,005 (1773 - 345) = 2540 \text{ кДж.}$$

Совершенная работа

$$L = p (V_2 - V_1) = 500 (1,8 - 0,35) = 725 \text{ кДж.}$$

Изменение внутренней энергии

$$\Delta U = m c_v (T_2 - T_1) = 1,77 \cdot 0,718 (1773 - 345) = 1815 \text{ кДж.}$$

Изменение энтальпии

$$\Delta I = Q_p = 2540 \text{ кДж.}$$

3.8. В цилиндре ДВС к воздуху подводится количество теплоты 8120 кДж/кмоль при $p = \text{const}$. Определить расстояние поршня от верхней мертвой точки в конце этого процесса и работу, совершенную воздухом, если объем камеры сжатия составляет 250 см³, диаметр цилиндра $D = 80 \text{ мм}$, начальная температура воздуха $t_1 = 540 \text{ °С}$.

3.9. Определить расход охлаждающей воды через промежуточный холодильник компрессора, если в результате охлаждения сжатого воздуха до 17 °С при $p = \text{const}$ его плотность увеличивается в 1,4 раза, а температура воды при этом возрастает на 20 К. Объемная подача компрессора при н. у. $V^n = 350 \text{ м}^3/\text{ч}$.

3.10. В камере сгорания при $p = \text{const}$ сжигается топливо с удельной теплотой сгорания 42 000 кДж/кг. Определить расход топлива, если расход поступающего в камеру сгорания воздуха 40 кг/с, температура воздуха и энтальпия топлива на входе 290 °С и 200 кДж/кг, температура газов на выходе 650 °С. Считать, что физические свойства газов и воздуха одинаковы. Потерями теплоты пренебречь.

3.11. В регенераторе ГТУ теплота продуктов сгорания топлива передается воздуху, температура которого повышается от $t_1 = 20$ °С до $t_2 = 350$ °С при $p = \text{const} = 990$ гПа. Определить объем нагретого воздуха и изменение его внутренней энергии за 1 ч, а также массовый расход (кг/ч) продуктов сгорания, если объемный расход воздуха, отнесенный к н. у., составляет $V_B^n = 8000$ м³/ч, изменение температуры продуктов сгорания в теплообменнике $\Delta t_r = 350$, а средняя теплоемкость продуктов сгорания $c_{pr} = 1,12$ кДж/(кг·К).

Р е ш е н и е. Массовый расход воздуха

$$M_B = \rho^n V_B^n / (R_B T^n) = 101,3 \cdot 8000 / (0,287 \cdot 273) = 10\,343 \text{ кг/ч.}$$

Объем нагретого воздуха

$$V_{2B} = M_B R T_2 / p = 10\,343 \cdot 0,287 (350 + 273) / 99 = 18\,680 \text{ м}^3/\text{ч.}$$

Изменение внутренней энергии воздуха

$$\Delta U_B = c_{vB} M_B (t_2 - t_1) = 0,71 \cdot 10\,343 (350 - 20) = 2,42 \cdot 10^6 \text{ кДж/ч.}$$

Количество теплоты, подводимое к воздуху,

$$Q = c_{pB} M_B (t_2 - t_1) = 1,005 \cdot 10\,343 (350 - 20) = 3,43 \cdot 10^6 \text{ кДж/ч.}$$

Расход продуктов сгорания определяется из условия

$$M_B c_{pB} \Delta T_B = M_r c_{pr} \Delta t_r,$$

откуда

$$M_r = Q / (c_{pr} \Delta T_r) = 3,43 \cdot 10^6 / (1,12 \cdot 350) = 8750 \text{ кг/ч.}$$

3.12. В теоретическом цикле (см. рис. 11.3) дизеля теплота подводится к рабочему телу последовательно в процессах $v = \text{const}$ (2-2') и $p = \text{const}$ (2'-3). Температура в начале процесса $v = \text{const}$ равна $t_1 = 530$ °С; молярный рас-

ход рабочего тела составляет 2,8 кмоль/ч; объемный расход при условии в начале процесса $v = \text{const}$ составляет 3,75 м³/ч. При подводе количества теплоты $Q_v + Q_p = 120$ МДж/ч давление в процессе $v = \text{const}$ увеличилось в 1,35 раза. Считая, что рабочее тело имеет физические свойства воздуха, определить, как изменяются параметры p_2 и T_2 в конце изохорного подвода теплоты, если в два раза уменьшить количество теплоты, подводимое изобарно, а общее подводимое количество теплоты оставить неизменным. Как изменится степень предварительного расширения v_3/v_2 ? Проанализировать полученные результаты.

3.13. На сжатие 5 кг азота (N_2) при $t = 100^\circ\text{C}$ затрачена работа 1800 кДж. Определить давление и объем, занимаемый азотом в конце сжатия, если начальное давление $p_1 = 0,25$ МПа.

3.14. В процессе подвода теплоты рабочее тело (CO_2) расширяется в три раза при $t = 650^\circ\text{C} = \text{const}$ до давления 5 МПа. Определить начальное давление и плотность рабочего тела, а также подведенное количество теплоты, если массовый расход углекислого газа составляет 1000 кг/ч.

3.15. В компрессоре сжимается 300 м³/ч (н.у.) воздуха при $t = 30^\circ\text{C} = \text{const}$. Начальное давление воздуха 0,2 МПа, мощность, потребляемая компрессором, 12 кВт. Определить давление и плотность воздуха в конце сжатия и расход воды на охлаждение цилиндров, если вода нагревается на 20 К.

Р е ш е н и е. Массовый расход воздуха

$$M = p^n V^n / (RT^n) = 101,33 \cdot 300 / (0,287 \cdot 273) = 388 \text{ кг/ч} = 0,108 \text{ кг/с.}$$

Работа, затрачиваемая компрессором при изотермическом сжатии,

$$l_k = RT \ln(p_1/p_2) = N_k / M = 12 / 0,108 = 111,3 \text{ кДж/кг,}$$

откуда давление воздуха в конце сжатия

$$p_2 = p_1 e^{l_k / (RT)} = 0,2 e^{111,3 / (0,287 \cdot 303)} = 0,72 \text{ МПа.}$$

Плотность воздуха в конце сжатия

$$\rho_2 = p_2 / (RT) = 720 / (0,287 \cdot 303) = 8,28 \text{ кг/м}^3.$$

Уравнение теплового баланса цилиндров компрессора $Mq = mc_B \Delta T_B$, откуда расход охлаждающей воды

$$m = Mq / (c_B \Delta T_B) = 0,108 \cdot 111,3 / (4,19 \cdot 20) = 0,143 \text{ кг/с.}$$

Здесь $q = l = 111,3$ кДж/кг — количество теплоты, кото-

рое необходимо отвести от цилиндров компрессора; c_v и ΔT_v — теплоемкость и перепад температуры воды.

3.16. При изотермическом расширении 0,25 кг кислорода в цилиндре поршневой машины давление понижается от 12,5 до 5,6 МПа, а поршень перемещается на 50 мм. Определить температуру кислорода, подведенное количество теплоты и произведенную работу, если диаметр цилиндра равен 220 мм.

3.17. Воздух массой 1 кг при давлении $p_1 = 0,1$ МПа и температуре $t_1 = 30^\circ\text{C}$ сначала сжимается изотермически до давления $p_2 = 1$ МПа, затем расширяется при постоянном давлении до десятикратного объема, после чего, охлаждаясь при постоянном объеме, принимает первоначальное состояние. Определить параметры воздуха в начале и в конце каждого процесса, а также для каждого процесса изменение внутренней энергии и энтальпии, работу и количество теплоты. Изобразить изменение состояния воздуха в координатах v , p и s , T .

3.18. Воздух массой 0,5 кг при давлении $p_1 = 0,2$ МПа занимает объем $V_1 = 0,4$ м³. Воздух изотермически расширяется, а затем изохорически нагревается так, что в конечном состоянии его давление становится равным первоначальному. Суммарное количество теплоты, подводимое к газу в процессах $T = \text{const}$ и $v = \text{const}$, равно 370,5 кДж. Определить работу, совершенную воздухом в указанном процессе и параметры воздуха в конце изотермического расширения.

3.19. Воздух массой 1 кг при температуре $t_1 = -20^\circ\text{C}$ давлении $p_1 = 0,1$ МПа адиабатно сжимается до давления $p_2 = 0,8$ МПа. Определить удельный объем воздуха и его температуру в конце сжатия и затраченную работу.

3.20. Воздух массой 1 кг при температуре $t_1 = 25^\circ\text{C}$ и давлении $p_1 = 0,102$ МПа адиабатно сжимается до давления $p_2 = 2$ МПа. Определить удельные изменения внутренней энергии и энтальпии воздуха, работу деформации и располагаемую работу.

3.21. Процесс расширения гелия (He) в турбине протекает адиабатно. Параметры гелия ($\mu_{\text{He}} = 4$) на входе $p_1 = 1$ МПа и $t_1 = 700^\circ\text{C}$; давление за турбиной $p_2 = 0,1$ МПа. Внутренний относительный к. п. д. турбины $\eta_{\text{oit}} = 0,86$. Действительная (на лопатках) мощность турбины $N = 40$ МВт. Определить температуру гелия на выходе из турбины t_2 и массовый расход гелия. Теплоемкость гелия $\mu c_p = 20,8$ кДж/(кмоль·К).

Р е ш е н и е. Температура гелия на выходе из турбины

$$T_2 = T_1 (p_2/p_1)^{(k-1)/k} = 973 (0,1/1,0)^{(1,67-1)/1,67} = 386 \text{ К.}$$

Теоретическая мощность турбины

$$N_T = N/\eta_{0iT} = 40/0,86 = 46,5 \text{ МВт.}$$

Располагаемая работа

$$l_0 = i_1 - i_2 = c_p (T_1 - T_2) = (20,8/4) (973 - 386) = 3852 \text{ кДж/кг.}$$

Расход гелия

$$M = N_T/l_0 = 46,5 \cdot 10^3/3852 = 12 \text{ кг/с} = 43 \text{ 457 кг/ч.}$$

3.22. В газовой турбине адиабатно расширяется 1000 кг/ч воздуха от состояния $p_1 = 0,8 \text{ МПа}$, $t_1 = 650 \text{ }^\circ\text{C}$ до $p_2 = 0,1 \text{ МПа}$. Определить температуру воздуха на выходе из турбины, изменение внутренней энергии воздуха, проходящего через турбину за 1 с, и теоретическую мощность турбины.

3.23. Углекислый газ расширяется по адиабате в турбине, мощность которой равна 1000 кВт. Определить массовый расход углекислого газа, если его давление и температура на входе в турбину 0,32 МПа и 827 °С, а давление на выходе 0,15 МПа. Какой будет мощность турбины, если вместо углекислого газа [$c_p = 1,13 \text{ кДж/(кг}\cdot\text{К)}$] в ней будет расширяться то же количество гелия [$c_p = 5,2 \text{ кДж/(кг}\cdot\text{К)}$] при тех же исходных данных?

3.24. Определить скорость вылета снаряда массой 2 кг, приобретаемую при адиабатном расширении пороховых газов в стволе орудия в 40 раз, и необходимую длину ствола, если диаметр ствола 80 мм. Считать, что после взрыва пороховые газы занимают объем $V_1 = 0,2 \text{ л}$ и имеют давление $p_1 = 8 \text{ МПа}$. Показатель адиабаты $k = 1,4$.

3.25. Для создания в рабочем участке аэродинамической трубы скорости воздуха 600 м/с необходимо осуществить его адиабатное расширение от 0,4 до 0,1 МПа. До какой температуры нужно подогревать воздух перед соплом трубы, чтобы его температура в рабочем участке была равна 350 К? Какой должна быть мощность электрического нагревателя воздуха, если воздух нагревается при $p = \text{const}$ от начальной температуры 298 К? Площадь поперечного сечения трубы на рабочем участке равна 0,025 м².

3.26. В камере сгорания ГТУ рабочее тело расширяется изобарно, а затем в турбинном колесе адиабатно. Параметры рабочего тела в начале изобарного расширения $p_1 = 0,6 \text{ МПа}$, $T_1 = 650 \text{ К}$; в начале адиабатного расширения температура рабочего тела $T_2 = 923 \text{ К}$; теоретическая мощность турбины $N_T = 740 \text{ кВт}$, массовый расход ра-

бочего тела $M = 2$ кг/с. Определить изменение внутренней энергии и энтальпии рабочего тела, имеющего физические свойства воздуха. При каком давлении следует осуществлять процесс в камере сгорания, чтобы при тех же конечных параметрах рабочего тела получить мощность турбины 850 кВт?

Р е ш е н и е

$$MkR (T_2 - T_3)/(k - 1) = N_T.$$

откуда

$$T_3 = T_2 - N_T (k - 1)/(MkR) = 923 - 740 (1,41 - 1) / (2 \cdot 1,41 \cdot 0,287) = 548 \text{ К};$$

$$\Delta U = Mc_v (T_3 - T_1) = 2 \cdot 0,71 (548 - 650) = -144,8 \text{ кВт};$$

$$\Delta I = Mc_p (T_3 - T_1) = 2 \cdot 1,005 (548 - 650) = -205,0 \text{ кВт};$$

$$p_3 = p_2 / (T_3/T_2)^{k/(k-1)} = 0,6 / (548/923)^{1,41/(1,41-1)} = 0,1 \text{ МПа}.$$

Давление в камере сгорания, необходимое для увеличения мощности турбины,

$$MkRT [1 - (p_2'/p_3)^{(k-1)/k}] / (k - 1) = -850,$$

откуда

$$p_2' = p_3 [1 + 850 (k - 1) / (MkRT_3)]^{k/(k-1)} = 0,1 [1 + 850 \times (1,41 - 1) / (2 \cdot 1,41 \cdot 0,287 \cdot 548)]^{1,41/(1,41-1)} = 0,734 \text{ МПа}.$$

3.27. В цилиндре ДВС воздух, имеющий температуру $t_1 = 17^\circ\text{C}$ и давление $p_1 = 0,1$ МПа, сжимается по адиабате, а затем при $p = \text{const}$; к нему подводится количество теплоты 150 кДж. В конце изобарного процесса температура $t_3 = 650^\circ\text{C}$. Определить степень адиабатного сжатия $\varepsilon = v_1/v_2$, давление $p_2 = p_3$ и работу адиабатного сжатия. Каким будет максимальное давление, если при полученной степени сжатия то же количество теплоты подвести по изохоре?

3.28. В поршневом детандере (расширительной машине) установки глубокого охлаждения политропно расширяется воздух от начального давления $p_1 = 20$ МПа и температуры $t_1 = 20^\circ\text{C}$ до конечного давления $p_2 = 1,6$ МПа. Показатель политропы $n = 1,25$. Определить параметры воздуха в конце расширения, удельные значения изменения внутрен-

ней энергии и энтальпии, количества теплоты, работы процесса и располагаемой работы.

Р е ш е н и е. Параметры воздуха в конце расширения:

$$T_2/T_1 = (p_2/p_1)^{(n-1)/n}, \text{ откуда } T_2 = T_1 (p_2/p_1)^{(n-1)/n} = \\ = 293 (1,6/20)^{(1,25-1)/1,25} = 177 \text{ К};$$

$$v_2 = RT_2/p_2 = 0,287 \times 177/1600 = 0,032 \text{ м}^3/\text{кг}.$$

Изменение внутренней энергии и энтальпии

$$\Delta u = c_v (T_2 - T_1) = 0,71 (177 - 293) = -82,4 \text{ кДж/кг};$$

$$\Delta i = c_p (T_2 - T_1) = 1,005 (177 - 293) = -116,6 \text{ кДж/кг}.$$

Количество теплоты

$$q = c_v (n - k) (T_2 - T_1) / (n - 1) = 0,71 (1,25 - 1,41) \times \\ \times (177 - 293) / (1,25 - 1) = 52,7 \text{ кДж/кг}.$$

Работа процесса

$$l = R (T_1 - T_2) / (n - 1) = 0,287 (293 - 177) / (1,25 - \\ - 1) = 133 \text{ кДж/кг}.$$

Располагаемая работа

$$l_0 = nl = 1,25 \cdot 133 = 166,4 \text{ кДж/кг}.$$

3.29. Воздух, расширяясь, проходит через следующие состояния: 1) $p_1 = 1000$ гПа, $t_1 = 0^\circ\text{C}$; 2) $p_2 = 1000$ кПа, $v_2 = 0,1$ м³/кг; 3) $v_3 = 0,13$ м³/кг, $t_3 = 180^\circ\text{C}$; 4) $p_4 = 1,5$ МПа, $v_4 = 0,087$ м³/кг. Для процессов 1-2, 2-3 и 3-4 определить значения показателя политропы и указать название процесса и алгебраический знак работы.

3.30. Два процесса характеризуются показателями политропы: 1) $n = 1,7$; 2) $n = 0,7$. Какому значению n соответствует повышение температуры газа при сжатии и какому — понижение? Во сколько раз понизится температура в одном из указанных процессов сжатия при изменении давления в 5 раз?

3.31. Определить показатель политропы, отведенное количество теплоты, среднюю массовую теплоемкость процесса, изменение внутренней энергии и затраченную работу, если в результате сжатия 18 м³ воздуха от давления $p_1 = 0,1$ МПа до давления $p_2 = 0,8$ МПа объем его уменьшился в 6 раз.

3.32. В политропном процессе заданы начальные параметры 1 кг воздуха: $p_1 = 0,1$ МПа; $t_1 = 0^\circ\text{C}$, и конечные: $p_2 = 0,8$ МПа и $v_2 = 0,14$ м³/кг. Определить показатель

политропы n , количество теплоты q , изменение внутренней энергии Δu , изменение энтальпии Δi , работу деформации l ; располагаемую работу l_0 и изменение энтропии Δs .

3.33. В некотором политропном процессе кислород был нагрет от $T_1 = 300 \text{ К}$ до $T_2 = 500 \text{ К}$, при этом его объем увеличился в 2,5 раза. Найти теплоемкость кислорода в этом процессе, если его изобарная теплоемкость $c_p = 0,94 \text{ кДж/(кг} \cdot \text{К)}$. Как организовать дальнейшее нагревание газа, чтобы при подводе количества теплоты 170 кДж/кг его температура увеличилась в 1,5 раза? Изобразить процессы в координатах v, p .

3.34. В политропном процессе, совершаемом количеством вещества гелия $n_{\text{He}} = 2 \text{ кмоль}$, отводится количество теплоты 3000 кДж . Начальные параметры процесса: $p_1 = 0,15 \text{ МПа}$, $t_1 = 227 \text{ }^\circ\text{C}$; конечная температура $127 \text{ }^\circ\text{C}$. Молярная теплоемкость гелия $\mu c_v = 12,5 \text{ кДж/(кмоль} \cdot \text{К)}$. Определить показатель политропы, начальные и конечные параметры газа, изменение внутренней энергии и энтальпии, работу процесса и располагаемую работу, изменение энтропии. Изобразить процессы в координатах v, p и s, T .

Решение. Теплоемкость политропного процесса

$$\mu c = Q / [n_{\text{He}} (t_2 - t_1)] = (-3000) / [2 (127 - 227)] = 15 \text{ кДж/(кмоль} \cdot \text{К)}.$$

Показатель политропы

$$n = [\mu c - (\mu c_v + \mu R)] / (\mu c - \mu c_v) = [15 - (12,5 + 8,314)] / (15 - 12,5) = 2,33.$$

Начальные и конечные параметры газа:

$$v_1 = R (t_1 + 273) / p_1 = 8,314 (227 + 273) / (4 \cdot 150) = 6,93 \text{ м}^3/\text{кг};$$

$$p_2 = p_1 / (T_2 / T_1)^{n / (n-1)} = 0,15 / (400 / 500)^{2,33 / (2,33-1)} = 0,101 \text{ МПа};$$

$$v_2 = R (t_2 + 273) / p_2 = 8,314 (127 + 273) / (4 \cdot 101) = 8,23 \text{ м}^3/\text{кг}.$$

Изменение внутренней энергии и энтальпии:

$$\Delta U = \mu c_v n_{\text{He}} (t_2 - t_1) = 12,5 \cdot 2 (127 - 227) = -2500 \text{ кДж};$$

$$\Delta I = \mu c_p n_{\text{He}} (t_2 - t_1) = (12,5 + 8,314) 2 (127 - 227) = -4163 \text{ кДж}.$$