СБОРНИК ЗАДАЧ ПО ТЕХНИЧЕСКОЙ ТЕРМОДИНАМИКЕ

Издание третье,
переработанное и дополненное

Допущено Министерством высшего и среднего специального образования СССР в качестве учебного пособия для студентов теплоэнергетических специальностей вузов

МОСКВА
ЭНЕРГОИЗДАТ 1981

ББК 31.31
С 23
УДК 621.1.016.7(075.8)

Рецензент. Кафедра авиационной теплотехники Московского ордена Ленина авиационного института имени Серго Орджоникидзе

Сборник задач по технической термодинамике
С 23 Учеб. пособие для вузов/ Т. Н. Андрианова, Б. В. Дзампов, В. Н. Зубарев, С. А. Ремизов.— 3-е изд., перераб. и доп.— М.: Энергоиздат, 1981.— 240 с., ил.

70 к.

Третье, переработанное и дополненное издание задачника составлено в соответствии с программой курса «Техническая термодинамика» для теплотехнических специальностей энергетических вузов факультетов и охватывает все разделы указанной программы.

Все задачи снабжены ответами, а типовые — решениями. Тем некоторых задач могут быть использованы для составления более подробных домашних заданий. Второе издание задачника вышл в 1971 г.

Книгой могут пользоваться также студенты неэнергетических спе циальностей, аспиранты и инженеры, повышающие свою квалифи кацию.

$\frac{30302\text{-}462}{051(01)\text{-}81}$ 9—81 (Э). 2303010000

ББК 31.3
6П2.

ТАМАРА НИКОЛАЕВНА АНДРИАНОВА
БОРИС ВАСИЛЬЕВИЧ ДЗАМПОВ
ВЛАДИМИР НИКОЛАЕВИЧ ЗУБАРЕВ
СЕРАФИМ АЛЕКСАНДРОВИЧ РЕМИЗОВ

СБОРНИК ЗАДАЧ
ПО ТЕХНИЧЕСКОЙ ТЕРМОДИНАМИКЕ

Редакторы *Л. А. Разумейченко, Ю. В. Волковыцкий*
Редактор издательства *И. В. Волобуева*
Переплет художника *Е. Н. Волкова*
Технический редактор *Л. В. Иванова*
Корректор *Л. С. Тимохова*
ИБ № 2106 («Энергия»)

Сдано в набор 27.03.81 Подписано в печать 22.06.81 Т-2201
Формат 84 × 108¹/₃₂ Бумага типографская № 2 Гарн. шрифта литературна
Печать высокая Усл. печ. л. 12,6 Уч.-изд. л. 16,3
Тираж 30 000 экз. Заказ 1114 Цена 70 к.

Энергоиздат, 113114, Москва, М-114, Шлюзовая наб., 10

Московская типография № 10 Союзполиграфпрома при Государственном комитете СССР по делам издательств, полиграфии и книжной торговли. 113114, Москва, М-114, Шлюзовая наб., 10

© Энергоиздат, 1981

ПРЕДИСЛОВИЕ

Третье издание сборника задач по технической термодинамике, так же как и второе, вышедшее в 1971 г., соответствует программе курса по технической термодинамике для теплотехнических и теплофизических специальностей энергетических вузов.

При подготовке третьего издания задачника были проверены и уточнены решения всех задач, а также введено некоторое количество новых задач.

Настоящее издание отличается от второго также и тем, что все физические величины приведены в Международной системе единиц (СИ) и в единицах, допускаемых к применению наравне с единицами СИ. Исключение составляют h, d-диаграмма влажного воздуха для повышенных давлений и часть задач, в которых применяются единицы МКГСС в учебных целях.

Главы 1, 4, 6, 9, 11, 12, 15 переработаны Т. Н. Андриановой, главы 2, 5, 8, 14 — Б. В. Дзамповым, главы 3, 7, 10, 13 и 16 — В. Н. Зубаревым.

Авторы с благодарностью примут критику и пожелания читателей по дальнейшему улучшению книги, которые следует направлять по адресу: 113114, Москва, М-114, Шлюзовая наб., 10.

Авторы

Глава первая

ПАРАМЕТРЫ СОСТОЯНИЯ

1.1. Слиток свинца, имеющего плотность $\rho=11{,}3$ г/см^3, объемом $V=1$ дм^3 взвешен при помощи пружинных весов на полюсе, где ускорение свободного падения $g_{90^\circ}=9{,}8324$ м/с^2.

Каков вес свинца, выраженный в ньютонах и в килограмм-силах? Что покажут пружинные весы на экваторе, где $g_{0^\circ}=9{,}780$ м/с^2?

Решение. Согласно второму закону Ньютона вес (т. е. сила притяжения тела к Земле) равен:

$$G=mg.$$

Определяя его в единицах СИ (Стандарт СЭВ 1052-78) и учитывая, что

$$m=\rho V,$$

получаем:

$$G_{90^\circ}=\rho V g_{90^\circ}=11\,300\cdot 0{,}001\cdot 9{,}8324=111{,}11\ \text{Н}.$$

Прежде чем подсчитать вес в килограмм-силах, необходимо вспомнить, что эта единица была установлена в системе единиц МКГСС (метр — килограмм-сила — секунда) на основании того же второго закона Ньютона. За 1 кгс была принята сила, с которой тело, имеющее массу, равную массе международного прототипа килограмма, притягивается к Земле при так называемом «нормальном» ускорении свободного падения $g_н=9{,}80665$ м/с. При этом единица массы получила сложную размерность: килограмм-сила — секунда в квадрате на метр (кгс·с^2/м). Иногда эту единицу называют «технической единицей массы» (т. е. м.).

Следовательно,

$$1\ \text{т. е. м.}=1\ \text{кгс}\cdot\text{с}^2/\text{м}^2.$$

Нетрудно сообразить, что 1 кгс эквивалентен 9,80665 кг·м/с^2 = =9,80665 Н, а 1 т. е. м.=1 кгс·с^2/м эквивалентна 9,80665 кг. Следовательно, для того, чтобы найти вес G в кгс, нужно вес в ньютонах разделить на 9,80665 Н/кгс, которая численно равна нормальному ускорению свободного падения, а по своему существу оказывается всего лишь переводным коэффициентом для перехода из одной системы единиц в другую. Так же обстоит дело и с единицами массы. Вес свинца, выраженный в системе МКГСС, будет равен:

$$G_{90^\circ}=\frac{111{,}11\ \text{Н}}{9{,}80665\ \text{Н/кгс}}=11{,}330\ \text{кгс}.$$

При измерении веса на экваторе соответственно получим:

$$G_{0'} = 110{,}52 \text{ Н, или } 11{,}360 \text{ кгс.}$$

Пример показывает, что вес вещества зависит от ускорения свободного падения, различного в разных точках земной поверхности и на разных высотах от уровня океана.

Ясным становится и то, что величина, называемая «удельным весом» (γ, Н/м³ или кгс/м³), по той же причине не может служить табличной величиной. В таблицах физических свойств веществ значения γ всегда приведены к нормальному ускорению свободного падения, если взвешивание в опытах производилось при помощи пружинных динамометров той или иной конструкции. При этом удельный вес вещества γ численно становится равным его плотности ρ. При взвешивании же на чашечных весах (что бывает гораздо чаще) непосредственно определяется масса, а не вес вещества. В Международной системе единиц применяется величина ρ, кг/м³, и обратная ей — удельный объем (объем единицы массы) $v = 1/\rho$, м³/кг.

1.2. Манометр, установленный в открытой кабине самолета, находящегося на земле, и измеряющий давление масла, показывает 6 кгс/см² при показании барометра 752 мм рт. ст.

1) Каково абсолютное давление масла, выраженное в ньютонах на квадратный метр, мегапаскалях, килограмм-силах на квадратный метр, килограмм-силах на квадратный сантиметр, миллиметрах ртутного столба, миллиметрах водяного столба, английских фунт-силах на квадратный дюйм?

2) Каковы будут показания манометра в этих же единицах после подъема самолета на некоторую высоту, где атмосферное давление $B = 442{,}5$ мм рт. ст., если абсолютное давление остается неизменным?

Ускорение свободного падения считать нормальным ($g_н = 0{,}98055$ м/с²) и не зависящим от высоты подъема самолета. Плотность ртути и воды принимать соответственно при 0 и 4 °С.

Ответ: 1) $p = 6{,}89 \cdot 10^5$ Н/м² = 0,689 МПа = 70 223 кгс/м² = 7,02 кгс/см² = 5165 мм рт. ст. = 70 223 мм вод. ст. = 99,9 lbf/in².

2) $p_{изб} = 6{,}297 \cdot 10^5$ Н/м² = 0,6297 МПа = $6{,}421 \cdot 10^4$ кгс/м² = 6,421 кгс/см² = 4723 мм рт. ст. = $6{,}421/10^5$ мм вод. ст. = 91,3 lbf/in².

1.3. В конденсаторе паровой турбины поддерживается абсолютное давление $p = 0{,}004$ МПа.

Каковы показания вакуумметров, проградуированных в килоньютонах на квадратный метр, миллиметрах ртутного столба и в английских фунтах на квадратный дюйм, если в одном случае показания барометра составляют 735 мм рт. ст., а в другом — 764 мм рт. ст.?

Ответ: 1) $p_{вак} = 94{,}0$ кН/м² = 705 мм рт. ст. = 13,64 lbf/in².

2) $p_{вак} = 97{,}93$ кН/м² = 735 мм рт. ст. = 14,20 lbf/in².

1.4. В машинном зале электростанции работают три турбины, в конденсаторах которых поддерживается абсолютное давление $p_1 = 2{,}94$ кПа, $p_2 = 3{,}923$ кН/м² и $p_3 = 0{,}711$ lbf/in².

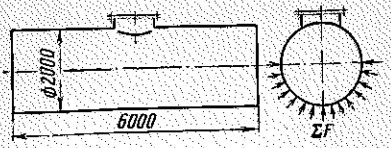


Рис. 1.1. К задаче 1.5.

Определить величины вакуумов в процентах барометрического давления. Показание барометра в машинном зале $B=753$ мм рт. ст.

Ответ: $w_1=97{,}1\%$, $w_2=96{,}1\%$; $w_3=95{,}1\%$.

1.5. В железнодорожной цистерне (рис. 1.1) находился вязкий мазут. Для того чтобы слить мазут в условиях морозной погоды, его нужно было разогреть. Для этого через верхний люк цистерны опустили трубу, по которой подавали насыщенный водяной пар. Когда мазут был полностью слит, трубу из цистерны вынули, а люк немедленно закрыли герметически. Через некоторое время цистерна была смята атмосферным давлением (рис. 1.2).

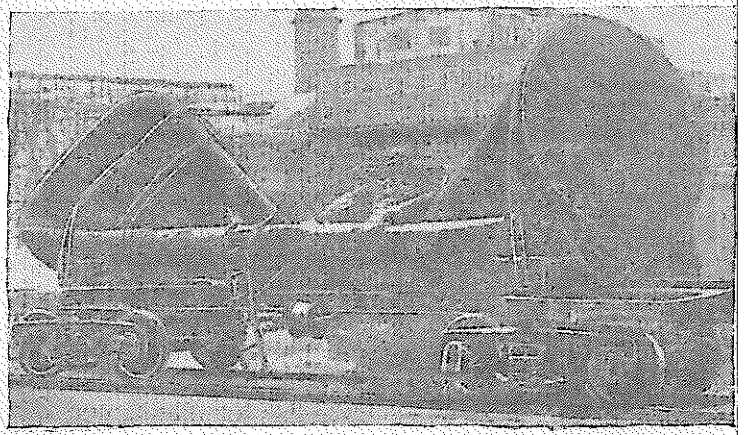


Рис. 1.2. К задаче 1.5.

Определить суммарную результирующую силу F, приложенную к нижней половине боковой поверхности цистерны.

Известно, что после конденсации всего пара в цистерне образовался вакуум $p_{\text{вак}}=700$ мм рт. ст. Барометрическое давление $B=0{,}1$ МПа. Размеры цистерны указаны на рис. 1.1.

Ответ: $F=1{,}7558$ МН$=179{,}2\cdot10^3$ кгс.

1.6. Цилиндр диаметром $d=200$ мм (рис. 1.3) плотно закрыт подвешенным на пружине поршнем, условно невесомым и скользящим без трения. В цилиндре образован вакуум, составляющий $w=90\%$ барометрического давления $B=0{,}101$ МПа.

Определить силу F натяжения пружины, если поршень неподвижен.

Ответ: $F=2854$ Н$=291$ кгс.

1.7. Для измерения малых избыточных давлений или небольших разряжений применяются микроманометры. Принципиальная схема прибора представлена на рис. 1.4.

Определить абсолютное давление в воздухопроводе *1*, если длина *l* столба жидкости в трубке микроманометра *2*, наклоненной под углом $\alpha = 30°$, равна 180 мм.

Рабочая жидкость — спирт плотностью $\rho = 0{,}8$ г/см³. Показание барометра 0,1020 МПа. Давление выразить в мегапаскалях, миллиметрах ртутного столба и в килограмм-силах на квадратный сантиметр.

Ответ: $p_{абс} = 0{,}1027$ МПа $= 770$ мм рт. ст. $= 1{,}047$ кгс/см².

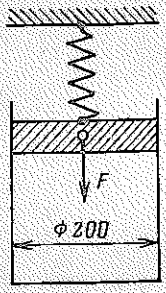


Рис. 1.3. К задаче 1.6.

1.8. Для измерения расхода жидкостей и газов применяются дроссельные диафрагмы. Схема измерений (рис. 1.5) следующая. Текущая по трубе жидкость проходит через дроссельную диафрагму *1*. В результате дроссе-

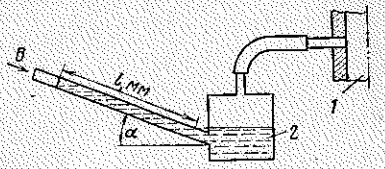


Рис. 1.4. К задаче 1.7.

лирования давление за диафрагмой оказывается меньшим, чем давление перед ней. Перепад давлений на диафрагме измеряется дифференциальным U-образным манометром *2*.

Массовый секундный расход жидкости подсчитывается по формуле

$$m = kf\sqrt{2(\Delta p)\rho},$$

где m — искомый массовый секундный расход жидкости, кг/с; k — постоянный коэффициент; f — площадь выходного отверстия диафрагмы, м²; Δp — перепад давления на диафрагме, Н/м²; ρ — плотность жидкости, кг/м³.

Определить секундный расход воды, измеренный при помощи этого устройства, если $k = 0{,}8$; $\rho = 0{,}998$ г/см³; $h = 22$ мм рт. ст.; диаметр входного отверстия диафрагмы $d = 10$ мм.

Какова будет ошибка в расчете (в процентах) и в какую сторону, если не учитывать массу столба воды над ртутью в левой половине дифференциального манометра?

Ответ: $m = 0{,}146$ кг/с; ошибка в сторону увеличения составит 3,9%.

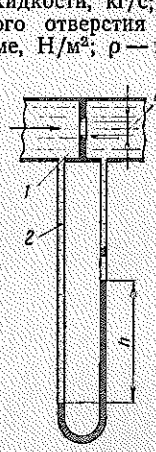


Рис. 1.5. К задаче 1.8.

1.9. В паросборнике находится водяной пар в количестве 300 кг.

Определить объем паросборника V, м³, если удельный объем пара $v = 20{,}2$ см³/г.

Ответ: $V = 6{,}06$ м³.

1.10. По трубопроводу диаметром d=50 мм, присоединенному к газгольдеру, подается газ, удельный объем которого v=0,500 м³/кг. За какое время газ наполнит газгольдер, если его объем V=5 м³, средняя по сечению скорость газа в трубопроводе w=2,55 м/с, а плотность газа, заполнившего газгольдер, ρ=0,00127 г/см³?

Ответ: τ=10 мин 35 с.

1.11. В калиброванную, U-образную, запаянную с одного конца трубку, заполненную воздухом, вводится 25 см³ воздуха с температурой t_1=20 °С (рис. 1.6,*а*). При этом мениски ртути в обоих коленах оказываются на одном уровне. Затем воздух в трубке подогревается до t_2=70 °С (рис. 1.6,*б*).

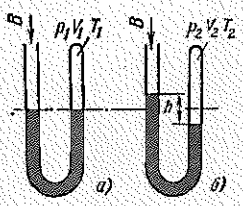


Рис. 1.6. К задаче 1.11.

Определить: 1) образовавшийся перепад давления h в миллиметрах ртутного столба; 2) давление подогретого воздуха p_2, если известно: барометрическое давление B=750 мм рт. ст., живое сечение трубки S=1 см², плотность ртути ρ=13,595 г/см³.

Указание. Использовать уравнение законов Бойля — Мариотта и Гей-Люссака.

Ответ: h=49 мм рт. ст.; p=0,1065 МПа.

1.12. Связь между практической международной шкалой температур 1948 г. (в кельвинах и градусах Цельсия) и шкалой Фаренгейта показана в виде схемы на рис. 1.7.

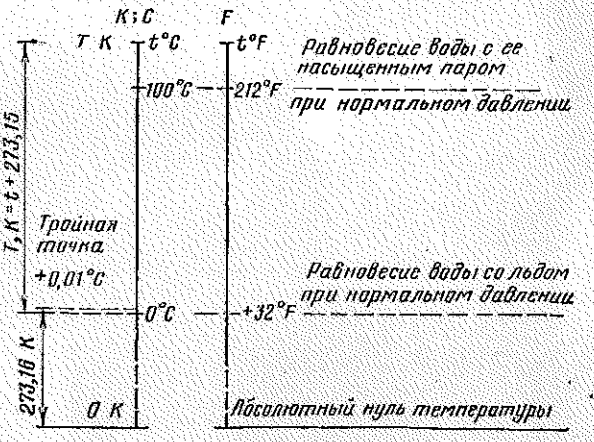


Рис. 1.7. К задаче 1.12.

Вывести самостоятельно формулы для взаимного пересчета показаний термометров с этими шкалами.

1.13. Перевести в градусы Цельсия следующие температуры, измеренные термометром со шкалой Фаренгейта:

—275 °F; 24 °F; 162 °F; 1465 °F.

Перевести в градусы Фаренгейта следующие температуры, измеренные в градусах Цельсия:

—186 °С; —12 °С; 127 °С; 893 °С.

Ответ: 1) —170,6 °С; —4,44 °С; 72,2 °С; 796 °С.

2) —302,8 °F; 10,40 °F; 260,6 °F; 1639 °F.

1.14. 24 августа 1960 г. на советской станции «Восток» в Антарктике была измерена температура воздуха $t = -88{,}3$ °С. По данным 1960 г., это была самая низкая температура на земном шаре. Выразить ее в градусах Фаренгейта.

Ответ: $t = -126{,}94$ °F.

1.15. При установлении своей шкалы Фаренгейт принял за 100° нормальную температуру человеческого тела. Какова, по мнению Фаренгейта, эта температура в градусах Цельсия?

Ответ: $t = 37{,}8$ °С.

1.16. Какова температура абсолютного нуля по шкале Фаренгейта?

Ответ: —459,67 °F.

1.17. Какова разность температур по международной практической шкале (в градусах Цельсия), если по шкале Фаренгейта она составляет $\Delta t = 215$ °F.

Ответ: $\Delta t = 119{,}44$ °С.

1.18. В США употребляется абсолютная шкала Ренкина [1], в которой за нуль принята температура абсолютного нуля, а цена деления такая же, как и цена деления шкалы Фаренгейта.

Какова температура по абсолютной шкале Ренкина, если в градусах Цельсия она равна 520 °С?

Ответ: 1428 °R.

1.19. После погружения металлической трубки в резервуар с водой оказалось, что уровень воды в трубе поднялся на высоту 0,75 м при длине трубки 0,95 м.

Определить глубину погружения трубки в резервуар H, если барометрическое давление $B = 750$ мм рт. ст.

Ответ: $H = 38{,}24$ м.

Глава вторая

ПЕРВЫЙ ЗАКОН ТЕРМОДИНАМИКИ

2.1. Сколько килограммов свинца можно нагреть от температуры 15 °С до температуры его плавления $t_{пл} = 327$ °С посредством удара молота массой 200 кг при падении его с высоты 2 м?

Предполагается, что вся энергия падения молота превращается в теплоту, целиком поглощаемую свинцом.

Теплоемкость свинца $c_p = 0{,}1256$ кДж/(кг·К).

Ответ: 0,0969 кг.

2.2. Свинцовый шар падает с высоты 80 м на твердую поверхность. При этом кинетическая энергия шара переходит в теплоту, 50% которой им усваивается.

На сколько градусов нагревается при падении шар?

Теплоемкость свинца $c_p = 0{,}1256$ кДж/(кг·К).

---

[1] Температура по этой шкале обозначается °R или °Ra (не следует путать с градусами шкалы Реомюра, которая сейчас нигде не употребляется).

Ответ: на 5 К.

2.3. Какова должна быть скорость свинцовой пули, чтобы пр ударе о стальную плиту она полностью расплавилась?

Предполагается, что в момент удара температура пули равн 27 °С. Температура плавления свинца $t_{пл}=327$ °С, теплота плавле ния $r_{пл}=20{,}934$ кДж/кг, а теплоемкость $c_p=0{,}1256$ кДж/(кг·К)

Ответ: 340 м/с.

2.4. Одинаковые массы ртути и воды падают с одинаковой высо ты на твердую поверхность. Перед падением и ртуть и вода имею одну и ту же температуру. Полагая, что вся энергия падения акку мулируется падающими массами, определить, у какой из них изме нение температуры будет больше и во сколько раз?

Теплоемкость ртути $c_p=0{,}140$ кДж/(кг·К).

Ответ: $\Delta t_{Hg}\approx 30\Delta t_{H_2O}$.

2.5. При испытании двигателей для определения мощности не обходимо их тормозить (рис. 2.1). При этом работа, произведенна двигателем, расходуется на преодо ление сил трения и превращается в теплоту, часть которой (примерно 20%) рассеивается в окружающей среде, а остальная часть отводится охлаждающей тормоз водой.

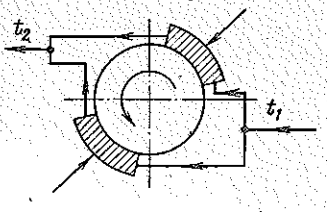


Рис. 2.1. К задаче 2.5.

Сколько воды необходимо под водить к тормозу за 1 ч, если кру тящий момент на валу $M_{кр}=2000$ Дж, частота вращения $n=1500$ об/мин, а допустимое повы шение температуры воды $\Delta t=35$ К

Теплоемкость воды c_p принят равной 4,1868 кДж/(кг·К).

Решение. Мощность двигателя целиком переходит в теплоту тре ния, выделяемую в единицу времени, а 80% этой теплоты погло щается водой. Поэтому энергетический баланс можно записать так

$$0{,}80N=m_в c_p \Delta t,$$

где $m_в$ — расход воды, кг/с; c_p — теплоемкость воды, кДж/(кг·К) $N=2\pi n M_{кр}/60$ — мощность двигателя, Вт.

Тогда

$$m_в=\frac{2\pi n M_{кр}\cdot 0{,}80}{60 c_p \Delta t}=\frac{6{,}28\cdot 1500\cdot 2000\cdot 0{,}80}{60\cdot 4{,}1868\cdot 10^3\cdot 35}=1{,}717 \text{ кг/с}=6180 \text{ кг/ч}.$$

2.6. Проводится испытание двигателя, во время которого двига тель вместо того, чтобы принимать полезную нагрузку, тормозится

На сколько градусов нагреется охлаждающая тормоз вода, если крутящий момент двигателя равен 5 кДж, а частота вращения — 1500 об/мин. Известно, что к колодкам тормоза подводится 10 т/ воды при температуре 15 °С. Предполагается, что вся работа дви гателя превращается в теплоту трения.

Ответ: на 67,6 К.

2.7. Какое количество охлаждающей воды следует подавать на колодки испытательного тормоза в 1 ч, если мощность двигателя 55 кВт, температура охлаждающей воды 10 °С, а предельно допу стимая температура воды на выходе 80 °С?

Часть теплоты трения (20%) рассеивается в окружающей среде.

Ответ: 543 кг/ч.

2.8. При торможении двигателя охлаждающая тормозные колодки вода нагревается на 30 К. Расход воды $m_в = 1500$ кг/ч.

Определить мощность двигателя, если 25% теплоты трения рассеивается в окружающей среде.

Ответ: $N = 69{,}8$ кВт.

2.9. Испытание двигателя ведется при помощи присоединенного к нему генератора. Напряжение на клеммах генератора постоянного тока $u = 220$ В, сила тока $I = 50$ А, к. п. д. генератора $\eta_г = 0{,}98$.

Определить мощность двигателя на валу.

Ответ: $N = 11{,}2$ кВт.

2.10. Определить к. п. д. двигателя автомобиля мощностью 44,0 кВт при расходе топлива 7,4 кг/ч.

Теплоту сгорания топлива $Q^р_н$ принять равной 40 МДж/кг.

Ответ: $\eta = 0{,}538$.

2.11. Мощность электростанции на выходных шинах составляет 12 МВт.

Какое количество топлива B, кг/ч, сжигается в топках котлов электростанции, если все потери энергии на станции составляют 70%, а теплота сгорания топлива $Q^р_н = 30$ МДж/кг.

Ответ: $B = 4800$ кг/ч.

2.12. Определить суточный расход топлива на электростанции мощностью $N = 100$ МВт, если ее к. п. д. $\eta_{ст} = 0{,}35$, а теплота сгорания топлива $Q^р_н = 30$ МДж/кг.

Определить также удельный расход топлива на 1 МДж выработанной энергии:

Ответ: $B_{сут} = 823$ т/сут; $b = 0{,}0953$ кг/МДж.

2.13. На электростанции мощностью $N = 100$ МВт сжигается топливо с теплотой сгорания $Q^р_н = 30$ МДж/кг. Коэффициент полезного действия станции $\eta_{ст} = 33{,}0\%$.

Определить часовой расход топлива B.

Ответ: $B = 36{,}4$ т/ч.

2.14. Паровая турбина расходует 0,00110 кг пара на получение 1 кДж электроэнергии. На производство 1 кг пара необходимых параметров затрачивается 3300 кДж.

Определить к. п. д. паротурбинной установки.

Ответ: $\eta = 27{,}6\%$.

2.15. Определить термический к. п. д. четырехпроцессного цикла, если работа и теплота, участвующие в каждом процессе, равны:

Процесс	1	2	3	4
l, кДж/кг	3	10	—8	0
q, кДж/кг	30	—10	—20	5

Ответ: $\eta_t = 0{,}143$.

2.16. Состояние газа под поршнем цилиндра определяется точкой *1* на рис. 2.2. Газ переводится в состояние *2* один раз по пути *1a2* и второй — по пути *1b2*.

Определить, будут ли отличаться в этих процессах количества подведенной и отведенной теплоты, и если да, то насколько. Известно, что давления в точках *1* и *2* равны 0,1 и 0,5 МПа соответственно, а изменение объема $V_2 - V_1 = 0{,}5$ м³.

Ответ: $Q_{1a2} - Q_{1b2} = 200$ кДж.

2.17. Какова стоимость энергии, необходимой для того, чтобы поднять 1 т оборудования на вершину телевизионной башни высотой 516 м, если цена электроэнергии составляет 2 коп/(кВт·ч) а к. п. д. подъемного механизма $\eta=0{,}85$?

Ответ: 3,3 коп.

2.18. В процессе расширения давление и объем идеального газа связаны соотношением $pv^k=\text{const}$, где $k=1{,}4$.

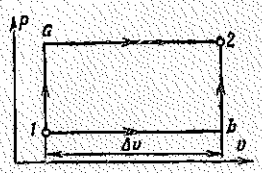


Рис. 2.2. К задаче 2.16.

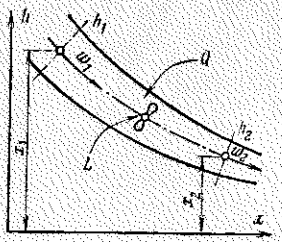


Рис. 2.3. К задаче 2.19.

Показать, что работа расширения от p_1, v_1 до p_2, v_2 определяется уравнением $l=\frac{1}{k-1}(p_1v_1-p_2v_2)$, и вычислить ее, если $p_1=1{,}2$ МПа, $v_1=0{,}1$ м³/кг и $p_2=0{,}2$ МПа, $v_2=0{,}360$ м³/кг.

Ответ: $l=120$ кДж/кг.

2.19. В канале произвольной формы (рис. 2.3) течет воздух в количестве 5 кг/с. На входе в канал энтальпия газа, скорость потока и высота входного сечения над произвольной горизонтальной плоскостью соответственно равны: $h_1=293$ кДж/кг, $w_1=30$ м/с и $x_1=30$ м, на выходе из канала $h_2=300$ кДж/кг, $w_2=15$ м/с и $x_2=10$ м. Протекая в канале, газ получает извне энергию в форме теплоты в количестве 30 кДж/с.

Какую техническую работу совершает поток газа?

Ответ: над потоком совершается работа $L=-2{,}331$ кДж/с.

2.20. Воздушный компрессор сжимает 129 кг/ч воздуха. Установлено, что при сжатии энтальпия воздуха увеличивается на 17 МДж/ч, а энтальпия охлаждающей компрессор воды — на 10 МДж/ч.

Пренебрегая потерями и изменением кинетической и потенциальной энергии, найти мощность привода компрессора.

Ответ: $N=50$ кВт.

2.21. Газ, состояние которого определяется на p, v-диаграмме (рис. 2.4) точкой *1*, переводится в состояние *2* по пути *1c2*. При этом к газу подводится 80 кДж энергии в виде теплоты и от газа получается 30 кДж работы. Затем этот же газ возвращается в исходное состояние в процессе, который описывается кривой *2a1*.

Сколько энергии в виде теплоты нужно подвести в некотором другом процессе *1d2*, чтобы от газа получить 10 кДж работы? Сколько нужно подвести или отвести теплоты в процессе *2a1*, если на сжатие расходуется 50 кДж энергии в форме работы?

Ответ: $Q_{1d2}=60$ кДж; $Q_{2a1}=-100$ кДж.

2.22. Газ, имеющий массу $m=1$ кг, находится под поршнем цилиндра в состоянии *1* (рис. 2.5) с параметрами $p_1=0{,}5$ МПа и $v_1=0{,}100$ м³/кг. Он может перейти в состояние *2* с параметрами $p_2=0{,}1$ МПа и $v_2=0{,}262$ м³/кг посредством процесса *1a2* или *1b2*. Процесс *1a2* протекает без теплообмена, его уравнение $p=cv^{-5/3}$. Процесс *1b2* характерен тем, что при его осуществлении теплота сначала подводится к газу, а затем отводится от него. В процессе *1b2* давление зависит от объема линейно.

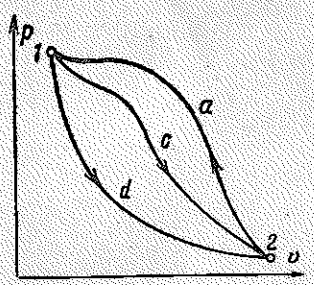


Рис. 2.4. К задаче 2.21.

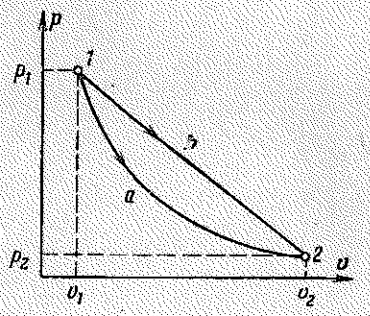


Рис. 2.5. К задаче 2.22.

Определить работу, которую совершает газ, если происходит процесс *1a2*. Какое количество теплоты, подведенное к газу в процессе *1b2* или отведенное, больше по своему абсолютному значению и насколько?

Ответ: $l_{1a2}=35{,}7$ кДж/кг; $(|q_{\text{подв}}|-|q_{\text{отв}}|)=12{,}9$ кДж/кг.

2.23. Центробежный компрессор сжимает 100 кг/ч азота. При сжатии энтальпия азота увеличивается на 200 кДж/кг.

Какова должна быть мощность привода компрессора, если теплообменом с окружающей средой и изменением кинетической и потенциальной энергии сжимаемого азота пренебречь?

Ответ: $N=5{,}56$ кВт.

Глава третья

ЗАКОНЫ И УРАВНЕНИЕ СОСТОЯНИЯ ИДЕАЛЬНЫХ ГАЗОВ

3.1. Начальное состояние азота задано параметрами: $t=200$ °С, $v=1{,}9$ м³/кг. Азот нагревается при постоянном давлении, причем объем азота увеличивается до 5,7 м³/кг.

Определить конечную температуру.

Ответ: $t=1146$ °С.

3.2. В цилиндре с подвижным поршнем находится кислород при $t=80$ °С и разрежении (вакууме), равном 427 гПа. При постоянной температуре кислород сжимается до избыточного давления $p_{\text{изб}}=1{,}2$ МПа. Барометрическое давление $B=993$ гПа.

Во сколько раз уменьшится объем кислорода?

Ответ: $V_1/V_2=22{,}96$.

3.3. Абсолютное давление[1] азота в сосуде при комнатной тем-

[1] В дальнейшем, если имеется в виду абсолютное давление, будем писать просто «давление».

пературе ($t=20$ °С) $p=2{,}2$ МПа. В сосуде азот нагревают, причем известно, что предельное избыточное давление, при котором возможна безопасная работа, $p_{изб}=6$ МПа.

Определить температуру, до которой возможно нагревание азота. Барометрическое давление $B=1000$ гПа.

Ответ: $t=539$ °С.

3.4. Определить плотность воздуха и водорода при нормальных условиях.

Ответ: $\rho_{возд}=1{,}293$ кг/м³; $\rho_{H_2}=0{,}0899$ кг/м³.

3.5. Известно, что 1 кмоль газа содержит $6{,}023\cdot10^{26}$ молекул. Для того чтобы представить себе, как велико это число, полезно проделать мысленно такой опыт.

Пусть имеется сосуд объемом в 1 см³, в котором создан полный вакуум, т. е. из этого сосуда удалены все молекулы. В стенке сосуда сделано отверстие такого размера, что из окружающего воздуха в сосуд проникают молекулы со скоростью 100 000 молекул в секунду.

Определить, сколько времени потребуется, чтобы плотность воздуха в рассматриваемом объеме стала равной плотности окружающего воздуха, если окружающий воздух находится при нормальных условиях, а скорость проникновения молекул остается неизменной.

Ответ: $8{,}51\cdot10^6$ лет.

3.6. Определить коэффициент изотермического сжатия $\lambda=\frac{1}{v}\left(\frac{\partial v}{\partial p}\right)_T$ для азота и водорода, если эти газы находятся при параметрах $p=1{,}2$ МПа и $t=430$ °С.

Ответ: $\lambda_{N_2}=\lambda_{H_2}=0{,}833$ 1/МПа.

3.7. Определить численное значение коэффициента теплового расширения $\alpha=\frac{1}{v}\left(\frac{\partial v}{\partial T}\right)_p$ и термического коэффициента давления $\beta=\frac{1}{p}\left(\frac{\partial p}{\partial T}\right)_v$ для кислорода и окиси углерода, если эти газы находятся при параметрах $p=1{,}2$ МПа и $t=430$ °С.

Ответ: $\alpha_{N_2}=\alpha_{CO}=\beta_{N_2}=\beta_{CO}=\frac{1}{703{,}15}=0{,}001422$ 1/К.

3.8. Паротурбинная установка мощностью 100 МВт расходует 0,37 кг топлива на 1 кВт·ч.

Какова должна быть суммарная массовая производительность вентиляторов, подающих воздух в топку котла, если для сжигания 1 кг топлива требуется 15 м³ воздуха при нормальных условиях?

Ответ: $m=717{,}2$ т/ч.

3.9. Универсальная газовая постоянная в СИ $\mu R=8314{,}41$ Дж/(кмоль·К). Вычислить универсальную газовую постоянную в системе единиц МКГСС.

Ответ: $\mu R=847{,}84$ кгс·м/(кмоль·К).

3.10. Определить удельный объем кислорода при давлении 2,3 МПа и температуре 280 °С. Задачу решить в Международной системе единиц.

Ответ: $v=0{,}0625$ м³/кг.

3.11. Решить задачу 3.10 в системе единиц МКГСС.

Ответ: $v=0{,}0625$ м³/кгс.

3.12. Определить массу воздуха, находящегося в комнате площадью 25 м² и высотой 3,2 м. Принять, что температура воздуха в комнате $t=22$ °С, а барометрическое давление $B=986{,}5$ гПа.

Ответ: $m=93{,}1$ кг.

3.13. Определить плотности азота при давлениях 1 и 6 МПа. Температура азота $t=400$ °С.

Ответ: $\rho_1=5{,}01$ кг/м³; $\rho_2=30{,}1$ кг/м³.

3.14. Чему равна плотность воздуха при параметрах $t=20$ °С и $p=1{,}5$ МПа?

Ответ: $\rho=17{,}82$ кг/м³.

3.15. Давление водяных паров в воздухе комнаты равно 2 кПа. Сколько содержится водяного пара в комнате? Площадь комнаты 25 м², высота 3 м, температура воздуха 25 °С.

Ответ: $m=1{,}09$ кг.

3.16. В комнате площадью 35 м² и высотой 3,1 м воздух находится при $t=23$ °С и барометрическом давлении $B=973$ гПа.

Какое количество воздуха проникнет с улицы в комнату, если барометрическое давление увеличится до $B=1013$ гПа. Температура воздуха остается постоянной.

Ответ: $\Delta m=5{,}1$ кг.

3.17. Измерение объемов газов может дать представление о строении молекул газа.

Определить, действительно ли молекула кислорода является двухатомной, если известно, что в объеме, равном 4 дм³, находится 5 г кислорода при $t=150$ °С и $p=0{,}1373$ МПа.

Определить, чему было бы равно давление газа, если бы молекула состояла из трех атомов кислорода (озон O_3)?

Ответ: $\mu=32$; молекула кислорода состоит из двух атомов. Для озона $p=0{,}0916$ МПа.

3.18. При экспериментальном исследовании удельных объемов паров жидкостей определяют массу пара, находящегося в измерительном сосуде (пьезометре) объемом V. Для этого пар конденсируют и получившуюся жидкость выпускают в бюксу и взвешивают. Однако при атмосферном давлении в пьезометре остается некоторое количество вещества, массу которого необходимо учесть. Это с успехом делается с помощью формул для идеального газа.

Определить массу оставшегося в пьезометре вещества, если известно, что объем пьезометра $V=420$ см³, $t=320$ °С и $p=0{,}1$ МПа. Исследуемым веществом является этиловый спирт C_2H_5OH.

Ответ: $m=0{,}392$ г.

3.19. При измерении расхода воздуха с помощью дроссельной шайбы (см. задачу 1.8) было зафиксировано, что при $p=1000$ гПа и $t=20$ °С расход воздуха равен 24 дм³/мин.

Определить массовый расход воздуха в килограммах в минуту и объемный расход в кубических метрах в минуту при нормальных условиях.

Ответ: $m=0{,}0285$ кг/мин; $V_н=0{,}0221$ м³/мин.

3.20. Производительность воздушного компрессора при нормальных условиях $V_н=500$ м³/ч. Чему равна массовая производительность компрессора?

Ответ: $m=647$ кг/ч.

3.21. Для экспериментального определения удельного объема реальных газов иногда пользуются методом гидростатического взве-

шивания, измеряя в опыте выталкивающую силу, которая действует на поплавок, помещенный в сжатый газ. Однако при расчете чувствительности устройства, измеряющего выталкивающую силу, приходится приближенно оценивать значение последней. В некоторых случаях для такой оценки можно воспользоваться формулами для идеального газа.

Рассчитать, пользуясь формулами для идеального газа, какую выталкивающую силу будет испытывать поплавок объемом 8 см³ в двуокиси углерода $t=700$ °С и $p=60$ МПа.

Ответ: $F=25{,}58\cdot10^{-3}$ Н.

3.22. 0,03 м³ кислорода, отнесенного к нормальным условиям, находится в сосуде емкостью 650 см³. Определить показания манометра, измеряющего давление в этом сосуде, если температура кислорода $t=200$ °С. Атмосферное давление $B=1016$ гПа.

Ответ: избыточное давление $p_{\text{ман}}=0{,}708$ МПа.

3.23. При температуре $t=800$ °С и давлении $p=0{,}1$ МПа плотность газа $\rho=0{,}4477$ кг/м³.

Что это за газ?

Ответ: аргон.

3.24. Компрессор подает кислород в резервную емкостью 3 м³; избыточное давление в резервуаре увеличивается при этом от 0,01 до 0,6 МПа, а температура газа — от 15 до 30°С.

Определить массу поданного компрессором кислорода. Барометрическое давление $B=993$ гПа.

Ответ: $\Delta m=22{,}2$ кг.

3.25. Масса пустого баллона для аргона емкостью 40 дм³ равна 64 кг.

Определить массу баллона с аргоном, если при температуре $t=15$ °С баллон наполняют газом до давления $p=15$ МПа?

Как изменится давление аргона, если баллон внести в помещение с температурой $t=25$ °С?

Ответ: масса баллона с аргоном равна 74,0 кг; давление увеличится до 15,52 МПа.

3.26. В сосуде объемом 5 м³ находится воздух при барометрическом давлении $B=0{,}1$ МПа и температуре 300 °С. Затем воздух выкачивается до тех пор, пока в сосуде не образуется вакуум, равный 800 гПа. Температура воздуха после выкачивания остается той же.

Сколько воздуха выкачано? Чему будет равно давление в сосуде после выкачивания, если оставшийся воздух охладить до температуры $t=20$ °С?

Ответ: выкачано 2,43 кг воздуха. После охлаждения воздуха давление будет равным 10,1 кПа.

3.27. При точном взвешивании на аналитических весах приходится вводить поправку на то, что взвешиваемое тело и гири, находящиеся на различных чашках весов, испытывают со стороны воздуха различную выталкивающую силу.

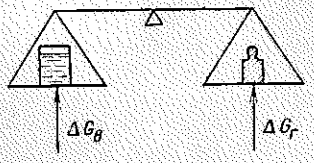


Рис. 3.1. К задаче 3.27.

Каков вес воды в бюксе (рис. 3.1), взвешиваемой на аналитических весах, если при равновесии весов на их чашку поставлены гири общим весом 20,563 гс? Удельный вес материала гирь $\gamma_г=8{,}4$ гс/см³, а удельный вес воды вместе с бюксой $\gamma_в=$

=1,2 гс/см³. Взвешивание произведено в воздухе при температуре =20 °С и барометрическом давлении $B=1007$ гПа.

Решение. При равновесии весов имеет место следующее равенство сил:

$$G_г - \Delta G_г = G_в - \Delta G_в,$$

где $G_г$ — вес гирь в пустоте (номинальное значение веса гирь есть их вес в пустоте); $\Delta G_г$ — выталкивающая сила, действующая на гири; $G_в$ — вес воды (в пустоте); $\Delta G_в$ — выталкивающая сила, действующая на воду.

Отсюда истинный вес взвешиваемой воды

$$G_в = G_г + \Delta G_в - \Delta G_г.$$

Согласно закону Архимеда выталкивающая сила равна весу вытесненного воздуха, поэтому

$$\Delta G_в = V_в \frac{1}{v} = \frac{G_г}{\gamma_в v} \text{ и } \Delta G_г = V_г \frac{1}{v} = \frac{G_г}{\gamma_г v},$$

где $V_в$ и $V_г$ — объемы взвешиваемой воды и гирь соответственно, а v — удельный объем воздуха.

При расчете поправки на выталкивающую силу воды $\Delta G_в$ принято, что $G_в \approx G_г$; это допустимо, так как выталкивающая сила мала.

Подставляя полученные выражения для $\Delta G_в$ и $\Delta G_г$ в основную формулу, окончательно получаем:

$$G_в = G_г \left[1 + \frac{1}{v}\left(\frac{1}{\gamma_в} - \frac{1}{\gamma_г}\right)\right].$$

Удельный объем воздуха

$$v = \frac{847{,}84 \cdot 293{,}15 \cdot 98066{,}5}{28{,}96 \cdot 100\,700 \cdot 10^4} = 0{,}83578 \text{ м}^3/\text{кгс} = 835{,}78 \text{ см}^3/\text{гс}.$$

Вес воды в бюксе

$$G_в = 20{,}563\left[1 + \frac{1}{835{,}78}\left(\frac{1}{1{,}2} - \frac{1}{8{,}4}\right)\right] = 20{,}581 \text{ гс}.$$

Таким образом, поправка составит приблизительно 0,1 %.

3.28. Решить задачу 3.27, применяя единицы СИ.

Решение. Заменяя в основном уравнении равновесия

$$G_в = G_г + \Delta G_в - \Delta G_г$$

весá произведениями масс на ускорения свободного падения, получаем:

$$m_в g = m_г g + \Delta(m_в g) - \Delta(m_г g).$$

В этом уравнении ускорения g везде одни и те же (тела, находящиеся и на левой и на правой чашках весов, притягиваются к земле с одним и тем же ускорением), поэтому их можно сократить.

Тогда получаем:

$$m_в = m_г + \Delta m_в - \Delta m_г.$$

Выталкивающие силы

$$\Delta (m_в g) = V_в \rho g = \frac{m_г \rho}{\rho_в} g;$$

$$\Delta (m_г g) = V_г \rho g = \frac{m_г \rho}{\rho_г} g.$$

Здесь ρ — плотность воздуха, кг/м³.
После сокращения на g получим:

$$\Delta m_в = m_г \frac{\rho}{\rho_в} \text{ и } \Delta m_г = m_г \frac{\rho}{\rho_г}.$$

Основное уравнение равновесия примет вид:

$$m_в = m_г \left[1 + \rho \left(\frac{1}{\rho_в} - \frac{1}{\rho_г}\right)\right].$$

Плотность воздуха равна (согласно уравнению $p = \rho RT$):

$$\rho = \frac{p}{RT} = \frac{100\,700}{\frac{8314,41}{28,96} \cdot 293,15} = 1,1965 \text{ кг/м}^3.$$

Масса воды в бюксе

$$m_в = 20,563 \cdot 10^{-3} \left[1 + 1,1965 \left(\frac{1}{1200} - \frac{1}{8400}\right)\right] =$$

$$= 20,581 \cdot 10^{-3} \text{ кг} = 20,581 \text{ г}.$$

Решение этой задачи показывает, что при взвешивании на чашечных весах фактически определяется масса исследуемого вещества, так как гири и вещество притягиваются к земле с одинаковым ускорением свободного падения.

3.29. На аналитических весах взвешивается образец из пластмассы, причем в момент равновесия на весах стоят гири общей массой 80,146 г.

Определить истинную массу образца (т. е. с учетом поправки на выталкивающую силу воздуха), если известно, что плотность пластмассы $\rho_п = 0,2$ г/см³, а плотность вещества гирь $\rho_г = 8,4$ г/см³. Взвешивание производится в комнате при параметрах воздуха $t = 25$ °С и $p = 0,102$ МПа.

Ответ: $m = 80,612$ г, т. е. поправка составляет приблизительно 0,6%.

Глава четвертая

ТЕПЛОЕМКОСТЬ, ЭНТАЛЬПИЯ И ВНУТРЕННЯЯ ЭНЕРГИЯ ГАЗОВ В ИДЕАЛЬНОМ СОСТОЯНИИ

При решении задач данного раздела там, где это оговорено, следует пользоваться таблицами термодинамических функций идеального газа, приведенными в приложении (табл. 9—24). Для подсчета теплоемкости по квантовой теории в приложении дана таблица функций Эйнштейна (табл. 8).

4.1. Определить при помощи молекулярно-кинетической теории газов объемные теплоемкости при постоянном объеме c'_v и массовые

теплоемкости при постоянном давлении c_p для азота и сероводорода, молекула которого нелинейна.

Ответ:

Газ	c'_v, кДж/(м³·К)	c'_p, кДж/(кг·К)
N_2	0,928	1,039
H_2S	1,114	0,978

4.2. Какое количество теплоты необходимо подвести к воздуху, заключенному в сосуде объемом 20 дм³ при $p=1$ МПа и $t_1=20$ °С, чтобы поднять его температуру до $t_2=600$ °С? При решении воспользоваться таблицами.

Ответ: $Q=105{,}5$ кДж.

4.3. Определить изменение внутренней энергии 0,4 кг азота при расширении его в цилиндре с подвижным поршнем, если в результате процесса температура азота растет от 150 до 500 °С. Решить задачу, пользуясь таблицами. Определить относительную ошибку, получаемую в случае, если считать внутреннюю энергию по молекулярно-кинетической теории.

Ответ: $\Delta U=109{,}12$ кДж; $\delta=4\%$.

4.4. Определить значение энтальпии воздуха, отсчитанное от 0 °С при $t_1=287$ °С и $t_2=560$ °С, если известна интерполяционная формула для истинной теплоемкости воздуха

$$\mu c_p=(6{,}90+14{,}8\cdot10^{-4}t-20{,}1\cdot10^{-8}t^2)\cdot4{,}1868 \text{ кДж/(кмоль·К)}.$$

Решение: Известно, что $dh=\int_{t_0}^{t} c_p dt$. Вследствие того, что $h_0=0$ при $t_0=0$°С, $h_{287}=\int_0^{287}(6{,}90+14{,}8\cdot10^{-4}t-20{,}1\cdot10^{-8}t^2)\times$

$\times 4{,}1868\,dt=(6{,}9\cdot287+7{,}4\cdot10^{-4}\cdot287^2-6{,}7\cdot10^{-8}\cdot287^3)\cdot4{,}1868=$

$=8540$ кДж/кг.

Аналогично

$$h_{560}=(6{,}9\cdot560+7{,}4\cdot10^{-4}\cdot560^2-6{,}7\cdot10^{-8}\cdot560^3)\cdot4{,}1868=$$

$$=17\,420 \text{ кДж/кг}.$$

4.5. В компрессоре газовой турбины сжимается воздух. Начальная температура воздуха $t_1=30$ °С, температура после сжатия $t_2=150$ °С.

Определить изменение энтальпии и внутренней энергии воздуха в процессе сжатия, пользуясь таблицами.

Ответ: $\Delta h=121$ кДж/кг; $\Delta u=86{,}7$ кДж/кг.

4.6. В регенеративном подогревателе газовой турбины воздух нагревается при постоянном давлении от $t_1=130$ °С до $t_2=500$ °С.

Определить количество теплоты, сообщенной воздуху в единицу времени, если расход его составляет 250 кг/ч. Ответ дать в килоджоулях в секунду и в киловаттах. Для решения воспользоваться таблицами.

Ответ: $Q=27$ кДж/с$=27$ кВт.

4.7. Баллон с водородом выносится из помещения с температурой 5 °С в машинный зал, где температура достигает 25 °С.

Определить количество теплоты, полученной газом после выра нивания температуры, если начальное давление в баллоне составл ло 12 МПа. Объем баллона 40 дм³.

Определить также изменение энтальпии водорода.

Ответ: $Q_v = 84{,}24$ кДж; $\Delta H = 118{,}27$ кДж.

4.8. В закрытом сосуде емкостью $V = 1{,}5$ м³ содержится кисл род при $p_1 = 0{,}3$ МПа и $t_1 = 25$ °С.

Определить конечную температуру после подвода к га 4000 кДж тепла.

Ответ: $t_2 = 917{,}9$ °С.

4.9. Воздух выходит из компрессора при $p_1 = 0{,}7$ МПа и $t_2 =$ $= 160$ °С и поступает в холодильник. На выходе из холодильни температура воздуха равна 25 °С.

Определить количество теплоты, отданной охлаждающей во в течение часа, если производительность компрессора $V = 6$ м³/ми

Ответ: $Q = 275\,435$ кДж/ч.

4.10. По экспериментальным данным, мольная теплоемкос аммиака μc_p при 300 К равна 28,50 кДж/(моль·К), а при $T =$ $= 800$ К 40,1 кДж/(кмоль·К).

Установить, пользуясь приведенными значениями, интерполяцио ную формулу температурной зависимости теплоемкости, принима линейный характер указанной зависимости.

Интерполяционную формулу составить для случаев, когда те пература выражена в Кельвинах и в градусах Цельсия.

Ответ: $\mu c_p = 21{,}54 + 0{,}0232T$, кДж/(кмоль·К);

$\mu c_p = 27{,}88 + 0{,}0232t$, кДж/(кмоль·°С).

4.11. Зависимость мольной теплоемкости окиси углерода от те пературы выражается следующими экспериментальными данны

T, К	300	500	700	800	1500	200
μc_p, кДж/(кмоль·К) . .	29,13	29,76	31,10	32,44	34,99	35,

Выразить, воспользовавшись методом наименьших квадрато зависимость $\mu c_p = f(T)$, задавшись уравнением вида

$$\mu c_p = a + bT.$$

Проверить точность получения уравнения.

Решение. Сущность метода наименьших квадратов в применени к нашей задаче в кратких чертах заключается в следующем.

Экспериментальные данные не абсолютно точны, а имеют сист матические и случайные ошибки. Поэтому необходимо составить т кую формулу зависимости между теплоемкостью и температуро которая давала бы при подсчете минимум погрешностей. В теори вероятности доказывается, что ошибка минимальна, когда сумм квадратов разностей между вычисленными и экспериментальны данными минимальна.

Сумма квадратов разности $\Sigma[\mu c_p - (a + bT)]^2$ есть функция п стоянных a и b. Ее значение минимально в случае равенства нул ее частных производных. Поэтому

$$\left[\frac{\partial \varphi(a,b)}{\partial a}\right]_b = \Sigma 2\,[\mu c_p - a - bI)\,(-1) = 0;$$

$$\left[\frac{\partial \varphi(a,b)}{\partial b}\right]_a = \Sigma 2\,[\mu c_p - a - bT)\,(-T) = 0.$$

Решая систему двух уравнений с двумя неизвестными

$$\begin{cases} \sum_1^n - \mu c_p + na + b\sum_1^n T = 0; \\ \sum_1^n - \mu c_p + a\sum_1^n T + b\sum_1^n T^2 = 0, \end{cases}$$

где n — число экспериментальных точек, определяем постоянные a и b.

Для упрощения расчетов вводим в качестве аргумента вместо T величину $T^* = (T-300)/100$.

Необходимые для расчета данные сводим в таблицу:

T	μc_p	T^*	$(T^*)^2$	$\mu c_p T^*$
300	29,13	0	0	0
500	29,76	2	4	59,52
700	31,10	4	16	124,40
900	32,44	6	36	194,64
1500	34,99	12	144	419,88
2000	35,96	17	289	611,32
Σ	193,38	41	489	1409,76

Составляем уравнения:

$$193{,}38 = 6a + 41b;$$
$$1409{,}76 = 41a + 489b.$$

Решая систему уравнений, находим: $a = 29{,}34$; $b = 0{,}422$.

Следовательно,

$$\mu c_p = 29{,}34 + 0{,}422\frac{T-300}{100}, \text{ кДж/(кмоль·К)};$$

$$\mu c_p = 28{,}07 + 42{,}2\cdot 10^{-4}T, \text{ кДж/(кмоль·К)}.$$

Сравним опытные значения теплоемкости с подсчитанными по уравнению:

T, К	300	500	700	900	1500	2000
μc_p, кДж/(кмоль·К) (опыт)	29,13	29,76	31,10	32,44	34,99	35,96
μc_p, кДж/(кмоль·К) (расчет)	29,34	30,18	31,02	32,86	34,40	36,51

Совпадение с экспериментальными данными было бы ближе при использовании уравнения вида $\mu c_p = a + bT + cT^2$. В этом случае составляется и решается система трех уравнений с тремя неизвестными.

4.12. При определении средней изобарной теплоемкости воздуха используется проточный калориметр с электрическим нагревателем.

Определить среднюю массовую теплоемкость воздуха $c_{p\,m}$, про текающего через калориметр, если при включении электрическог нагревателя сила тока равна 0,46 А, напряжение на концах нагрева теля 25,33 В, а разность температур воздуха до и после нагрева теля 18 К. Расход воздуха через калориметр $V=0{,}55\cdot10^{-3}$ м³/с давление $p=750$ мм рт. ст.; температура воздуха, поступающег в калориметр, 297 К.

Ответ: $c_{p_m}=1{,}00387$ кДж/(кг·К).

4.13. Рассчитать теплоемкость c_v окиси азота при постоянно объеме при $t=1600$ °С, учитывая энергию колебаний атомов в мо лекуле и считая колебания гармоническими. Из опытных данных п спектроскопическому исследованию газа известна колебательная ча стота $\omega=1906$ см$^{-1}$ *. Сравнить полученную теплоемкость с таблич ным ее значением: $c_v=0{,}940$ кДж/(кг·К).

Решение. Мольная теплоемкость газов в идеальном состоянии может быть приближенно подсчитана по формуле, которая дается квантовой теорией:

$$\mu c_v=\frac{3+n}{2}\mu R+\mu R\Sigma\left(\frac{h\nu}{kT}\right)^2\frac{e^{h\nu/k}}{\left(\frac{h\nu}{e^{kT}}-1\right)^2}, \qquad (1$$

где n — число вращательных степеней свободы, для двухатомных и линейных многоатомных молекул $n=2$; m — число атомов для двухатомных молекул $n=1$; μR, кДж/(кмоль·К) — универсальная газовая постоянная; $h=6{,}62\cdot10^{-34}$ Дж/с — постоянная Планка; $k=1{,}38\cdot10^{-23}$ Дж/К — постоянная Больцмана; T — температура, К; ν, 1/с — частота колебаний.

Число колебательных степеней свободы $i=3m-(3+n)-(m-$ число атомов в молекуле).

Формулу (1) можно представить в виде

$$\mu c_v=\frac{3+n}{2}\mu R+\sum_i\mu Rf\left(\frac{\Theta}{T}\right), \qquad (2$$

где $\Theta=h\nu/k=\omega hc/k$ — величина, называемая «характеристическо температурой». Значения $\mu Rf\left(\frac{\Theta}{T}\right)=C$ табулированы и приве дены в табл. 8 приложения.

Решая задачу, подсчитываем значения характеристической тем пературы $\Theta=\omega hc/k$

$$\Theta=1906\,\frac{6{,}62\cdot10^{-34}}{1{,}38\cdot10^{-23}}\cdot2{,}998\cdot10^{10}=2741\text{ К}$$

---

* В спектроскопии принято колебательные частоты ω выражать в «вол новых числах». Они связаны с обычными частотами ν, 1/с, соотношением $\omega=\nu/c$, см$^{-1}$, в котором константа c равна $2{,}998\cdot10^{10}$ см/с, т. е. скорости свет в пустоте.

Значения колебательных частот (так же, как и в последующих задачах взяты из [2].

величину $\frac{\Theta}{T}=\frac{2741}{1873}=1,464$, согласно которой в табл. 8 приложения находим значение:

$$C=\mu Rf\left(\frac{\Theta}{T}\right)=6,988 \text{ кДж/(кг·К)}.$$

Искомая теплоемкость

$$c_v=\frac{\mu c_v}{\mu}=\frac{1}{30,00}\left(\frac{3+2}{2}\cdot 8,314+6,988\right)=0,926 \text{ кДж/(кг·К)}.$$

Расхождение с табличным значением $\Delta c_v=0,940-0,926=0,014$ кДж/(кг·К) составляет 1,5%. Оно объясняется тем, что предложенная формула не учитывает ангармоничность колебаний, возбуждений электронных уровней и взаимодействия между колебательной, вращательной и электронной энергиями.

4.14. Определить мольную теплоемкость μc_p кислорода при $t_1=500$ °С и $t_2=1000$ °С, учитывая колебательную составляющую и считая колебания гармоническими. Сравнить полученные результаты с табличными данными.

Ответ: При $t_1=500$°С $\mu c_{p\text{расч}}=25,12$ кДж/(кмоль·К); $\mu c_{p\text{табл}}=25,23$ кДж/(кмоль·К).

При $t_2=1000$ °С $\mu c_{p\text{расч}}=27,42$ кДж/(кмоль·К); $\mu c_{p\text{табл}}=27,59$ кДж/(кмоль·К).

4.15. Подсчитать теплоемкость c_p окиси углерода при $T=1000$ К, учитывая наличие колебательной составляющей и считая колебания гармоническими. Сравнить результаты с табличными данными.

Ответ: $c_{p\text{расч}}=1,180\cdot 10^3$ Дж/(кг·К); $c_{p\text{табл}}=1,184\cdot 10^3$ Дж(кг·К); расхождение $\delta=0,34\%$.

4.16. Рассчитать теплоемкость c_p двуокиси углерода при $t=800$ °С, учитывая энергию колебаний атомов в молекуле и считая колебания гармоническими. Сравнить полученные данные с табличными. Определить, какова ошибка (в %), если рассчитывать теплоемкость по молекулярно-кинетической теории теплоемкости.

Указание. Каждой степени свободы колебательного движения отвечает своя частота ω и своя характеристическая температура Θ (см. задачу 4.13). Если молекула симметрична, то две или более частоты могут совпадать. Соответствующие им колебания называются вырожденными. В формулу для теплоемкости они входят с соответствующим множителем. Молекула двуокиси углерода линейна, поэтому имеет четыре степени свободы колебательного движения и, следовательно, четыре характеристических частоты колебаний. По данным спектроскопического анализа, эти частоты таковы: $\omega_1=1,355$ см$^{-1}$, $\omega_2=673$ см$^{-1}$ (2 частоты) и $\omega_3=2396$ см$^{-1}$. Две частоты (ω_2) совпадают, иначе говоря частота ω_2 дважды вырождена.

Расчет мольной теплоемкости μc_p, кДж/(кмоль·К), должен производиться по следующей формуле:

$$\mu c_p=\frac{5+2}{2}\mu R+\left[2f\left(\frac{\Theta_{1,2}}{T}\right)+f\left(\frac{\Theta_3}{T}\right)+f\left(\frac{\Theta_4}{T}\right)\right]\mu R.$$

Ответ: $c_{p\text{расч}}=1,245$ кДж/(кг·К); $c_{p\text{табл}}=1,254$ кДж/(кг·К); $\delta=0,8\%$.

По молекулярно-кинетической теории $c_p = 0{,}66$ кДж/(кг·К). Расхождение составляет примерно 47%.

4.17. Определить мольную теплоемкость μc_p сероводорода при $t = 1000$ °С, учитывая энергию колебаний атомов в молекуле и считая колебания гармоническими. Молекула сероводорода имеет нелинейную структуру и обладает тремя колебательными степенями свободы. Колебательные частоты равны:

$$\omega_1 = 2722 \text{ см}^{-1};\ \omega_2 = 1215 \text{ см}^{-1};\ \omega_3 = 2733 \text{ см}^{-1}.$$

Сравнить полученные данные с табличными.

Ответ: $c_{p\,\text{расч}} = 1{,}448$ кДж/(кг·К); $c_{p\,\text{табл}} = 1{,}431$ кДж/(кг·К); $\delta = 1{,}2\%$.

Глава пятая

СМЕСИ ИДЕАЛЬНЫХ ГАЗОВ

5.1. Смесь идеальных газов состоит из m_I кг газа I, m_II кг газа II и m_III кг газа III.

Определить, чему равно давление смеси, если объем смеси газов равен $V_\text{см}$, а температура смеси $T_\text{см}$.

Ответ: $p_\text{см} = \dfrac{T_\text{см}}{V_\text{см}} \sum_\text{I}^\text{III} m_i R_i.$

5.2. Смесь 10 кг кислорода и 15 кг азота имеет давление 0,3 МПа и температуру 27 °С.

Определить: мольные доли z_i каждого газа в смеси, кажущуюся молекулярную массу смеси, удельную газовую постоянную, общий объем смеси, парциальные давления и объемы.

Ответ: $z_{O_2} = 0{,}369$; $z_{N_2} = 0{,}631$; $\mu_\text{см} = 29{,}5$;

$R_\text{см} = 282$ Дж/(кг·К); $p_{O_2} = 0{,}1107$ МПа;

$p_{N_2} = 0{,}1893$ МПа; $V_\text{см} = 7{,}06$ м³;

$V_{O_2} = 2{,}60$ м³; $V_{N_2} = 4{,}46$ м³.

5.3. В сосуде находится смесь, состоящая из одного киломоля кислорода и двух киломолей азота при $p_1 = 0{,}1$ МПа и $t_1 = 30$ °С. Эта смесь охлаждается при постоянном объеме до температуры $t_2 = 10$ °С.

Определить изменение внутренней энергии смеси.

Ответ: $\Delta u_\text{см} = 69{,}8$ кДж/кг.

5.4. Воздух, если считать, что он является смесью только азота и кислорода, имеет следующий объемный состав:

$$r_{N_2} = 79{,}0\%;\ r_{O_2} = 21{,}0\%.$$

Определить массовые доли азота и кислорода в воздухе; вычислить газовую постоянную воздуха.

Ответ: $R_\text{см} = 0{,}288$ кДж/(кг·К); $g_{N_2} = 0{,}773$; $g_{O_2} = 0{,}227$; $\mu = 28{,}84$.

5.5. Воздух объемом 0,3 м³ смешивается с 0,5 кг углекислого газа. Оба газа до смешения имели параметры $p = 0{,}6$ МПа и $t = 45$ °С.

Определить парциальное давление углекислого газа после смешения.

Ответ: $p_{CO_2} = 85{,}5$ кПа.

5.6. Дымовые газы имеют следующий массовый состав: $g_{CO_2} = 16{,}1\%$; $g_{O_2} = 7{,}5\%$; $g_{N_2} = 76{,}4\%$.

Рассчитать энтальпию $h_{см}$ этих газов, отнесенную к 1 кг смеси при $t = 800$ °С и отсчитанную от 0 °С.

Ответ: $h_{см} = 872$ кДж/кг.

5.7. Рассчитать истинную теплоемкость c_p смеси паров двуокиси углерода и воды. Массовая доля двуокиси углерода $g_{CO_2} = 0{,}9383$.

Расчет произвести, пользуясь табл. 10 и 12 приложения для температур 200 и 400 °С.

Ответ: $c_{p,200} = 1{,}052$ кДж/(кг·К); $c_{p,400} = 1{,}172$ кДж/(кг·К).

5.8. Определить удельный объем и удельную массовую теплоемкость пара натрия при $p = 1$ МПа и $t = 927$ °С, если известно, что при этих параметрах пар натрия является смесью одноатомных и двухатомных молекул мольного состава: $r_{Na} = 0{,}8628$ и $r_{Na_2} = 0{,}1372$.

Найти парциальные давления одно- и двухатомных паров натрия.

Вычислить, как велика была бы ошибка в значении удельного объема, если бы пар натрия считался одноатомным газом.

Теплоемкости газов, составляющих смесь, рассчитать согласно молекулярно-кинетической теории. Масса моля $\mu = 23$.

Ответ: $v_{см} = 0{,}381$ м³/кг; $c_p = 0{,}837$ кДж/(кг·К); $p_{Na_2} = 0{,}1372$ МПа; $p_{Na} = 0{,}8628$ МПа; $\Delta v = 13{,}7\%$.

5.9. Энергетические установки, работающие по парогазовому циклу, в качестве рабочего тела используют смесь водяного пара и горячих продуктов сгорания топлива. Массовая доля продуктов сгорания топлива $g = 0{,}7$. Принять, что продукты сгорания обладают свойствами воздуха.

Определить теплоемкость c_p смеси при температурах 500 и 800 °С, а также удельный объем смеси при $p = 0{,}1$ МПа и $t = 500$ °С.

Ответ: $c_{p,500} = 1{,}404$ кДж/(кг·К); $c_{p,800} = 1{,}511$ кДж/(кг·К); $v_{см} = 0{,}262$ м³/кг.

5.10. В сосуде находится смесь газов, образовавшаяся в результате смешения 10 кг азота, 13 кг аргона и 27 кг двуокиси углерода.

Определить мольный состав смеси, ее удельный объем при нормальных условиях, кажущуюся мольную массу смеси и газовую постоянную, отнесенную к одному кубическому метру при нормальных условиях.

Ответ: $z_{N_2} = 0{,}275$; $z_{Ar} = 0{,}251$; $z_{CO_2} = 0{,}474$; $(v_{см})_{норм} = 0{,}579$ м³/кг; $\mu_{см} = 38{,}61$; $R'_{см} = 372$ Дж/(м³·К).

5.11. Влажный воздух представляет собой смесь сухого воздуха и водяного пара. Известно, что на каждый килограмм сухого воздуха во влажном воздухе содержится d г водяного пара.

Определить массовые и объемные доли сухого воздуха и водяного пара, плотность при нормальных условиях, газовую постоянную, отнесенную к 1 кг, и кажущуюся мольную массу смеси, если $d = 10$ г/кг сухого воздуха.

Ответ: $g_{с.в} = 0{,}9901$; $g_{в.п} = 0{,}0099$; $r_{с.в} = 0{,}9842$; $r_{в.п} = 0{,}0158$; $\rho_{н.см} = 1{,}285$ кг/м³; $R_{см} = 289$ Дж/(кг·К); $\mu_{см} = 28{,}786$.

5.12. Объемный состав горючего газа: $r_{CO} = 10\%$; $r_{H_2} = 45\%$; $r_{CH_4} = 35\%$; $r_{C_2H_4} = 4\%$; $r_{CO_2} = 3\%$; $r_{N_2} = 3\%$.

Определить кажущуюся мольную массу, плотность, удельны объем при нормальных условиях, массовую газовую постоянную парциальное давление метана в процентах и массовые доли содер жания компонентов.

Ответ: $\mu_{см} = 12{,}63$; $(\rho_{см})_н = 0{,}563$ кг/м³; $v_{см} = 1{,}776$ м³/кг $R_{см} = 0{,}658$ кДж/(кг·К); $p_{CH_4} = 35{,}0\%$; $g_{CO} = 0{,}222$; $g_{H_2} = 0{,}072$ $g_{C_2H_4} = 0{,}089$; $g_{CH_4} = 0{,}445$; $g_{N_2} = 0{,}067$; $g_{CO_2} = 0{,}105$.

5.13. Смесь газов, образовавшаяся при сжигании 1 кг мазут в топке парового котла, имеет состав, определенный парциальным объемами составляющих:

$$V_{CO_2} = 1{,}85 \text{ м}^3;\ V_{O_2} = 0{,}77 \text{ м}^3;\ V_{N_2} = 12{,}78 \text{ м}^3.$$

Определить массовые доли и парциальные давления составляю щих, если общее давление $p = 0{,}1$ МПа.

Ответ: $g_{CO_2} = 0{,}175$; $g_{N_2} = 0{,}773$; $g_{O_2} = 0{,}052$; $p_{CO_2} = 51$ гПа $p_{N_2} = 827$ гПа; $p_{O_2} = 122$ гПа.

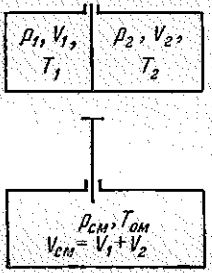


Рис. 5.1. К задаче 5.14.

5.14. Сосуд разделен перегородкой н две части, объемы которых $V_1 = 1{,}5$ м³ $V_2 = 1{,}0$ м³. В части объемом V_1 содержит ся двуокись углерода при $p_1 = 0{,}5$ МПа $t_1 = 30{,}0$ °С, а в части объемом V_2 — кисло род при $p_2 = 0{,}2$ МПа и $t_2 = 57{,}0$ °С.

Определить массовые и объемные дол двуокиси углерода и кислорода, кажущую ся молекулярную массу смеси и ее газо вую постоянную после того, как перего родка будет убрана и процесс смешени закончится.

Решение. Массы газов рассчитываю ся по уравнению состояния:

$$m_{CO_2} = \frac{p_1 v_1}{R_1 T_1} = \frac{5 \cdot 10^5 \cdot 1{,}5 \cdot 44}{8314 \cdot 303} = 13{,}10 \text{ кг};$$

$$m_{O_2} = \frac{p_2 v_2}{R_2 T_2} = \frac{2 \cdot 10^5 \cdot 1{,}0 \cdot 32}{8314 \cdot 330} = 2{,}33 \text{ кг}.$$

Массовые доли

$$g_{CO_2} = \frac{m_{CO_2}}{\sum_{j=1}^{n} m_j} = \frac{13{,}10}{13{,}10 + 2{,}33} = 0{,}849;$$

$$g_{O_2} = 1 - 0{,}849 = 0{,}151.$$

Объемные доли

$$r_{CO_2} = \frac{g_{CO_2}/\mu_{CO_2}}{\sum_{j=1}^{n} g_j/\mu_j} = \frac{0{,}849/44}{0{,}849/44 + 0{,}151/32} = 0{,}803;$$

$$r_{O_2} = \frac{0{,}151/32}{0{,}849/44 + 0{,}151/32} = 0{,}197.$$

Кажущаяся молекулярная масса и газовая постоянная смеси

$$\mu_{см} = \frac{1}{\sum_{j=1}^{n} g_j/\mu_j} = \frac{1}{0{,}02402} = 41{,}7;$$

$$R_{см} = \frac{\mu R}{\mu_{см}} = \frac{8314}{41{,}7} = 199{,}3 \text{ Дж/(кг·К)}.$$

5.15. Образование смеси двух газов — азота и гелия — происходит так же, как и в задаче 5.14.

Состояние газов до смешения:

	N_2	He_2
Масса m, кг	10	5
Объем V, м³	1,5	1,0
Температура t, °С	120	860

Найти давление и температуру смеси, объемные доли компонентов, а также парциальные давления азота и гелия после окончания процесса смешения. Предполагается, что теплоемкости не зависят от температуры; их следует рассчитать по формуле молекулярно-кинетической теории. Теплообмен со средой отсутствует.

Ответ: $p_{см} = 4{,}77$ МПа; $t_{см} = 621$ °С; $r_{N_2} = 0{,}222$; $r_{He} = 0{,}778$; $p_{N_2} = 1{,}06$ МПа; $p_{He} = 3{,}71$ МПа.

5.16. Воспользовавшись условиями задачи 5.15, рассчитать температуру смеси при помощи табл. 14 приложения.

Решение. По условию задачи происходит так называемое «смешение в объеме» без теплообмена со средой, внутренняя энергия системы после смешения остается неизменной. Следовательно,

$$U_{см} = U_{N_2} + U_{He}$$

или

$$u_{см} = g_{N_2} u_{N_2} + g_{He} u_{He},$$

где g_{N_2} и g_{He} — массовые доли азота и гелия, равные:

$$g_{N_2} = \frac{10}{10+5} = \frac{2}{3}; \quad g_{He} = \frac{5}{10+5} = \frac{1}{3}.$$

Удельную внутреннюю энергию u_{N_2} азота находим в табл. 14 приложения, а удельную внутреннюю энергию гелия u_{He} (одноатомного газа) подсчитываем по формуле, которую рекомендует молекулярно-кинетическая теория. В результате получаем [1]:

[1] Необходимо помнить, что отсчет внутренних энергий (так же, как энтальпий и энтропий) в таблицах С. Л. Ривкина начинается от 0 К.

$$u_{см} = \frac{2}{3} \cdot 291,4 + \frac{1}{3} \cdot \frac{8,314 \cdot 3}{2 \cdot 4} (860 + 273) = 1372 \text{ кДж/кг}.$$

Теперь составляем таблицу, описывающую зависимость внутрен ней энергии смеси $u_{см}$ от температуры (значения которой выбираем в окрестности предполагаемой температуры смеси), пользуясь табл. 1 приложения.

t, °C	T, К	u_{N_2}', кДж/кг	$u_{He} = \frac{8,314 \cdot 3}{2 \cdot 4} \cdot T$, кДж/кг	$g_{N_2} u_{N_2}'$, кДж/кг	$g_{He} u_{He}'$, кДж/кг	$u_{см} = \sum_1^n g_i u_i'$, кДж/кг
500	773	586,7	2412	391	804	1195
600	873	669,8	2723	447	908	1355
700	973	755,2	3036	504	1012	1516

Пользуясь составленной таблицей, при помощи интерполяции находим нужную нам температуру:

$$t = f(u_{см}) = f(1372) = 611 \text{ °C}.$$

5.17. Имеются два сосуда, соединенных между собой трубкой на которой установлен кран, разобщающий их. В первом сосуде емкость которого $V_1 = 2$ м³, находится воздух при $p_1 = 1,0$ МПа и $t_1 = 27$ °C. Второй ($V_2 = 1$ м³) содержит также воздух при $p_2 = 0,2$ МПа и $t_2 = 57$ °C. Кран при этом закрыт. Затем кран открывается и система приходит в равновесное состояние.

Определить давление и температуру образовавшейся смеси. Теплоемкость считать не зависящей от температуры.

Ответ: $p_{см} = 0,733$ МПа; $t_{см} = 29,7$ °C.

5.18. Горючая смесь состоит из водорода и этана и задана объемными долями $r_{H_2} = 0,40$ и $r_{C_2H_6} = 0,60$.

Подсчитать количество воздуха, теоретически необходимое для сжигания 1 м³ смеси, отнесенного к нормальным условиям.

Решение. Уравнения реакции полного сгорания водорода и этана таковы:

$$H_2 + \frac{1}{2} O_2 = H_2O;$$

$$C_2H_6 + 3,5O_2 = 2CO_2 + 3H_2O.$$

Из этих уравнений следует, что для сжигания 1 кмоля водорода требуется 1/2 кмоля кислорода и для 1 кмоля этана 3,5 кмоля кислорода.

Учитывая, что объемы киломоля любых газов в идеальном состоянии приблизительно равны между собой ($\mu v_{норм} = 22,4$ м³/кмоль) и что в воздухе содержится 21,0% кислорода по объему, нетрудно подсчитать теоретически необходимое для сжигания отнесенного к нормальным условиям 1 м³ горючей смеси объемное количество воздуха:

$$v_{норм} = \frac{100}{21} (0,5 r_{H_2} + 3,5 r_{C_2H_6}).$$

Здесь объем $v_{норм}$ относится также к нормальным условиям. Подставляя значение r, получаем:

$$v_{норм} = \frac{100}{21}(0{,}56 \cdot 0{,}40 + 3{,}5 \cdot 0{,}60) = 10{,}95 \text{ м}^3/\text{м}^3 \text{ смеси.}$$

5.19. Горючий газ, полученный при подземной газификации ля, имеет следующий объемный состав: $N_2 = 63{,}6$; $H_2 = 14{,}5$; $O = 10{,}0$; $CO_2 = 9{,}5$; $H_2S = 0{,}6$ и $CH_4 = 1{,}8\%$.

Рассчитать приведенный к нормальным условиям объем $v_{норм}$ оздуха, теоретически необходимый для сгорания 1 м³ газа, взятого акже при нормальных условиях.

Ответ: $v_{норм} = 0{,}798$ м³/м³.

5.20. Используя условия и результаты задачи 5.19, рассчитать риведенный к нормальным условиям объем продуктов полного горания, получающихся при сгорании взятого при нормальных словиях 1 м³ газа, если полное горание его осуществляется при еоретически необходимом объеме воздуха. Влагосодержание воз-уха $d = 10$ г/кг с. в.

Решение. Приведенный к нормальным условиям полный объем родуктов сгорания на 1 м³ горючего газа, взятого также при нор-альных условиях, складывается из парциальных объемов CO_2, SO_2, $_2$ и объема водяного пара H_2O или, иначе, из объема «сухих» азов $v_{с.г}$ и объема водяного пара v_{H_2O}:

$$v = v_{с.г} + v_{H_2O},$$

е $v_{с.г} = v_{CO_2} + v_{SO_2} + v_{N_2}$.

Расчет объема CO_2. Двуокись углерода CO_2 получается результате сгорания CO и CH_4; кроме того, CO_2 содержится самом горючем газе.

Рассматривая уравнения химических реакций горения, можно ключить, что на каждый киломоль сжигаемых CO и CH_4 полу-ается 1 кмоль CO_2. Следовательно,

$$v_{CO_2} = r_{CO_2} + r_{CO} + r_{CH_4}.$$

Расчет объема O_2. На 2 кмоля сжигаемого H_2S полу-ается 2 кмоля O_2. Значит,

$$v_{SO_2} = r_{H_2S}.$$

Расчет объема N_2. Объем N_2 складывается из объема ота, содержащегося в самом горючем газе, $v_{N_2} = r_{N_2}$, м³/м³, и ъема азота, внесенного с воздухом.

Полный объем N_2

$$v_{N_2} = v_{N_2,\text{ газ}} + v_{N_2,\text{ возд}} = r_{N_2} + 0{,}79 v_0^{возд},$$

е $v_0^{возд} = 0{,}798$ м³/м³ — теоретически необходимый объем воздуха.

Таким образом, объем сухих газов

$$v_{с.г} = v_{CO_2} + v_{SO_2} + v_{N_2} = r_{CO_2} + r_{CO} + r_{CH_4} + r_{H_2S} + r_{N_2} + 0{,}79 v_0 = 0{,}095 + 0{,}100 + 0{,}018 + 0{,}006 + 0{,}636 + 0{,}79 \cdot 0{,}798 = 1{,}485 \text{ м}^3/\text{м}^3.$$

Объем водяного пара складывается из объема водяного пар получающегося при сгорании водорода, сероводорода и метан а также из объема водяного пара, внесенного с воздухом. Рассма ривая уравнения химических реакций, видим, что на 1 кмоль сж гаемого H_2 получается 1 кмоль H_2O, на 2 кмоля H_2S — 2 кмоля H_2 и на 1 кмоль CH_4 — 2 кмоля H_2O. Значит, объем водяного пар получающийся при сжигании 1 м³ горючего газа, равен:

$$v^{\Gamma}_{H_2O} = r_{H_2} + r_{H_2S} + 2r_{CH_4}.$$

Объем водяного пара $v^{возд}_{H_2O}$, внесенного с воздухом, равен:

$$v^{возд}_{H_2O} = \frac{v_0 \rho^{возд}_{норм} d}{1000 \rho^{H_2O}_{норм}},$$

где $v_0 = 0{,}798$ м³/м³ — теоретически необходимый объем воздух $\rho^{возд}_{норм} = \frac{\mu_{возд}}{22{,}4} = \frac{29}{22{,}4} = 1{,}293$ кг/м³ — плотность сухого воздуха п нормальных условиях; $\rho^{H_2O}_{норм} = \frac{\mu_{H_2O}}{22{,}4} = \frac{18{,}016}{22{,}4} = 0{,}805$ кг/м³ — плотнос водяного пара при нормальных условиях.

Таким образом, полный объем водяного пара

$$v_{H_2O} = v^{\Gamma}_{H_2H} + v^{позд}_{H_2O} = r_{H_2S} + 2r_{CH_4} + v_0 \frac{\rho^{позд}_{норм} d}{1000 \rho^{H_2H}_{норм}} =$$

$$= 0{,}145 + 0{,}006 + 2 \cdot 0{,}018 + 0{,}798 \frac{1{,}293 \cdot 10}{1000 \cdot 0{,}805} = 0{,}200 \text{ м}^3/\text{м}^3.$$

Наконец, искомый полный объем газов

$$v = v_{с.г} + v_{H_2O} = 1{,}485 + 0{,}200 = 1{,}685 \text{ м}^3/\text{м}^3.$$

5.21. Рассчитать приведенный к нормальным условиям объ продуктов полного сгорания этановодородной смеси, состав котор задан в задаче 5.18. Объем воздуха, теоретически необходимый д сгорания взятого при нормальных условиях 1 м³ смеси, взять той же задачи. Влагосодержание воздуха $d = 10$ г/кг с. в.

Ответ: $v = 12{,}226$ м³/м³ смеси.

Глава шестая

ПРОЦЕССЫ ИЗМЕНЕНИЯ СОСТОЯНИЯ ИДЕАЛЬНЫХ ГАЗОВ

6.1. В закрытом сосуде объемом 0,8 м³ находится двуок углерода при $p_1 = 2{,}2$ МПа и $t_1 = 20$ °С.

Газу сообщается $Q_v = 4600$ кДж теплоты.

Определить температуру и давление двуокиси углерода в к це процесса. Задачу решить двумя способами: 1) считая тепло кость постоянной и принимая ее по молекулярно-кинетической т рии; 2) считая теплоемкость зависящей от температуры и пользу табл. 16 приложения.

Решение. Количество теплоты, выраженное через постоянную теплоемкость и разность температур, равно:

$$Q_v = mc_v(t_2 - t_1),$$

отсюда

$$t_2 = \frac{Q_v}{mc_v} + t_1.$$

Масса газа $m = \frac{p_1 v_1}{RT_1}$, где $R = \frac{\mu R}{\mu}$.

Теплоемкость при постоянном объеме, отнесенная к 1 кг, согласно молекулярно-кинетической теории равна:

$$c_v = \frac{\mu R}{\mu} \frac{\delta_{\text{пост}} + \delta_{\text{вр}}}{2},$$

где $\delta_{\text{пост}} = 3$ и $\delta_{\text{вр}} = 2$ — числа степеней свободы поступательного и вращательного движения молекулы двуокиси углерода (эта молекула линейна).

Подставляя значения Q_v, m, c_v и t_1 в формулу для t_2, получаем:

$$t_2 = \frac{2T_1 Q_v}{p_1 V_1 (\delta_{\text{пост}} + \delta_{\text{вращ}})} + t_1,$$

откуда

$$t_2 = \frac{2 \cdot 293 \cdot 4600 \cdot 10^3}{22{,}0 \cdot 10^5 \cdot 0{,}8\,(3+2)} + 20 = 326\ ^\circ\text{C}.$$

Давление в конечном состоянии

$$p_2 = p_1 \frac{T_2}{T_1} = 2{,}2 \cdot \frac{326 + 273}{20 + 273} = 4{,}51\ \text{МПа}.$$

Согласно первому закону термодинамики

$$Q_v = U_2 - U_1,$$

откуда

$$u_2 = \frac{Q_v}{m} + u_1.$$

Пользуясь табл. 16 приложения, находим при $t_1 = 20\ ^\circ\text{C}$ значение $u_1 = 153{,}3$ кДж/кг и подсчитываем u_2:

$$u_2 = \frac{4600 \cdot 8314 \cdot 293}{44 \cdot 22 \cdot 10^5 \cdot 0{,}8} + 153{,}3 = 298{,}0\ \text{кДж/кг}.$$

По табл. 16 находим температуру t_2, соответствующую внутренней энергии u_2:

$$t_2 = 216\ ^\circ\text{C};\ T_2 = 489\ \text{К}.$$

Подсчитываем конечное давление:

$$p_2 = p_1 \frac{T_2}{T_1} = 2{,}2 \frac{489}{293} = 3{,}67\ \text{МПа}.$$

6.2. В газгольдере объемом 15 м³ находится метан при $p = 0{,}8$ МПа и $t = 10\ ^\circ\text{C}$. Благодаря солнечной радиации температура газа в течение дня повысилась на $\Delta t = 15$ К.

Как возросло давление газа в газгольдере и какое количест теплоты воспринял газ?

Теплоемкость метана считать не зависящей от температур Молекула метана не линейна.

Ответ: $p_2=0{,}8$ МПа; $Q_v=1921{,}7$ кДж.

6.3. В цилиндре карбюраторного двигателя внутреннего сго ния после сжатия горючей смеси давление $p_1=1{,}5$ МПа и темпер тура $t_1=365$ °С. В этот момент смесь поджигается при помо электрической свечи, после чего происходит очень быстрый проце горения, протекающий практически при постоянном объеме.

Определить давление и температуру в конце процесса, услов заменяя процесс горения смеси обратимым изохорным процесс в котором к рабочему телу подводится теплота $q_v=480{,}0$ кДж/

Рабочее тело при этом считать обладающим свойствами в духа, а теплоемкость c_v зависящей от температуры.

Ответ: $p_2=2{,}85$ МПа; $t_2=939$ °С.

6.4. В закрытом сосуде объемом 6 м³ находится сернист ангидрид при давлении $p_1=0{,}2$ МПа и температуре $t_1=37$ °С. нагревается пока давление не становится равным 0,9 МПа.

Определить параметры газа в конце процесса и количест подведенной теплоты.

Использовать табл. 21 приложения.

Ответ: $v_2=0{,}2012$ м³/кг; $t_2=1122$ °С; $Q_v=21{,}6$ МДж.

6.5. Азот в количестве 10 м³ (приведенный к нормальным ус виям) заключили в герметически закрытый сосуд и нагрели температуры $t_1=1450$ °С. Давление p_1 при этом стало равн 3,8 МПа. Затем газ охладили до температуры $t_2=47$ °С.

Каким стало давление после охлаждения и сколько тепла ведено?

Решить задачу, считая теплоемкость не зависящей от темпе туры.

Ответ: $p_2=0{,}706$ МПа; $Q_v=-13$ МДж.

6.6. Решить задачу 6.5 при помощи табл. 14 приложен Сравнить результаты решений этих задач.

Ответ: $p_2=0{,}706$ МПа; $Q_v=-15{,}15$ МДж.

6.7. Для измерения расхода азота в трубопровод диаметр 100 мм поставлен электрический нагреватель мощностью 500 (рис. 6.1). Проходя нагреватель, температура азота повышае на $\Delta t=3$ °С.

Каков расход m, кг/ч, если U-образный манометр, установл ный на трубопроводе, показывает разрежение $h=200$ мм рт. а барометр — давление $B=750$ рт. ст.

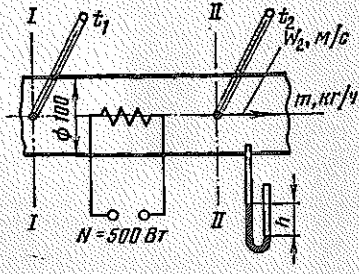


Рис. 6.1. К задаче 6.7.

Какова средняя по сече скорость азота за нагревате если термометр за нагревате показывает $t_2=65$ °С?

Ответ: $m=573$ кг/ч; w $=28$ м/с.

6.8. Воздух в количе 5 м³/мин при $t=20$ °С и $=0{,}1$ МПа поступает в комп сор, где сжимается, затем п гекает по трубкам холодильн охлаждаемым водой.

Определить расход охлаждающей воды, если на выходе из компрессора воздух имеет параметры: $p_1=0{,}8$ МПа и $t_1=180$ °С. Температура воздуха за холодильником $t_2=35$ °С.

Вода нагревается на $\Delta t=18$ °С. Потерями теплоты пренебречь.

Ответ: $m=695$ кг/ч.

6.9. В трубках воздухоподогревателя парогенератора протекает воздух (приведенный к нормальным условиям) в количестве $V_н=11\,000$ м³/ч. Его температура на входе $t_1=45$ °С.

Какова температура t_2 воздуха на выходе из воздухоподогревателя, если топочные газы сообщают воздуху количество теплоты $Q_р=2600$ МДж/ч.

Определить работу расширения воздуха, которую он совершает в течение 1 ч.

Процесс подогрева воздуха считать изобарным, происходящим при $p_{возд}=0{,}1$ МПа. Потерями теплоты в окружающую среду пренебречь.

Ответ: $t_2=225$ °С; $L=735$ МДж/ч.

6.10. Дымовые газы, входящие в воздухоподогреватель парогенератора, имеют объемный состав, %: $CO_2=10{,}8$, $O_2=6{,}6$, $N_2=80{,}7$, $H_2O=1{,}9$. Нагревая воздух, газы охлаждаются от $t_{1г}=350$ °С до $t_{2г}=160$ °С.

Определить температуру нагретого воздуха, если известно, что расход дымовых газов (приведенных к нормальным условиям) $V_н=53\,000$ м³/ч; расход воздуха $m_{возд}=51\,000$ кг/ч; температура воздуха на входе в воздухоподогреватель $t_{1в}=45$ °С.

Воздухоподогреватель теряет в окружающую среду 4% теплоты, отнимаемой у газов. Присосом атмосферного воздуха в газоходе воздухоподогревателя пренебречь.

Решение. Процессы нагревания воздуха и охлаждения газов можно считать изобарными. Поэтому теплоту, отданную газами и воспринятую воздухом, следует полагать равной убыванию (и соответственно приращению) энтальпии:

$$Q_г=H_{1г}-H_{2г};\ Q_в=H_{2в}-H_{1в}.$$

Баланс теплоты при теплообмене:

$$0{,}96Q_г=H_{1г}-H_{2г}=H_{2в}-H_{1в}$$

или, иначе, через удельные энтальпии

$$0{,}96V_н(h'_{1г}-h'_{2г})=m_в(h_{2в}-h_{1в}),$$

где $h'_{1г}$ и $h'_{2г}$ — энтальпии дымовых газов, отнесенные к 1 м³ при нормальных условиях, а $h_{1в}$ и $h_{2в}$ — энтальпии воздуха, отнесенные к 1 кг. Так как энтальпия каждой составляющей смеси газов $h'_{rj}=\rho_{нj}h_{rj}$, то по принципу аддитивности энтальпий

$$h'_г=\sum_{1}^{n} r_j\rho_{нj}h_{rj},\ \text{кДж/м}^3,$$

где r_j — заданные объемные доли отдельных компонентов.

Пользуясь табл. 14—16 и 18 приложения, составляем расчетную таблицу для подсчета энтальпий газов.

150614
ФБ ТашГТУ

Величина	Компоненты смеси			
	CO_2	O_2	N_2	H_2O
r_j	0,108	0,066	0,807	0,019
$\rho_{нj}$, кг/м³	1,977	1,429	1,257	0,804
$t_{1г}$, °С	350			
$h_{1гj}$, кДж/кг	531,2	582,7	651,6	1178,7
$(r_j\rho_{нj}h_{гj})_1$, кДж/м³	113,42	54,96	660,98	18,01
$h'_{1г}=\sum_1^n (r_j\rho_{нj}h_{гj})_1$, кДж/м³	847,4			
$t_{2г}$, °С	160			
$h_{2гj}$, кДж/кг	335,4	396,4	449,9	804,1
$(r_j\rho_нh_{гj})_2$, кДж/м³	71,61	37,39	456,38	12,28
$h'_{г2}=\sum_1^n (r_j\rho_{нj}h_{гj})_2$, кДж/м³	577,7			

Из уравнения баланса теплоты по табл. 13 приложения находим энтальпию воздуха:

$h_{1в}=318{,}4$ кДж/кг (при температуре $t_{1в}=45$ °С);

$$h_{2в}=\frac{0{,}96V_в\,(h'_{1г}-h'_{2г})+m_вh_{1в}}{m_в}=$$

$$=\frac{0{,}96\cdot 53\,000\,(847{,}4-577{,}7)+51\,000\cdot 318{,}4}{51\,000}=587{,}5 \text{ кДж/кг}.$$

По значению $h_{2в}$ в табл. 13 приложения, интерполируя, находим $t_2=309$ °С.

6.11. Средний состав дымовых газов, омывающих поверхности нагрева котельного агрегата, задан объемными долями:

$$r_{CO_2}=0{,}11;\ r_{O_2}=0{,}07;\ r_{N_2}=0{,}82.$$

Определить, сколько теплоты отдает каждый килограмм газов при протекании в газоходе, если на входе в него они имеют температуру $t_1=1100$ °С, а на выходе $t_2=180$ °С. Считать, что абсолютное давление газов в процессе теплообмена не меняется и что потери теплоты в окружающую среду отсутствуют.

Ответ: $q_p=-1054$ кДж/кг.

6.12. В цилиндре, площадь поперечного сечения которого равна 1 дм², под поршнем находится 1/2 кмоля азота при $t_1=63$ °С. Поршень находится под постоянной внешней нагрузкой $F=2$ кН. Газу извне сообщается теплота $Q=6300$ кДж, вследствие чего он расширяется, отодвигая поршень.

Определить параметры p, v, t в конце процесса, изменение внутренней энергии ΔU, изменение энтальпии ΔH и работу расширения L, совершенную газом.

Ответ: $p_2=p_1=0{,}2$ МПа; $v_2=1{,}123$ м³/кг; $t_2=484$ °С; $\Delta U=4549$ кДж; $\Delta H=6300$ кДж; $L=1751$ кДж.

6.13. В среде при атмосферном давлении $B=0{,}1$ МПа находится цилиндр с подвижным поршнем диаметром $d=20$ см. Под поршнем заключено 2 кг сероводорода при $t_1=60$ °С. На поршень положен груз массой $m_{гр}=300$ кг. Газ нагревается и получает 460 кДж теплоты.

Определить параметры газа в конце равновесного процесса, изменение энтальпии, внутренней энергии и работу расширения.

Воспользоваться табл. 20 приложения.

Ответ: $p=0{,}1936$ МПа; $v_2=0{,}694$ м³/кг; $t_2=278$ °С; $\Delta U=354$ кДж; $\Delta H=460$ кДж; $L=106$ кДж.

6.14. Воздух в количестве 0,1 м³/с при $t=30$°С и $p=0{,}1$ МПа поступает в компрессор, где сжимается, а затем протекает между трубами холодильника, в которых движется охлаждающая вода.

Определить расход воды, если на выходе из компрессора воздух имеет параметры: $t_1=200$ °С и $p_1=0{,}8$ МПа. Температура воздуха за холодильником $t_2=40$ °С. Вода нагревается на $\Delta t=20$ °С.

Потерями теплоты и сопротивлением трения пренебречь.

Ответ: $m=791$ кг/ч.

6.15. 2,5 кг сероуглерода при $t_1=640$ °С и $p=1{,}2$ МПа охлаждаются изобарно до тех пор, пока его объем не становится равным 90 дм³.

Найти начальный объем, конечную температуру, изменение энтальпии и внутренней энергии, а также работу, затраченную на сжатие.

Расчет выполнить при помощи табл. 22 приложения.

Указание. Рассчитать v_1 и T_2 непосредственно по таблицам, не пользуясь значением молекулярной массы для подсчета газовой постоянной R. Для этого следует использовать справедливое для газа в идеальном состоянии соотношение

$$h=u+RT,$$

откуда следует, что

$$R=\frac{h-u}{T},\ \text{кДж/(кг·К)},\ \text{и}\ v=\frac{h-u}{p},\ \text{м³/кг}.$$

В таблицах с правильно выбранными точками начала отсчета энтальпии и внутренней энергии (согласно первому из написанных выражений) для подсчета R можно брать значения h и u, соответствующие любой температуре, т. е. данные любой из горизонтальных строк. Наиболее рационально выбрать температуру $t=0$ °С, при которой h можно принять с небольшой погрешностью равной нулю. Тогда для сероуглерода (табл. 22 приложения)

$$R=\left[\frac{h-u}{T}\right]=\frac{29{,}83\cdot 10^3}{273{,}16}=109{,}2\ \text{кДж/(кг·К)}.$$

Легко определяется и удельный объем газа. Так, для начального состояния сероуглерода (при $t_1=640$ °С)

$$v_1=\frac{h_1-u_1}{p_1}=\frac{(448{,}3-348{,}5)\cdot 10^3}{12\cdot 10^5}=0{,}0831\ \text{м³/кг}.$$

Эти расчеты проводятся более просто, чем с помощью уравне ния Клапейрона, и не требуют знаний молекулярной массы газа так как переход от мольных величин к удельным уже выполнен в таблицах. Не следует, однако, забывать, что все сказанное спра ведливо только для газов, подчиняющихся уравнению $pv=RT$.

Последующие расчеты следует делать обычным способом.

Ответ: $V_1=0{,}208$ м³; $t_2=122$ °С; $L=-141{,}6$ кДж.

6.16. Окись углерода с приведенным к нормальным условиям объемом $V_н=0{,}5$ м³ имеет параметры $p_1=2{,}5$ МПа и $t_1=350$ °С. В изотермическом процессе к газу подводится теплота $Q=85$ кДж. Найти параметры начального и конечного состояний, работу расширения, изменение внутренней энергии и энтальпии.

Ответ: $v_1=0{,}0740$ м³/кг; $v_2=0{,}1543$ м³/кг; $p_2=1{,}199$ МПа; $L=85$ кДж; $\Delta U=0$; $\Delta H=0$.

6.17. Во сколько раз изменится абсолютное значение работы изотермического сжатия 1 кг идеального газа, имеющего температуру T, К, и давление $p_1=0{,}1$ МПа, если конечное давление в первом процессе равно 1 МПа, а в других увеличивается в 10, 100 и 1000 раз?

Как изменится значение работы, если абсолютная температура газа увеличится в 10 раз?

Ответ: 1) абсолютное значение работы вырастет соответственно в 2, 3 и 4 раза;

2) при увеличении T в 10 раз во столько же раз увеличится значение работы.

6.18. Азот с приведенным к нормальным условиям объемом $V_н=3{,}5$ м³ находится в первоначальном состоянии при $p_1=0{,}11$ МПа и $t_1=25$ °С. Его подвергают изотермическому сжатию до давления $p_2=2{,}4$ МПа.

Найти удельные объемы в начальном и конечном состояниях, работу, затраченную на сжатие, и теплоту, отведенную от газа.

Ответ: $v_1=0{,}804$ м³/кг; $v_2=0{,}0365$ м³/кг; $L=Q=-1198$ кДж.

6.19. 25 кг воздуха при $t=27$ °С изотермически сжимаются до тех пор, пока давление не становится равным 4,15 МПа. На сжатие затрачивается работа $L=-8{,}0$ МДж.

Найти начальные давления и объем, конечный объем и теплоту, отведенную от воздуха.

Ответ: $p_1=0{,}1013$ МПа; $V_1=21{,}27$ м³; $V_2=0{,}519$ м³; $Q=-8{,}0$ МДж.

6.20. В идеально охлаждаемом компрессоре происходит изотермическое сжатие двуокиси углерода.

В компрессор поступает 1000 м³/ч газа (приведенного к нормальным условиям) при $p_1=0{,}095$ МПа и $t_1=47{,}0$ °С. Давление за компрессором $p_2=0{,}8$ МПа.

Найти теоретическую мощность приводного двигателя N_0 и теоретическое количество m охлаждающей компрессор воды, если она нагревается на $\Delta t=15$ К.

Ответ: $N_0=70{,}3$ кВт; $m=4030$ кг/ч.

6.21. Применяя первый закон термодинамики, показать, что кривая, изображающая адиабату идеального газа в p, v-координатах проходит всегда круче, чем кривая изотермического процесса.

Решение. Для адиабатного процесса $dl=-du$, поэтому при расширении идеального газа температура последнего всегда падает, а при сжатии растет, так как $u=f(t)$.

Рассматривая два процесса — адиабатный и изотермический, в которых расширение происходит до одного и того же объема

(рис. 6.2), можно заключить, что адиабатный процесс не может заканчиваться точкой $2''$, лежащей выше точки 2 на изотерме, потому что $t''_2 > t_2$. Равным образом точки конца адиабатного и изотермического расширений не могут совпадать.

Следовательно, конечная точка адиабаты $2'$ должна лежать ниже конечной точки изотермы.

Аналогичное доказательство можно провести, используя любое изохорное сечение применительно не только к процессам расширения, но и к процессам сжатия.

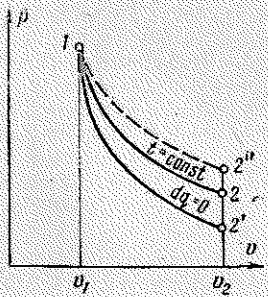


Рис. 6.2. К задаче 6.21.

6.22. Во сколько раз изменится абсолютное значение работы адиабатного сжатия 1 кг идеального газа, для которого $k=1{,}4$, начальная температура T_1 и давление $p_1=0{,}1$ МПа, если конечное давление p_2 в первом процессе равно 1 МПа, а в других увеличивается в 10, 100 и 1000 раз?

Как изменится значение работы, если начальная абсолютная температура газа увеличится в 10 раз?

Ответ: 1) соответственно в 2,93; 6,67 и 13,87 раза; 2) при увеличении T_1 в 10 раз во столько же раз возрастает значение работы.

6.23. При адиабатном расширении 1 кг воздуха ($k=1{,}40=$ $=\text{const}$) температура его падает на 120 К.

Какова полученная в процессе расширения работа и сколько теплоты следовало бы подвести к воздуху, чтобы ту же работу получить в изотермическом процессе?

Ответ: $l_{ад}=q_{изот}=86{,}1$ кДж/кг.

6.24. Какова начальная температура t_1 азота, если его конечная температура после совершения процесса адиабатного сжатия $t_2=$ $=750$ °С. Известна степень сжатия $\varepsilon=v_1/v_2=10$.

Теплоемкости c_p и c_v считать постоянными.

Ответ: $t_1=135$ °С.

6.25. Азот из баллона емкостью 0,05 м³ выпускается в атмосферу настолько быстро, что теплообмен между ней и азотом в баллоне не успевает совершиться. До выпуска давление в баллоне было $p_1=1{,}2$ МПа и температура $t_1=27{,}0$ °С. После закрытия вентиля температура в баллоне стала $t_2=0{,}0$ °С.

Какова масса выпущенного азота и каким стало давление в баллоне после выпуска?

Ответ: $\Delta m=1{,}413$ кг; $p_2=8{,}63$ МПа.

6.26. В баллоне объемом 40 л находится сжатый кислород при $p_1=14{,}0$ МПа и при температуре среды. После быстрого открытия выпускного вентиля кислород вытекает в атмосферу; затем вентиль снова закрывается. Теплообмен между содержимым баллона и средой за время выпуска практически не успевает совершиться. Давление в баллоне p_2 после выпуска оказывается 7,0 МПа. Через некоторое время температура кислорода снова становится равной температуре среды $t_1=20$ °С.

Какой стала температура кислорода в баллоне сразу после выпуска? Какое количество кислорода вытекло из баллона? Чему стало равным давление после восстановления первоначальной температуры? Какое количество кислорода может вытечь, если выпуск

производить очень медленно при постоянной температуре газа и конечном давлении $p_2=7{,}0$ МПа?

Ответ: после выпуска $t_2=-33$ °С; выпущено $\Delta m_{ад}=2{,}86$ кг кислорода; $p_2=8{,}55$ МПа; при изотермическом выпуске $\Delta m_{изот}=3{,}68$ кг.

6.27. В двигателе Дизеля топливо, впрыскиваемое в цилиндр, самовоспламеняется при соприкосновении со сжатым воздухом, имеющим температуру большую, чем температура воспламенения топлива.

Определить минимальную необходимую степень сжатия $\varepsilon=v_1/v_2$ и давление в конце сжатия p_2, если температура воспламенения топлива равна 630 °С. Перед началом сжатия воздух в цилиндре имеет параметры $p_1=0{,}097$ МПа, $t_1=60$ °С. Сжатие считать обратимым адиабатным. Задачу решать, не учитывая зависимости теплоемкости от температуры и принимая $k=1{,}40$.

Ответ: $\varepsilon=12{,}1$; $p_2=3{,}19$ МПа.

6.28. Решить задачу 6.27, учитывая зависимость показателя адиабаты от температуры и применяя табл. 13 приложения.

Решение. По температурам $t_1=60$ °С и $t_2=630$ °С в таблицах находим $\Theta_{01}=4873$; $\Theta_{02}=346{,}4$; $\pi_{01}=2{,}0011$; $\pi_{02}=76{,}323$.

Так как

$$\varepsilon=\frac{v_1}{v_2}=\frac{\Theta_{01}}{\Theta_{02}} \text{ и } \frac{p_1}{p_2}=\frac{\pi_{01}}{\pi_{02}},$$

то

$$\varepsilon=\frac{4873}{346{,}4}=14{,}07;\quad p_2=0{,}97\cdot 10^5\frac{76{,}323}{2{,}0011}=3{,}7 \text{ МПа}.$$

Сравнивая эти результаты с ответом задачи 6.27, заключаем, что пренебрежение зависимостью $k=f(t)$ может приводить к значительным ошибкам.

6.29. В соплах и на лопатках газовой турбины адиабатно расширяется двуокись углерода в количестве $m=1500$ кг/ч. Параметры газа на входе в турбину: $p_1=0{,}7$ МПа, $t_1=700$ °С, на выходе $p_2=0{,}098$ МПа.

Определить параметры двуокиси углерода на выходе, часовую полезную внешнюю работу газа $L'=-m\int_{p_1}^{p_2} vdp$ (рис. 6.3) и теоретическую (т. е. без учета потерь) мощность турбины N_0. Расчет сделать с учетом зависимости теплоемкостей от температуры. Задачу решить с помощью табл. 16 приложения.

Ответ: $v_2=1{,}370$ м³/кг; $t_2=437$ °С; $L'=466{,}35$ МДж/ч; $N_0=130$ кВт.

6.30. В компрессор газотурбинной установки входит воздух при $p_1=0{,}1$ МПа и $t_1=20$ °С. Воздух сжимается адиабатно до $p_2=3{,}0$ МПа.

Определить температуру в конце адиабатного сжатия.

Задачу решить с помощью табл. 13 приложения.

Ответ: $t_2=482$ °С.

6.31. Воздух в количестве 1 кг последовательно меняет свое состояние следующим образом (рис. 6.4): сначала, имея параметры

$p_1 = 0{,}2$ МПа и $t_1 = 37$ °С, изобарно расширяется до объема $v_2 = 2{,}85\ v_1$, затем адиабатно сжимается до состояния при $p_2 = 2{,}8$ МПа и, наконец, изотермически расширяется до $v_4 = v_2$.

Определить недостающие параметры во всех характерных точках процессов, подведенную или отведенную теплоту, изменение внутренней энергии и энтальпии, а также работу расширения (сжатия) в каждом процессе. Проверить уравнение первого закона термодинамики для совокупности процессов.

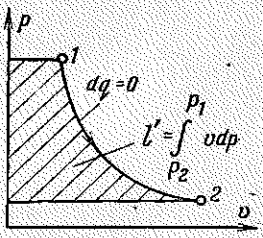


Рис. 6.3. К задаче 6.29.

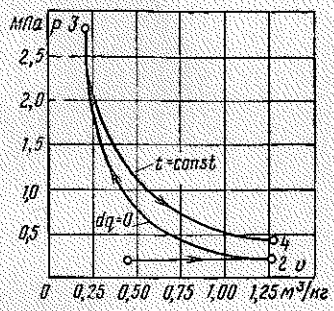


Рис. 6.4. К задаче 6.31.

Теплоемкости c_p и c_v считать не зависящими от температуры и для их расчета применить молекулярно-кинетическую теорию.

Ответ:

Точки (рис. 6.4)	p, МПа	v, м³/кг	t, °С	T, К
1	0,2	0,445	37	310
2	0,2	1,268	610	883
3	2,8	0,1924	1603	1876
4	0,425	1,268	1603	1876

Процесс (рис. 6.4)	q, кДж/кг	Δu, кДж/кг	Δh, кДж/кг	l, кДж/кг
1-2	576	411	576	165
2-3	0	713	998	—713
3-4	1016	0	0	1016
	1592	1124	1574	468

6.32. Метан объемом 3,5 м³ в нормальных условиях при $p_1 = 4{,}0$ МПа и $t_1 = 620$ °С адиабатно расширяется до давления $p_2 = 0{,}5$ МПа.

Определить параметры p, v, t в начале и в конце процесса, работу расширения, изменение внутренней энергии и энтальпии газа.

Зависимостью теплоемкости от температуры не пренебрегать; при решении задачи использовать табл. 23 приложения.

Решение[1]. Показатель адиабаты k, как известно, является функцией температуры и в процессе адиабатного расширения монотонно возрастает. Будем считать, что процесс подчиняется уравнению

$$pv^{k_{ср}} = \text{const},$$

где $k_{ср}$ — средний на протяжении процесса показатель, численно равный частному от деления энтальпии газа на величину изменения внутренней энергии:

$$k_{ср} = \Delta h/\Delta u.$$

Задача нахождения конечной температуры t_2 процесса решается методом последовательных приближений. Для того чтобы по возможности избежать табличных интерполяций, можно найти t_2 другим путем — графо-аналитическим: сразу задаются несколькими круглыми вариантными значениями (самое меньшее — тремя) температур $t_2^{зад}$, для них подсчитываются значения $k_{ср} = \Delta h/\Delta u$, по которым находятся конечные температуры при помощи формулы адиабатного процесса. Единственная же (искомая) конечная температура находится графическим способом. Этот расчет рекомендуется делать в табличной форме:

Величина	$t_2^{зад}$, °С			Примечание
	300	400	500	
h_2, кДж/кг	790,6	1126,6	1495,4	$t_1 = 620$°С, $T_2 = 893$ К
u_2, кДж/кг	493,6	777,6	1094,6	$h_1 = 1981{,}5$ кДж/кг
$\Delta h = h_2 - h_1$, кДж/кг	—1190,9	—854,9	—486,1	$u_1 = 1518{,}5$ кДж/кг
$\Delta u = u_2 - u_1$, кДж/кг	—1024,9	—740,9	—423,9	$p_2 = 0{,}5$ МПа
$k_{ср} = \Delta h/\Delta u$	1,1620	1,1539	1,1467	$p_1 = 4{,}0$ МПа
$(k_{ср}-1)/k_{ср} = a$	0,1394	0,1334	0,1279	$p_2/p_1 = 0{,}125$
$a \lg (p_2/p_1)$	—0,1259	—0,1205	—0,1155	$\lg (p_2/p_1) = -0{,}9031$
$a \lg (p_2/p_1)$	1,8741	1,8795	1,8845	$T_2^{иск} = T_1 (p_2/p_1)^{\frac{k_{ср}-1}{k_{ср}}} = bT$, К
$b = (p_2/p_1)^{\frac{k_{ср}-1}{k_{ср}}}$	0,748	0,758	0,766	Результат:
$T_2^{иск} = bT_1$, К	668	677	684	$t_2 = 404$°С
$t_2^{иск}$, °С	395	404	411	$k_{ср} = 1{,}154$

[1] Предполагается, что учащийся еще незнаком со вторым законом термодинамики и с методами вычисления энтропии. В противном случае эту задачу следует решать способом, приведенным в задаче 7.47.

В графах таблицы, соответствующих трем выбранным вариантам, записываются все подлежащие расчету переменные величины, а в графе «Примечания» — все заданные и постоянные, а также расчетная формула для температуры и конечный результат.

После того как рассчитаны вариантные значения искомой температуры $t_2^{\text{иск}}$, строится график (рис. 6.5), по оси абсцисс которого откладываются значения $t_2^{\text{зад}}$, а по оси ординат — в том же масштабе значения $t_2^{\text{иск}}$. На эту же диаграмму наносится в произвольном масштабе график $k_{\text{ср}} = f_2(t_2^{\text{зад}})$. Искомое значение $t_2^{\text{иск}}$ находится в точке пересечения кривой $t_2^{\text{иск}} = f_1(t_2^{\text{зад}})$ и прямой, проведенной из начала координат под углом 45°. По найденному значению t_2 на графике находится и $k_{\text{ср}}$.

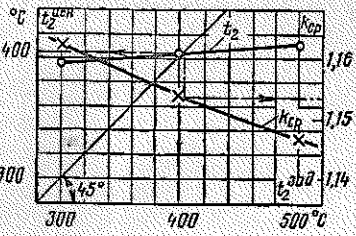


Рис. 6.5. К задаче 6.32.

Расчет остальных величин производится обычным порядком.

Удельный объем в начале процесса

$$v_1 = \frac{8314 \cdot 893}{16{,}04 \cdot 40 \cdot 10^5} = 0{,}1157 \text{ м}^3/\text{кг};$$

в конце процесса

$$v_2 = v_1 (p_1/p_2)^{\frac{1}{k_{\text{ср}}}} = 0{,}1157 \cdot 8^{\frac{1}{1{,}154}} = 0{,}701 \text{ м}^3/\text{кг}.$$

Для проверки подсчитываем v_2 по уравнению Клапейрона:

$$v_2 = \frac{RT_2}{p_2} = \frac{8314 \cdot 677}{16{,}04 \cdot 5 \cdot 10^5} = 0{,}702 \text{ м}^3/\text{кг}.$$

По температуре t_2 в табл. 23 приложения находим $h_2 = 1141{,}3$ кДж/кг и $u_2 = 790{,}3$ кДж/кг и подсчитываем разности: $h_2 - h_1 = -840{,}2$ кДж/кг; $u_2 - u_1 = -728{,}2$ кДж/кг.

Проверяем значение показателя адиабаты:

$$k = \frac{\Delta h}{\Delta u} = \frac{840{,}2}{728{,}2} = 1{,}154$$

Удельная работа расширения

$$l = \frac{R}{k_{\text{ср}} - 1}(t_1 - t_2) = \frac{8{,}314}{16{,}04 \cdot 0{,}154}(620 - 404) = 728 \text{ кДж/кг}.$$

В результате расчета получилось равенство абсолютных значений Δu и l, что подтверждает правильность расчета.

Определяем массу газа:

$$m = \frac{V_н \mu}{V_{\mu}} = \frac{3{,}5 \cdot 16{,}04}{22{,}4} = 2{,}51 \text{ кг}.$$

Наконец, подсчитываем полные искомые величины:

$$L = ml = 2{,}51 \cdot 728 = 1827 \text{ кДж}; \quad \Delta H = m\Delta h = -2108 \text{ кДж};$$
$$\Delta U = m\Delta u = -1827 \text{ кДж}.$$

6.33. Этан в количестве 1 кг, находящийся при $p_1 = 0{,}1$ МПа и $t_1 = 40$ °С, подвергается адиабатному сжатию. Степень сжатия $\varepsilon = v_1/v_2 = 20$.

Определить конечное состояние газа, пользуясь табл. 24 приложения.

Ответ: $p_2 = 3{,}12$ МПа; $v_2 = 0{,}0433$ м³/кг; $t_2 = 214$ °С.

6.34. Рассчитать цикл, совершаемый 1 кг двуокиси углерода и состоящий из процессов адиабатного расширения, изотермического сжатия и изобарного расширения. Параметры в точке 1: $p_1 = 4{,}4$ МПа и $t_1 = 600$ °С. Давление в точке 2: $p_2 = 0{,}2$ МПа.

Рассчитать цикл — значит найти недостающие параметры для всех характерных точек и свести основанный на первом законе термодинамики баланс по теплоте, изменению внутренней энергии и энтальпии.

Использовать табл. 16 приложения.

Ответ:

Точки (рис. 6.5)	p, Па	v, м³/кг	t, °С	T, К
1	44,0	0,0375	600	873
2	2,0	0,489	243	516
3	44,0	0,0222	243	516

Процесс	q	u	Δh	$l = \int_{v_1}^{v_2} p dv$	$l' = \int_{p_1}^{p_2} v dp$
	кДж/кг				
1-2	0	—332,4	—399,7	332,4	399,7
2-3	—301,4	0	0	—301,4	—301,4
3-1	399,7	332,4	399,7	67,3	0
За цикл	98,3	0	0	98,3	98,3

6.35. В поршневом компрессоре сжимается воздух, имеющий давление $p_1 = 0{,}1$ МПа и температуру $t_1 = 20$ °С. Процесс сжатия — политропный, с показателем политропы $n = 1{,}30$. Давление в конце сжатия $p_2 = 0{,}7$ МПа.

Определить работу сжатия для 1 кг воздуха и количество отнятой теплоты.

Ответ: $l = -159$ кДж/кг; $q = 40$ кДж/кг.

6.36. Поршневой компрессор (в условиях, приведенных к нормальным условиям) производительностью $V_н = 2100$ м³/ч засасывает воздух, параметры которого $p_1 = 0{,}1$ МПа, $t_1 = 25$ °С, и сжимает его до $p_2 = 0{,}9$ МПа. Процесс сжатия политропный, с показателем политропы $n = 1{,}20$.

Определить, какое количество воды в час нужно пропустить через охлаждающую рубашку цилиндра, если вода нагревается на $\Delta t = 15$ °С.

Ответ: $m = 4320$ кг/ч.

6.37. Азот массой 1 кг в начальном состоянии имеет параметры $p_1 = 2{,}5$ МПа и $t_1 = 700$ °С. После политропного расширения (показатель политропы $n = 1{,}180$) его давление $p_2 = 0{,}1$ МПа.

Определить изменение внутренней энергии Δu, количество теплоты q_{1-2}, сообщенное азоту в процессе 1-2, и работу расширения l_{1-2}.

Постоянные теплоемкости рассчитать по формулам $c_p = \Delta h/\Delta t$ и $c_v = \Delta u/\Delta t$, определив Δh и Δu при помощи таблиц[1].

Каким получилось бы значение q_{1-2}, если c_p и c_v считать по молекулярно-кинетической теории, пренебрегая тем, что процесс протекает при высоких температурах?

Решение. Как известно, политропный процесс характеризуется постоянством показателя политропы n и теплоемкости c_n процесса.

Из этого следует, что постоянными в процессе должны быть и теплоемкости c_p и c_v, так как $c_n = c_v \dfrac{n-k}{n-1}$. Выбирать постоянные c_p и c_v следует так, чтобы они отвечали реальным условиям протекания процесса, т. е. были бы близки к средним теплоемкостям в интервале t_1—t_2. Именно поэтому в условиях задачи и рекомендуется способ определения c_p и c_v при помощи таблиц.

Прежде всего находим конечную температуру:

$$T_2 = T_1 \left(\frac{p_2}{p_1}\right)^{\frac{n-1}{n}},$$

отсюда $t_2 = 322$ °С.

Подсчитываем работу процесса:

$$l_{1-2} = \frac{R}{n-1}(T_1 - T_2) = \frac{8{,}314}{28{,}02 \cdot 0{,}180}(973 - 595) = 623 \text{ кДж/кг}.$$

Находим изменение внутренней энергии и энтальпии: $\Delta u_{1-2} = c_v(T_2 - T_1) = u_2 - u_1 = 448{,}8 - 755{,}2 = -310{,}4$ кДж/кг; $\Delta h_{1-2} = c_p(T_2 - T_1) = h_2 - h_1 = 621{,}4 - 1044{,}0 = -422{,}6$ кДж/кг.

Значения внутренних энергий и энтальпий взяты из табл. 14 приложения по температурам t_1 и t_2:

$$q_{1-2} = c_v \frac{n-k}{n-1}(T_2 - T_1).$$

Так как по условию

$$c_v = \frac{u_2 - u_1}{T_2 - T_1} \text{ и } c_p = \frac{h_2 - h_1}{T_2 - T_1},$$

---

[1] Можно пользоваться и другими способами задания постоянных c_p и c_v. Например, можно брать значения этих величин по среднеарифметическим температурам процесса. Результат будет получен с достаточно высокой точностью.

то

$$q_{1-2}=u_2-u_1\frac{n-k}{n-1}=u_2-u_1\frac{n-\dfrac{h_2-h_1}{u_2-u_1}}{n-1}=$$

$$=\frac{n(u_2-u_1)-(h_2-h_1)}{n-1}=$$

$$=\frac{1{,}180(-310{,}4)-(-422{,}6)}{1{,}180-1{,}000}=312\ \text{кДж/кг}.$$

Проверка уравнения первого закона термодинамики показывает, что оно точно удовлетворяется. Если бы мы вели расчет при помощи теплоемкостей, рассчитанных по молекулярно-кинетической

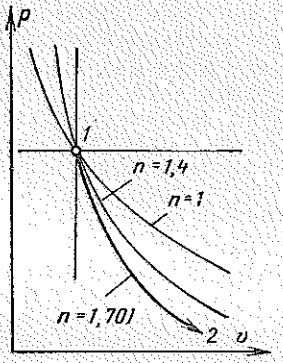


Рис. 6.6. К задаче 6.39.

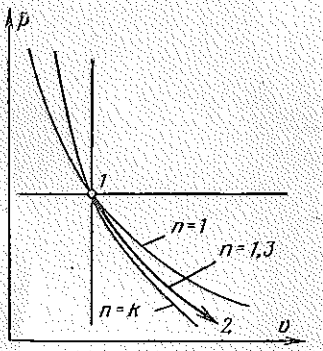


Рис. 6.7. К задаче 6.40.

теории, то получили бы иные результаты. Действительно, в этом случае

$$k=1{,}400;\ c_v=\frac{R_\mu(3+\delta_{вр})}{\mu\cdot 2}=\frac{8{,}314\cdot 5}{28{,}02\cdot 2}\ \text{кДж/(кг·К)};$$

$$q'_{1-2}=c_v\frac{n-k}{n-1}(T_2-T_1)=$$

$$=\frac{8{,}314\cdot 5(1{,}180-1{,}400)}{28{,}02\cdot 2(1{,}180-1{,}00)}595-973=343\ \text{кДж/кг}.$$

Расхождение $q'_{1-2}-q_{1-2}=343-313=30$ кДж/кг, равное примерно 10%, слишком значительно. Следовательно, если температуры политропного процесса достаточно велики, следует так выбирать постоянные теплоемкости c_p и c_v, нужные для расчета q, Δu и Δh, чтобы они соответствовали этим температурам. Один из способов задания и предложен в только что решенной задаче.

6.38. В политропном процессе изменения состояния, который начинается при параметрах $p_1=0{,}4$ МПа и $t_1=127$ °С, 1 кг воздуха проходит через промежуточное состояние $p_0=0{,}8$ МПа и $t_0=187$ °С.

Конечное состояние достигается после совершения над воздухом работы $l = -550$ кДж/кг.

Найти конечные параметры.

Ответ: $p_2 = 20{,}42$ МПа; $v_2 = 0{,}01241$ м³/кг; $t_2 = 610$ °С.

6.39. При политропном расширении газа его объем увеличивается на 20%, а абсолютная температура уменьшается на 12%.

Показать примерный ход процесса в p, v-координатах для двухатомного газа, определить показатель политропы, подсчитать значение работы μl, если $t_2 = 227$ °С.

Ответ: $n = 1{,}701$; $\mu l = 712$ кДж/кмоль (рис. 6.6).

6.40. В политропном процессе расширения окиси углерода энергия, выделяемая газом в форме работы, составляется за счет подводимой теплоты (25%) и за счет уменьшения внутренней энергии газа (75%).

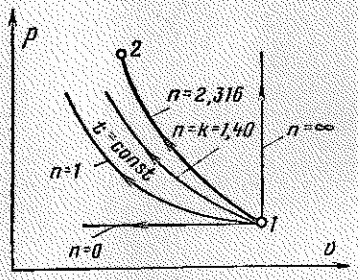


Рис. 6.8. К задаче 6.41.

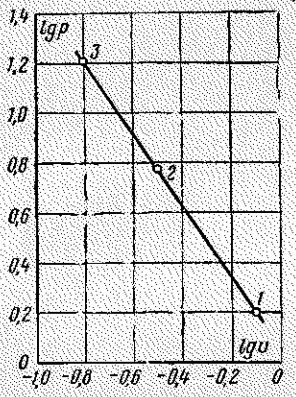


Рис. 6.9. К задаче 6.43.

Определить показатель политропы и теплоемкость процесса. Представить ход процесса в p, v-диаграмме.

Ответ: $n = 1{,}30$; $c_n = -0{,}247$ кДж/(кг·К) (рис. 6.7).

6.41. При сжатии воздуха подведено 50 кДж/кг теплоты. В конце политропного процесса температура воздуха увеличилась на 100 °С.

Определить показатель политропы сжатия. Подсчитать процентное соотношение между работой, теплотой и изменением внутренней энергии. Изобразить в p, v-диаграмме примерный ход процесса.

Ответ: $n = 2{,}316$; $q = 69{,}6\%$ Δu; $l = 30{,}4\%$ Δu (рис. 6.8).

6.42. Некоторый процесс расширения кислорода характеризуется тремя равновесными состояниями, для которых параметры имеют следующие значения:

1) $p_1 = 2$ МПа, $t_1 = 487$ °С;
2) $p_2 = 1$ МПа, $v_2 = 0{,}213$ м³/кг;
3) $v_3 = 0{,}300$ м³/кг, $t_3 = 576$ °С.

Определить, является ли этот процесс политропным? Если да, то чему равен показатель политропы?

Ответ: Процесс политропный, $n = 0{,}900$.

6.43. На рис. 6.9 показан некоторый политропный процесс *1-2* в координатах $\lg p$—$\lg v$.

Определить показатель политропы этого процесса.

Ответ: $n=1{,}48$.

Глава седьмая

ВТОРОЙ ЗАКОН ТЕРМОДИНАМИКИ

7.1. Определить изменение энтропии 3 кг азота в политропном процессе при изменении температуры от $t_1=100\,^\circ\text{C}$ до $t_2=300\,^\circ\text{C}$. Показатель политропы $n=1{,}2$. Теплоемкости принять по молекулярно-кинетической теории. Изобразить процесс в p, v- и T, s-диаграммах.

Ответ: $\Delta S=-0{,}956$ кДж/К.

7.2. Определить изменение энтропии 1 кг двуокиси углерода в процессе сжатия. Начальные параметры углекислоты: $t_1=40\,^\circ\text{C}$, $p_1=0{,}2$ МПа, конечные: $t_2=253\,^\circ\text{C}$, $p_2=4{,}5$ МПа. Расчет сделать в двух вариантах: 1) при расчете теплоемкости углекислого газа использовать молекулярно-кинетическую теорию; 2) применить при расчете табл. 16 приложения с учетом зависимости теплоемкости от температуры.

Решение. 1) Принимая теплоемкость двуокиси углерода по молекулярно-кинетической теории и учитывая, что молекула CO_2 имеет линейную структуру, имеем:

$$s_2-s_1=c_p\ln\frac{T_2}{T_1}-R\ln\frac{p_2}{p_1}=\frac{8{,}314\cdot 7}{2\cdot 44{,}01}\cdot 2{,}303\lg\frac{526}{313}-$$

$$-\frac{8{,}314}{44{,}01}\cdot 2{,}303\lg\frac{4{,}5}{0{,}2}=0{,}3435-0{,}5883=-0{,}2448\ \text{кДж/(кг·К)}.$$

2) С применением таблиц изменение энтропии рассчитывается следующим образом:

$$s_2-s_1=s^0_2-s^0_1-R\ln\frac{p_2}{p_1}=5{,}3862-4{,}8963-\frac{8{,}314}{44{,}01}\times$$

$$\times 2{,}303\lg\frac{4{,}5}{0{,}2}=0{,}4899-0{,}5883=-0{,}0984\ \text{кДж (кг·К)}.$$

В этой формуле s^0_1 и s^0_2 — табличные значения температурной функции энтропии для углекислого газа.

Результаты расчетов по этим двум вариантам сильно отличаются друг от друга, потому что результат вычисления теплоемкости при помощи молекулярно-кинетической теории для углекислого газа оказывается очень неточным.

7.3. 1 кг азота и 1 кг водорода сжимаются изотермически при $t=15\,^\circ\text{C}$ от 0,1 до 1 МПа

Для какого газа изменение энтропии будет больше и во сколько раз (по отношению к изменению энтропии другого газа)?

Ответ: $\Delta s_{H_2}/\Delta s_{N_2}=13{,}9$.

7.4. Построить в T, s-координатах изобары воздуха в пределах от 0 до 1500 °С, соответствующие 0,01; 0,1 и 1 МПа, приняв значение энтропии воздуха равным нулю при $t=0\,^\circ\text{C}$ и $p=0{,}1$ МПа.

Построение произвести по точкам, отстоящим на 300 °С друг от друга.

7.5. Определить изменение энтропии в процессе испарения 1 кг воды при температуре, равной 100 °С, если известно, что теплота парообразования $r=2257$ кДж/кг.

Ответ: $\Delta s=6{,}05$ кДж/(кг·К).

7.6. 50 кг льда с начальной температурой —5 °С помещены в воздух с температурой +15 °С. Считая, что образующаяся при таянии вода нагреется до температуры воздуха, определить увеличение энтропии, происходящее в результате этого процесса. Теплота таяния льда $\lambda=333$ кДж/кг, теплоемкость льда $c_p=2{,}03$ кДж/(кг·К). Теплоемкость воды принять равной 4,187 кДж/(кг·К).

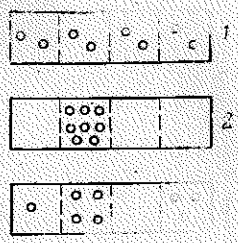


Рис. 7.1. К задаче 7.8.

Ответ: $\Delta S=74{,}0$ кДж/К.

7.7. Средняя теплоемкость алюминия c_p в интервале температур от 0 до 300 °С равна 0,955 кДж/(кг·К).

Определить энтропию 100 кг алюминия при 300 °С, считая, что его энтропия при 0 °С равна нулю.

Ответ: S=70,9 кДж/К.

7.8. Определить число способов, с помощью которых можно было бы осуществить заданные распределения восьми молекул по четырем частям объема.

Первый, второй и третий способы распределения указаны на рис. 7.1.

Решение. Число способов для данного распределения рассчитывается по формуле

$$W=\frac{N!}{N_1!\,N_2!\,N_3!\ldots},$$

где N — общее число молекул, а N_1, N_2, N_3 — число молекул данной группы. Для первого случая распределения

$$W_1=\frac{N!}{N_1!\,N_2!\,N_3!\,N_4!}=\frac{8!}{2!\,2!\,2!\,2!}=2520;$$

для второго

$$W_2=\frac{N_1!}{N_1!}=\frac{8!}{8!}=1;$$

для третьего

$$W_3=\frac{N!}{N_1!\,N_2!\,N_3!}=\frac{8!}{1!\,3!\,4!}=280.$$

7.9. В объеме находятся 6 молекул. Определить, как часто будет наблюдаться такое состояние, когда все молекулы соберутся в левой половине объема. Сделать тот же расчет для 16 молекул.

Ответ: при наблюдении за шестью молекулами на каждые 20 наблюдений равномерного распределения будет в среднем зафиксирован один случай, когда молекулы соберутся в одной поло-

вине сосуда. При наблюдении за 16 молекулами один такой же случай будет зафиксирован в среднем на 12 870 наблюдений равномерного распределения молекул.

7.10. Определить термический к. п. д. теплового двигателя, работающего по обратимому циклу Карно. Температура подвода тепла 500 °С, температура отвода тепла 20 °С. Определить также, сколько подводится и сколько отводится теплоты в этом двигателе, если его мощность $N=5$ МВт.

Ответ: $\eta_t=0{,}621$; $Q_1=8060$ кДж/с; $Q_2=3060$ кДж/с.

7.11. Холодильная установка холодопроизводительностью 6000 ккал/ч создает температуру в охлаждаемом помещении $t=-10$ °С. Температура помещения, в котором стоит холодильная установка, равна 20 °С. Приняв, что холодильная установка работает по обратимому циклу Карно, определить холодильный коэффициент ε, количество теплоты q', которое передает установка верхнему тепловому источнику (среде) в процессе при $t=20$ °С, и теоретическую мощность привода установки.

Определить, будет нагреваться или охлаждаться помещение после включения холодильной установки, и количество теплоты q'', которое будет подводиться (или отводиться) к воздуху в комнате.

Ответ: $\varepsilon=8{,}77$; $N_{\text{теор}}=0{,}794$ кВт; $q'=27{,}98$ МДж/ч; $q''=2{,}86$ МДж/ч. Помещение будет нагреваться.

7.12. 30 л воды с температурой 90 °С смешиваются с 20 л воды с температурой 15 °С.

Определить вызванное этим процессом изменение энтропии. Теплоемкость воды принять равной 4,187 кДж/(кг·К). Считать, что тепловые потери отсутствуют.

Ответ: $\Delta S=1{,}41$ кДж/К.

7.13. Стальной шар массой 10 кг при 500 °С погружается в сосуд с 18 кг воды, температура которой равна 15 °С.

Определить изменение энтропии системы в этом процессе. Считать, что тепловые потери отсутствуют. Теплоемкость стали принять равной 0,5129 кДж/(кг·К), теплоемкость воды 4,187 кДж/(кг·К).

Ответ: $\Delta S=3{,}13$ кДж/К.

7.14. Камень массой $m=1{,}2$ кг падает с высоты $h=14$ м на землю.

Определить вызванное этим процессом изменение энтропии системы камень — земля. Температура камня и окружающей среды равна 20 °С.

Решение. Изменение энтропии системы в данном необратимом процессе можно вычислить из формулы потери работоспособности. Потеря работоспособности равна убыли потенциальной энергии, т. е. $\Delta L=T_0\Delta S=mgh$, отсюда

$$\Delta S=\frac{mgh}{T_0}=\frac{1{,}2\cdot 9{,}81\cdot 14}{293}=0{,}562 \text{ Дж/К}.$$

7.15. Определить энтропию 1 кг газовой смеси, состоящей из азота и аргона, при $p_1=0{,}3$ МПа и $t_1=300$ °С. Массовые доли азота и аргона: $g_{N_2}=0{,}37$, $g_{Ar}=0{,}63$. Газы считать идеальными. Принять, что при $p_0=0{,}1$ МПа и $t_0=0$ °С энтропия азота и аргона равна нулю. Для расчета использовать табл. 14 приложения.

Решение. Энтропия смеси равна сумме энтропий отдельных газов и энтропии смешения.

Энтропия 0,37 кг азота, отнесенная к 1 кг смеси, равна:

$$s_{N_2} = \left(s^0_1 - s^0_0 - R \ln \frac{p_1}{p_0}\right) g_{N_2} =$$

$$= \left(7{,}5202 - 6{,}7443 - \frac{8{,}314}{28{,}016} \cdot 2{,}303 \lg 3\right) \cdot 0{,}37 = 0{,}167 \text{ кДж/(кг·К)},$$

е $s^0_1 - s^0_0$ показывает изменение энтропии азота в зависимости от температуры.

При расчете энтропии аргона зависимость теплоемкости от температуры можно не учитывать и расчет производить без применения таблиц термодинамических свойств газов.

Следовательно, энтропия 0,63 кг аргона, также отнесенная к 1 кг смеси, равна:

$$s_{Ar} = \left(c_p \ln \frac{T_1}{T_0} - R \ln \frac{p_1}{p_0}\right) g_{Ar} =$$

$$= \left(\frac{8{,}314 \cdot 5}{2 \cdot 39{,}944} \lg \frac{573}{273} - \frac{8{,}314}{39{,}944} \lg 3\right) 0{,}63 \cdot 2{,}303 = 0{,}099 \text{ кДж/(кг·К)}.$$

Энтропия смешения на 1 кг смеси рассчитывается по формуле

$$\Delta s = g_{Ar} R_{Ar} \ln \frac{1}{r_{Ar}} + g_{N_2} R_{N_2} \ln \frac{1}{r_{N_2}} = 0{,}63 \frac{8{,}314}{39{,}944} \times$$

$$\times 2{,}303 \lg \frac{1}{0{,}5443} + 0{,}37 \frac{8{,}314}{28{,}016} 2{,}303 \lg \frac{1}{0{,}4557} = 0{,}166 \text{ кДж/(кг·К)},$$

где

$$r_{Ar} = \frac{\frac{g_{Ar}}{\mu_{Ar}}}{\frac{g_{Ar}}{\mu_{Ar}} + \frac{g_{N_2}}{\mu_{N_2}}} = \frac{\frac{0{,}63}{39{,}944}}{\frac{0{,}63}{39{,}944} + \frac{0{,}37}{28{,}016}} = 0{,}5443$$

$$r_{N_2} = 1 - 0{,}5443 = 0{,}4557.$$

Энтропия 1 кг смеси при заданных параметрах равна:

$$s = s_{N_2} + s_{Ar} + \Delta s = 0{,}167 + 0{,}099 + 0{,}166 = 0{,}432 \text{ кДж/(кг·К)}.$$

7.16. Определить, насколько увеличится энтропия при смешении кг азота и 2 кг углекислого газа. Газы считать идеальными. Температура и давление газов до смешения одинаковы.

Ответ: $\Delta S = 0{,}7725$ кДж/К.

7.17. Смесь газов из 70% азота и 30% водорода (по массе) аходится при $t = 600$ °С и $p = 0{,}2$ МПа. Вычислить энтропию 1 кг иеси. Считать, что энтропия обоих компонентов при $t_0 = 0$ °С и $_0 = 0{,}1$ МПа равна нулю. При расчете воспользоваться таблицами. ичитать, что между азотом и водородом не происходит химической еакции.

Ответ: $s = 5{,}52$ кДж/(кг·К).

7.18. Известно, что энтропия смеси газов больше, чем энтропия отдельных компонентов смеси, на величину, называемую «энтропией смешения». С другой стороны, известно, что энтропия является аддитивной функцией.

Как устраняется это противоречие?

Решение. Доказательство ведется на примере смеси из двух идеальных газов.

Общая формула для вычисления энтропии 1 кг смеси $s_{p,t}$ при параметрах p и t имеет вид:

$$s_{p,t}=g_1(s_1)_{p,t}+g_2(s_2)_{p,t}+\Delta s_{\text{с мош}} \qquad (1)$$

или

$$s_{p,t}=g_1(s_1)_{p,t}+g_2(s_2)_{p,t}+g_1R_1\ln\frac{1}{r_1}+g_2R_2\ln\frac{1}{r_2}, \qquad (2$$

где $(s_1)_{p,t}$ и $(s_2)_{p,t}$ — энтропия 1 кг первого и второго компонентов при параметрах смеси; g и r — соответственно массовые и мольные (объемные) доли.

В этой формуле аддитивность энтропии не отражена. Причина этого заключается в том, что если смесь газов находится при давлении p и температуре t, то отдельные газы в этой смеси находятся хотя и при той же температуре, но при своих парциальных давлениях. Если же взять энтропии отдельных компонентов при парциальных давлениях и сложить их, то получится формула, в точности совпадающая с (2). Тем самым аддитивность энтропии будет доказана, т. е. будет доказана справедливость формулы

$$s_{p,t}=g_1(s_1)_{\substack{\text{парц}\\ p_1,\,t}}+g_2(s_2)_{\substack{\text{парц}\\ p_2,\,t}}. \qquad (3$$

Проследим это доказательство.

Энтропию первого газа g_1, кг/кг, при параметрах $p_1^{\text{парц}}$, t можно выразить в виде:

$$g_1(s_1)_{\substack{\text{парц}\\ p_1,\,t}}=g_1(s_1)_{p,t}-g_1R_1\ln\frac{p_1^{\text{парц}}}{p}=$$

$$=g_1(s_1)_{p,t}+g_1R_1\ln\frac{p}{p_1^{\text{парц}}}. \qquad (4$$

Известно, что в смеси газов парциальное давление газа и давление смеси связаны с помощью формулы

$$p_1^{\text{парц}}=r_1p. \qquad (5$$

Используя это соотношение, формулу (4) записываем в виде

$$g_1(s_1)_{\substack{\text{парц}\\ p_1,\,t}}=g_1(s_1)_{p,t}+g_1R_1\ln\frac{1}{r_1} \qquad (6$$

и аналогично для второго газа

$$g_2(s)_{\substack{\text{парц}\\ p_2,\,t}}=g_2(s_2)_{p,t}+g_2R_2\ln\frac{1}{r_2}. \qquad (7$$

Суммируя (6) и (7), видим, что в левой части равенства оказывается выражение для энтропии смеси по формуле (3), а в правой — по формуле (2).

Таким образом, тождественность формул (2) и (3) доказана и тем самым доказана аддитивность энтропии для случая смешения газов.

7.19. Определить эксергию (максимальную полезную работоспособность) воздуха в баллоне. Давление воздуха в баллоне 15 МПа, температура равна температуре среды. Параметры окружающей среды (воздуха): $p_0=0{,}1$ МПа, $t_0=20$ °С. Объем баллона 40 дм³. Воздух считать идеальным газом.

Ответ: $Ex=2411$ кДж.

7.20. Определить эксергию воздуха в баллоне. Известны давление и температура воздуха: $p=13$ МПа, $t=200$ °С. Параметры окружающей среды: $p_0=0{,}1$ МПа, $t_0=15$ °С. Объем баллона 20 дм³. Воздух считать идеальным газом.

Ответ: $Ex=594{,}4$ кДж.

7.21. Определить эксергию азота, находящегося в пьезометре экспериментальной установки при $p=25$ МПа и $t=700$ °С. Параметры среды: $p_0=0{,}1$ МПа, $t_0=20$ °С. Объем пьезометра 500 см³. Азот считать идеальным газом.

Ответ: $Ex=24{,}0$ кДж.

7.22. Определить минимальную теоретическую работу разделения 1 кг воздуха на кислород и азот. Считать, что воздух состоит из 21 объемной части кислорода и 79 объемных частей азота. Температура воздуха 15 °С. Температура среды 0 °С. Газы считать идеальными.

Решение. Минимальная работа, которую необходимо затратить для разделения газов, будет равна потере эксергии в обратном процессе, т. е. при смешении газов.

При получении расчетной формулы нельзя считать, что эксергия газов до смешения будет рассчитываться по обычной формуле эксергии для неподвижного тела

$$ex=u-u_0-T_0(s-s_0)-p_0(v_0-v),$$

так как эта формула определяет значение эксергии данного тела по отношению к среде.

В рассматриваемом случае эксергия газов до смешения численно будет равна работе расширения газов «друг в друга» — после снятия разделяющей перегородки.

Эта работа в расчете на 1 кг смеси вычисляется (процесс расширения изотермический) по формуле

$$l=g_1R_1T\ln\frac{V}{V_1}+g_2R_2T\ln\frac{V}{V_2},$$

где индексы 1 и 2 относятся соответственно к кислороду и азоту. Введя объемные доли, можно окончательно получить значение потери эксергии:

$$\Delta ex=T\left(g_1R_1\ln\frac{1}{r_1}+g_2R_2\ln\frac{1}{r_2}\right)=T\Delta s,$$

где Δs — увеличение энтропии в процессе смешения.

Если в этой формуле температура газов будет равна температуре окружающей среды, то получится формула Гюи—Стодолы.

Необходимые для расчета массовые доли кислорода g_1 и азот g_2 определяются так:

$$g_1 = \frac{r_1\mu_1}{r_1\mu_1 + r_2\mu_2} = \frac{0{,}21 \cdot 32}{0{,}21 \cdot 32 + 0{,}79 \cdot 28{,}016} = 0{,}2329;$$

$$g_2 = 1 - 0{,}2329 = 0{,}7671.$$

Изменение энтропии

$$\Delta s = 0{,}2329 \cdot \frac{8{,}314}{32} \cdot 2{,}303 \cdot \frac{1}{0{,}21} + 0{,}7671 \cdot \frac{8{,}314}{28{,}016} \times$$

$$\times 2{,}303 \cdot \frac{1}{0{,}79} = 0{,}1481 \text{ кДж/(кг·К)}.$$

Минимальная работа разделения

$$l = 288 \cdot 0{,}1481 = 42{,}65 \text{ кДж/кг}.$$

7.23. Определить эксергию 100 кДж теплоты при температур 700 °С. Температура среды 0 °С. Определить потерю эксергии это теплоты, если последняя будет пер дана тепловому источнику с темп ратурой 500 °С.

Ответ: эксергия теплоты при тем пературе 700 °С равна 71,9 кДж; п теря эксергии при передаче теплот равна 7,2 кДж.

7.24. Определить эксергию те лоты, которая выделяется при сг рании на воздухе 1 кг топлива с те лотой сгорания $Q^{P}_{н}$=20 МДж/к Температура горения 1300 °С. Пар метры среды: p_0=0,1 МПа и t_0= =20 °С. Теплоемкость продуктов сг рания принять постоянной.

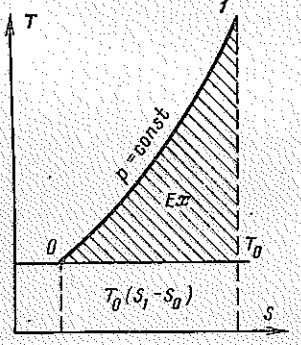


Рис. 7.2. К задаче 7.24.

Решение. Получившийся исто ник теплоты является источнико теплоты с переменной температуро так как в процессе отвода теплот от источника и превращения тепл ты в работу он будет охлаждаться; его работоспособность будет и черпана, когда его температура станет равной температуре сред

На рис. 7.2 показан процесс охлаждения источника теплот линией *1-0* до температуры среды T_0.

Эксергия будет определяться следующим образом. Для беск нечно малого количества теплоты dQ при температуре T диффере циал эксергии определяется через термический к. п. д. цикла Ка чо, т. е.

$$d(Ex) = dQ\left(1 - \frac{T_0}{T}\right),$$

огда эксергия оказывается равной:

$$Ex = \int \left(1 - \frac{T_0}{T}\right) dQ = Q - T_0 \int_0^1 \frac{dQ}{T};$$

$$Ex = Q - T_0 (S_1 - S_0).$$

На рис. 7.2 эксергия численно равна заштрихованной площади гласно приведенной выше формуле.

Величина $T_0(S_1 - S_0) = Q_2$, т. е. равна тому количеству теплоты, которое надо передать нижнему источнику (среде) в процессе превращения теплоты в работу. Изменение энтропии может быть вычислено так:

$$S_1 - S_0 = C \ln \frac{T_1}{T_0},$$

где C — теплоемкость данного источника теплоты:

$$C = \frac{Q}{T_1 - T_2}.$$

С учетом написанных соотношений эксергия теплоты может быть вычислена по формуле

$$Ex = Q - T_0 \frac{Q}{T_1 - T_0} \ln \frac{T_1}{T_0}$$

или окончательно

$$Ex = Q \left(1 - \frac{T_0}{T_1 - T_0} \ln \frac{T_1}{T_0}\right).$$

Вычислим значение эксергии по этой формуле:

$$Ex = 20{,}0 \left(1 - \frac{293{,}15}{1280} \cdot 2{,}303 \lg \frac{1573{,}15}{293{,}15}\right) = 12{,}3 \text{ МДж}.$$

Таким образом, эксергия теплоты в данных условиях составляет 61,5% теплоты сгорания топлива.

7.25. Определить эксергию количества теплоты, которое получается в результате сгорания на воздухе 1 кг топлива с теплотой сгорания $Q^p_н = 25{,}0$ МДж/кг; температура горения 1500 °С; температура окружающей среды $t_0 = 20$ °С; теплоемкость продуктов сгорания принять постоянной.

Ответ: $ex = 16{,}08$ МДж/кг, что составляет 64,3% теплоты сгорания топлива.

7.26. Определить эксергию 1 кг горячих газов в котельном агрегате, если известно, что температура пламени при сгорании топлива равна 1400 °С, а давление газов близко к атмосферному. Параметры окружающей среды (воздуха): $p_0 = 0{,}1$ МПа и $t_0 = 20$ °С. Считать, что термодинамические свойства газов идентичны свойствам азота.

Решение. Так как газы в котельном агрегате непрерывно движутся, то для вычисления эксергии используется формула эксергии потока

$$ex = h - h_0 - T_0 (s - s_0),$$

где параметры без индекса относятся к состоянию газов при сам высокой температуре, а с индексом 0 — к состоянию этих же газ при температуре и давлении среды.

Для вычислений используется табл. 14 приложения. При вычи лении ($s—s_0$) учитывается только температурная зависимость энтр пии, так как по условию задачи давление газов близко к атм сферному. Эксергия 1 кг газов вычисляется по формуле:

$$ex = h - h_0 - T_0(s - s_0) = 1897{,}4 - 304{,}0 -$$

$$-293{,}15(8{,}7668 - 6{,}8178) = 1593 - 571 = 1022 \text{ кДж/кг}.$$

7.27. Определить эксергию 1 кг горячих газов в котельн агрегате. Известно, что температура пламени равна 1500 °С, да ление газов близко к атмосферному.

Параметры окружающего воздуха: $p_0 = 0{,}1$ МПа и $t_0 = 0$ ° Принять, что термодинамические свойства газов аналогичны сво ствам воздуха. Задачу решить с применением табл. 13 приложени

Ответ: $ex = 1139$ кДж/кг.

7.28. Определить эксергию 1 кг двуокиси углерода при пар метрах $p = 3{,}5$ МПа, $t = 450$ °С в потоке. Параметры среды: p_0 $= 0{,}1$ МПа, $t_0 = 20$ °С. Двуокись углерода считать идеальным газо

Ответ: $ex = 369{,}8$ кДж/кг.

7.29. Определить эксергию 1 кг текущей в трубе горячей вод при давлении, близком к атмосферному. Температура воды 90 ° температура окружающего воздуха $t_0 = 20$ °С. Считать, что тепл емкость воды постоянна и равна 4,187 кДж/(кг·К).

Ответ: $ex = 30{,}2$ кДж/кг.

7.30. В проточном теплообменнике нагревается воздух. Пар метры воздуха при входе в теплообменник: $p_1 = 0{,}7$ МПа и t_1 $= 140$ °С, на выходе: $p_2 = 0{,}63$ МПа и $t_2 = 800$ °С. Параметры сред $p_0 = 0{,}1$ МПа и $t_0 = 15$ °С.

Определить изменение эксергии 1 кг воздуха в теплообменник Воздух считать идеальным газом.

Решение. Эксергию 1 кг воздуха во втором и первом состоян определяем по выражениям:

$$ex_2 = h_2 - h_0 - T_0(s_2 - s_0);$$

$$ex_1 = h_1 - h_0 - T_0(s_1 - s_0),$$

тогда изменение эксергии будет:

$$ex_2 - ex_1 = h_2 - h_1 - T_0(s_2 - s_1).$$

При вычислениях пользуемся табл. 13. приложения:

$$ex_2 - ex_1 = h_2 - h_1 - T_0\left(s^0{}_2 - s^0{}_1 - R\ln\frac{p_2}{p_1}\right) = 1129{,}8 - 414{,}3 -$$

$$-288{,}15\left(8{,}0488 - 7{,}0248 - \frac{8{,}314}{28{,}96}2{,}303\lg\frac{0{,}63}{0{,}7}\right) = 411 \text{ кДж/кг}.$$

7.31. Азот протекает через местное гидравлическое сопротивл ние. Параметры азота при этом изменяются от $p_1 = 0{,}4$ МПа $t_1 = 300$ °С до $p_2 = 1{,}5$ МПа и $t_2 = 280$ °С.

Определить изменение эксергии 1 кг азота в этом процессе количество отведенной теплоты. Азот считать идеальным газо Параметры среды: $p = 0{,}1$ МПа, $t_0 = 10$ °С.

Ответ: эксергия 1 кг азота уменьшается на 93 кДж/кг; от как дого килограмма азота отнимается 21,4 кДж/кг теплоты.

7.32. Доказать, что потеря эксергии вещества в процессе адиабатного дросселирования равна произведению абсолютной температуры окружающей среды на изменение энтропии в процессе дросселирования.

7.33. В трубе течет азот, его начальные параметры: $p_1=2{,}5$ МПа и $t_1=80$ °С. В результате гидравлических сопротивлений давление азота вдоль трубы падает и в конце становится равным 1,7 МПа.

Определить потерю эксергии 1 кг азота в результате такого процесса. Считать, что процесс течения адиабатный. Газ считать идеальным. Параметры окружающей среды: $p_0=0{,}1$ МПа и $t_0=20$ °С.

Ответ: $\Delta ex=33{,}6$ кДж/кг.

7.34. Для некоторых горячих источников температура газа, выходящего из земли, доходит до 180 °С (давление атмосферное).

Определить эксергию 1 кг газа. Температура среды $t_0=20$ °С. Считать, что газ по своим термодинамическим свойствам является идеальным и идентичен углекислому газу.

Определить максимальный термический к. п. д., который имел бы тепловой двигатель, превращающий теплоту этого источника в работу.

Ответ: эксергия 1 кг равна 30,3 кДж/кг, что составляет 20,7% теплоты, которая выделится при охлаждении газов до температуры окружающей среды.

Максимальный термический к. п. д. рассчитывается, как к. п. д. цикла Карно для максимальной температуры газов. В этом случае предполагается бесконечно малое охлаждение газа при подводе теплоты в цикле Карно. Другими словами, такой к. п. д. может быть достигнут при бесконечно большом расходе газа: $\eta_{t,\,к}=35{,}3\%$.

7.35. Из некоторых подземных источников выходит водяной пар. Определить эксергию 1 кг выходящего пара. Температура пара равна 100 °С, давление атмосферное. Температура окружающей среды 10 °С. Принять, что теплота парообразования $r=2257$ кДж/кг, а теплоемкость воды $c_p=4{,}187$ кДж/(кг·К).

Ответ: $ex=587$ кДж/кг.

7.36. Доказать, что для проточного теплообменника, работающего без тепловых потерь в окружающую среду, потеря эксергии в процессе теплообмена и прохождения газов через теплообменник равна произведению абсолютной температуры окружающей среды на увеличение энтропии газов (жидкостей) (формула Гюи—Стодолы).

7.37. Известно, что эксергетический к. п. д. проточного теплообменника равен отношению изменения эксергии нагреваемого тела к изменению эксергии нагревающего тела. Используя это положение, доказать, что при отсутствии тепловых потерь в теплообменнике эксергетический к. п. д.

$$\eta_{ex}=1-\frac{T_0\Delta S}{\Delta Ex},$$

где $T_0\Delta S$ — потеря эксергии газов (жидкостей) в теплообменнике, а ΔEx — изменение эксергии нагревающего тела.

Проанализировать полученный результат.

В каком случае эксергетический к. п. д. теплообменника будет равен единице?

7.38. В регенеративном теплообменнике газотурбинной установки (ГТУ) воздух нагревается за счет выхлопных газов, выходящих из турбины. Воздух нагревается от $t_1=140$ °С до $t_2=270$ °С; соответ-

ственно этому выхлопные газы охлаждаются от $t_3=340$ °С д $t_4=210$° С.

Определить потерю эксергии ГТУ в результате такого тепло обмена в расчете на 1 кг проходящего газа[1]. Газ считать идеаль ным, обладающим свойствами воздуха, а теплоемкость принять п молекулярно-кинетической теории. Температура окружающей сред 20 °С. Считать, что теплообменник не имеет тепловых потерь. Гид равлическими сопротивлениями теплообменника пренебречь.

Вычислить также эксергетический к. п. д. теплообменника.

Решение. Потеря эксергии рассчитывается по формуле Гюи–Стодолы: $\Delta ex=T_0\Delta s$, где T_0 — абсолютная температура среды а Δs — изменение энтропии системы при рассматриваемом необрати мом процессе.

Изменение энтропии системы будет складываться из уменьше ния энтропии охлаждающегося в теплообменнике газа Δs_I и увели чения энтропии нагревающегося воздуха Δs_{II}, т. е.

$$\Delta s=\Delta s_I+\Delta s_{II}.$$

Уменьшение энтропии газа (в расчете на 1 кг проходящего газа)

$$\Delta s_I=s_4-s_3=c_p\ln\frac{T_4}{T_3}=$$

$$=\frac{8{,}314\cdot7}{2\cdot28{,}96}2{,}303\lg\frac{483}{613}=-0{,}240\ \text{кДж/(кг·К)}.$$

Увеличение энтропии воздуха

$$\Delta s_{II}=s_2-s_1=c_p\ln\frac{T_2}{T_1}=$$

$$=\frac{8{,}314\cdot7}{2\cdot28{,}96}2{,}303\lg\frac{543}{413}=0{,}275\ \text{кДж/(кг·К)}.$$

Изменение энтропии системы

$$\Delta s=\Delta s_I+\Delta s_{II}=-0{,}240+0{,}275=0{,}035\ \text{кДж/(кг·К)},$$

т. е. энтропия системы увеличилась.

Потеря эксергии

$$\Delta ex=0{,}035\cdot293=10{,}3\ \text{кДж/кг}.$$

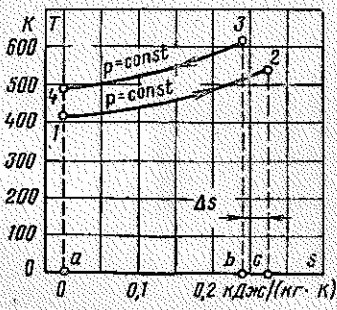


Рис. 7.3. К задаче 7.38.

Необходимо еще раз заметить, что рассчитываемый теплообменник не имеет тепловых потерь в окружающую среду, а потеря работоспособности возникает исключительно вследствие необратимого теплообмена при конечной разности температур.

Увеличение энтропии системы хорошо видно на рис. 7.3. Так как теплота, отданная газом, равна теплоте, воспринятой воздухом, то имеет место следующее равенство площадей:

пл. *34ab3* = пл. *12ca1*

[1] В ГТУ, работающей по теоретическому циклу, массовый расход продуктов сгорания точно равен расходу воздуха, т. е. количество рабочего тела при осуществлении цикла постоянно.

Эксергетический к. п. д. теплообменника рассчитывается по формуле (см. задачу 7.37)

$$\eta_{ex}=1-\frac{T_0\Delta s}{ex_3-ex_4}=1-\frac{T_0\Delta s}{h_3-h_4-T_0(s_3-s_4)}.$$

В этой формуле

$$h_3-h_4=c_p(t_3-t_4)=\frac{8,314\cdot7}{2\cdot28,96}(340-210)=131\text{ кДж/кг}.$$

Окончательно получим:

$$\eta_{ex}=1-\frac{10,3}{131+293\cdot0,240}=0,83.$$

7.39. Определить потерю эксергии и эксергетический к. п. д. регенеративного теплообменника газотурбинной установки. В теплообменнике воздух нагревается от $t_1=200$ °С до $t_2=400$ °С, при этом давление воздуха изменяется от $p_1=0,5$ МПа до $p_2=0,45$ МПа. Газ, выходящий из турбины, охлаждается от $t_3=450$ °С; давление газа в теплообменнике меняется от $p_3=0,15$ МПа до $p_4=0,1$ МПа. Считать, что газ также обладает свойствами воздуха, а воздух считать идеальным газом. Для расчетов пользоваться табл. 13 приложения. Расчет вести на 1 кг проходящего воздуха. Считать, что теплообменник не имеет тепловых потерь. Температура окружающей среды равна 10 °С.

Ответ: $\Delta ex=78,4$ кДж/кг; $\eta_{ex}=0,535$.

7.40. Определить потерю работоспособности, происходящую тепловыделяющем элементе атомного реактора, где выделяющаяся процессе ядерной реакции теплота поглощается водой, протекающей при давлении 10 МПа. Вода нагревается от $t_1=190$ °С до $=280$ °С; температура тепловыделяющего элемента $t_3=380$ °С и остоянна по высоте. Расчет потери вести на 419 кДж переданной еплоты. Температура окружающей среды $t_0=20$ °С. Считать, что епловые потери отсутствуют. Гидравлическими сопротивлениями ренебречь.

Решение. Потеря работоспособности равна $T_0\Delta S$, где ΔS — изменение энтропии системы. При этом $\Delta S=\Delta S_{\text{I}}+\Delta S_{\text{II}}$.

Здесь ΔS_{I} — изменение энтропии тепловыделяющего элемента, ΔS_{II} — изменение энтропии воды в процессе ее нагревания. Эти зменения равны:

$$\Delta S_{\text{I}}=-\frac{Q}{T_3}=-\frac{419}{653}=-0,6416\text{ кДж/К};$$

$$\Delta S_{\text{II}}=mc_p\ln\frac{T_2}{T_1}=1,111\cdot4,19\cdot2,303\lg\frac{553}{463}=0,8254\text{ кДж/К}.$$

Здесь m — масса воды, поглотившая 419 кДж тепла:

$$m=\frac{Q}{c_p(t_2-t_1)}=\frac{419}{4,19(280-190)}=1,111\text{ кг}.$$

Увеличение энтропии системы

$$\Delta S=0,8254-0,6416=0,1838\text{ кДж/К}.$$

Потеря работоспособности

$$\Delta L=T_0\Delta S=293\cdot0,1838=53,85\text{ кДж}.$$

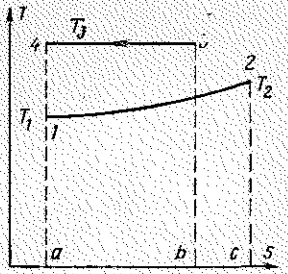


Рис. 7.4. К задаче 7.40.

Процесс передачи теплоты можи изобразить в T, S-диаграмме (рис. 7.4) совместив начала отсчета энтропии. Та как тепловых потерь нет, а площадь по линией процесса в T, S-диаграмме изо бражает тепло, то имеет место следую щее равенство площадей: пл. *34ab3*= =пл. *12cal*.

7.41. В противоточном теплообмен нике воздух охлаждается от $t_1=240$ ° до $t_2=60$ °С. Охлаждение производитс за счет воды, которая нагревается о $t_3=15$ °С до $t_4=32$ °С.

Определить изменение энтропи системы вода — воздух в течение 1 Расход охлаждающей воды $m=250$ кг/ч. Теплоемкость возду ха принять постоянной, равной 1 кДж/(кг·К); c_p воды сч тать равной 4,187 кДж/(кг·К). Принять, что теплообменник н имеет тепловых потерь и гидравлических сопротивлений.

Ответ: $\Delta S=17{,}42$ кДж/(ч·К).

7.42. Определить потерю эксергии, происходящую в процесс конденсации водяного пара в конденсаторе паровой турбины.

Процесс конденсации пара происходит при $p=4$ кПа; темпера тура конденсации при этом равна 29,0 °С. Теплота, выделяющаяс в процессе конденсации пара, передается окружающей среде, тем пературе которой 10 °С. Расчет произвести на 1 кг конденсирук щегося пара. Считать, что в конденсатор поступает сухой насыщен ный пар. Гидравлическими потерями конденсатора пренебречь.

Решение. Изменение энтропии системы в рассматриваемом пр цессе

$$\Delta s=\Delta s_{\text{пара}}+\Delta s_{\text{среды}};$$

$$\Delta s_{\text{пара}}=-\frac{2433}{29+273}=-8{,}056 \text{ кДж/(кг·К)},$$

где $r=2433$ кДж/(кг·К) — теплота парообразования при $p=4$ кП

Отведенная теплота передается среде; увеличение энтропи среды

$$\Delta s_{\text{среды}}=+\frac{2433}{283}=8{,}597 \text{ кДж/(кг·К)}.$$

Изменение энтропии системы

$$\Delta s=8{,}597-8{,}056=0{,}541 \text{ кДж/(кг·К)}.$$

Потеря эксергии

$$\Delta ex=283{,}15\cdot 0{,}541=153{,}2 \text{ кДж/кг}.$$

Таким образом, потеря эксергии составляет примерно 6% к личества переданной среде теплоты $\left(\frac{153{,}2}{2433}\cdot 100\%\approx 6\%\right)$.

7.43. Определить потерю эксергии вследствие теплообмена в р генеративном теплообменнике газотурбинной установки. Возду в теплообменнике нагревается от $t_1=160$ °С, а газы охлаждаютс от $t_2=400$ °С до $t_3=240$ °С. Тепловые потери теплообменника с ставляют 10% теплоты, отдаваемой газом.

Выхлопные газы, выходящие из турбины, и воздух считать идеальными газами, обладающими свойствами воздуха, а теплоемкость принять по молекулярно-кинетической теории. Температура окружающей среды равна 15 °С. Потерю эксергии рассчитать на 1 кг проходящих газа и воздуха.

Гидравлическими сопротивлениями теплообменника пренебречь.

Ответ: $\Delta ex = 20{,}58$ кДж/кг.

7.44. Средняя температура подвода теплоты для водяного пара в паротурбинной установке (ПТУ) равна 330 °С, температура отвода теплоты равна 29 °С.

Определить термический к. п. д. ПТУ, а также эксергетический к. п. д. теоретического цикла ПТУ.

При расчете эксергетического к. п. д. считать, что в топке котла сжигается топливо при атмосферном давлении; максимальная температура пламени $t_{пл} = 1350$ °С, теплоемкость продуктов сгорания постоянна. Температуру среды принять равной 29 °С. Считать, что тепловые потери в котельном агрегате отсутствуют.

Решение. Термический к. п. д. цикла

$$\eta_t = \frac{T_{1,ср} - T_2}{T_{1,ср}} = \frac{603 - 302}{603} = 0{,}499.$$

Эксергетический к. п. д.

$$\eta_{ex} = \frac{l}{ex}.$$

В числителе этой формулы — теоретическая работа цикла, а в знаменателе — эксергия теплоты, получившейся при сгорании топлива. Вычисление эксергии теплоты при сгорании топлива было рассмотрено в задаче 7.24.

Получаем:

$$\eta_{ex} = \frac{l}{ex} = \frac{Q\eta_t}{Q - T_0 \dfrac{Q}{T_{пл} - T_0} \ln \dfrac{T_{пл}}{T_0}}.$$

После сокращения Q окончательно получаем:

$$\eta_{ex} = \frac{\eta_t}{1 - \dfrac{T_0}{T_{пл} - T_0} \ln \dfrac{T_{пл}}{T_0}} = \frac{0{,}499}{1 - \dfrac{302}{1623 - 302} 2{,}303 \lg \dfrac{1623}{302}} = 0{,}811.$$

Рассматривая эту задачу, мы видим, что эксергетический к. п. д. больше термического. Это объясняется тем, что эксергия теплоты, написанная в знаменателе формулы для эксергетического к. п. д., всегда меньше, чем само значение теплоты, которое стоит в знаменателе термического к. п. д.

7.45. В паротурбинной установке средняя температура воды и водяного пара в процессе нагревания его за счет сгоревшего топлива равна 350 °С. Температура конденсации пара 28 °С. В топке котла сжигается 50 т/ч топлива с теплотой сгорания $Q^{р}_{в} = 20$ МДж/кг.

Определить термический к. п. д. ПТУ, теоретическую мощность и эксергетический к. п. д. для теоретического цикла данной ПТУ. Считать, что топливо сжигается при атмосферном давлении, максимальная температура газов в газоходах котла 1450 °С, теплоемкость

продуктов сгорания считать постоянной. Тепловыми потерями к тельного агрегата пренебречь. Температура среды равна 28 °С.

Ответ: $\eta_t = 0{,}517$; $N_{теор} = 143{,}6$ МВт; $\eta_{ex} = 0{,}820$.

7.46. Определить изменение энтропии в изохорном процес изменения состояния сероуглерода CS_2, если начальные параметр $p_1 = 0{,}2$ МПа и $t_1 = 37{,}0$ °С, а конечное давление $p_2 = 0{,}95$ МП

Указание. Воспользоваться табл. 22 приложения, в которо приведены значения s_v на изохоре, полученные пересчетом из эн чений s_p по формуле

$$s_v = s_p - R \ln \frac{T}{273{,}15}.$$

Ответ: $s_2 - s_1 = s_{v2}^{таб} - s_{v1}^{таб} = 0{,}9555$ кДж/(кг·К).

7.47. Метан CH_4 с начальными параметрами $p_1 = 4{,}0$ МПа $t_1 = 620$ °С изменяет свое состояние в изоэнтропном процессе та что его конечное давление p_2 становится равным 0,5 МПа.

Считая газ подчиняющимся уравнению Клапейрона, найти к нечную температуру t_2. Термодинамические функции газа завис от температуры. При расчете пользоваться табл. 23 приложени применив метод «конечной табличной энтропии».

Решение. Изменение энтропии 1 кг любого газа в идеальн состоянии при совершении им произвольного процесса выражает уравнением

$$s_2 - s_1 = \int_{T_1}^{T_2} \frac{c_p dT}{T} - R \ln \frac{p_2}{p_1}.$$

В этом выражении первый член правой части представля собой изменение энтропии 1 кг газа в процессе $p = \text{const}$ и, следов тельно, может быть получен непосредственно из таблиц, так к в них приведены энтропии газов, изменяющиеся в процессе п давлении $p = 1 = \text{const}$[1], а **изменение** энтропии идеального га в **любом** изобарном процессе одно и то же, если начальные конечные температуры одинаковы.

Следовательно,

$$\int_{T_1}^{T_2} \frac{c_p dT}{T} = s_2^{таб} - s_1^{таб},$$

а расчетная формула, справедливая для **любого** процесса, мож быть переписана в виде:

$$s_2 - s_1 = s_2^{таб} - s_1^{таб} - R \ln \frac{p_2}{p_1}.$$

По условию задачи процесс изоэнтропный, поэтому

$$s_2^{таб} - s_1^{таб} - R \ln \frac{p_2}{p_1} = 0.$$

[1] При расчете табличных энтропий квантово-статистическим метод обычно выбирается стандартное давление $p = 1$ атм (физ.) $= 0{,}101325$ МПа.

Отсюда

$$s_2^{\text{таб}} = s_1^{\text{таб}} + R \ln \frac{p_2}{p_1}.$$

При помощи рассчитанной таким образом конечной табличной энтропии в таблице находится искомая температура t_2.

Проделаем этот расчет, найдя предварительно из табл. 23 приложения энтропию $s_1 = 3{,}5306$ кДж/(кг·К):

$$s_2^{\text{таб}} = 3{,}5306 + \frac{8{,}3143}{16{,}04} \cdot 2{,}303 \lg \frac{5}{40} = 2{,}4525 \text{ кДж/(кг·К)};$$

$$t_2 = f(2{,}4525) = 402 \text{ °C}.$$

Условия этой задачи те же, что и условия задачи 6.32 (в котором в чисто учебных целях был проделан громоздкий расчет методом «среднего k»), но решается она очень просто и совершенно строго методом «конечной табличной энтропии». Поэтому его и следует применять в практических расчетах.

Разумеется, аналогичный расчет для других газов может быть сделан и при помощи таблиц С. Л. Ривкина (например, табл. 14, 15 приложения). Однако в этом нет надобности, так как методика расчета адиабатного процесса при помощи этих таблиц еще более упрощена путем ввода вспомогательных величин π_0 и θ_0.

7.48. Этан C_2H_6 из начального состояния при $p_1 = 0{,}11$ МПа и $t_1 = 50$ °С, совершая изоэнтропный процесс, переходит в состояние, при котором $p_2 = 10$ МПа.

Определить конечные параметры газа при помощи табл. 24 приложения, пользуясь методом «конечной табличной энтропии».

Ответ: $v_2 = 0{,}01532$ м³/кг; $t_2 = 282$ °С.

7.49. Сернистый ангидрид SO_2 в состоянии при $p_1 = 0{,}6$ МПа и $t_1 = 700$ °С изоэнтропно расширяется до тех пор, пока его удельный объем не становится равным 1,600 м³/кг.

Определить температуру t_2 сернистого ангидрида в конечном состоянии. Пользоваться табл. 21 приложения, применив метод «конечной табличной энтропии».

Решение. Изменение энтропии любого газа в идеальном состоянии при произвольном процессе можно вычислить следующим образом:

$$s_2 - s_1 = \int_{T_1}^{T_2} \frac{c_v dT}{T} + R \ln \frac{v_2}{v_1}.$$

Здесь первый член правой части уравнения представляет собой изменение энтропии 1 кг газа в процессе $v = \text{const}$ на какой угодно изохоре при изменении температуры от T_1 до T_2, следовательно,

$$\int_{T_1}^{T_2} \frac{c_v dT}{T} = s_{v2}^{\text{таб}} - s_{v1}^{\text{таб}}$$

расчетная формула будет иметь вид:

$$s_2 - s_1 = s_{v2}^{\text{таб}} - s_{v1}^{\text{таб}} + R \ln \frac{v_2}{v_1}.$$

Для изоэнтропного процесса

$$s_{v2}^{\text{таб}} = s_{v1}^{\text{таб}} - R \ln \frac{v_2}{v_1}.$$

Искомая в задаче конечная температура находится в таблиц как функция $s_{v2}^{\text{таб}}$.

В нашей задаче

$$v_1 = \frac{8314{,}3 \cdot 973}{64{,}06 \cdot 0{,}6 \cdot 10^6} = 0{,}210 \text{ м}^3/\text{кг};$$

$$s_{v2}^{\text{таб}} = 0{,}7591 - \frac{8{,}3143}{64{,}06} \cdot 2{,}303 \lg \frac{1{,}600}{0{,}210} = 0{,}4955 \text{ кДж/(кг·К)};$$

$$t_2 = f(0{,}4955) = 389 \text{ °C}.$$

7.50. Сероуглерод CS_2 из начального состояния при p_1 =0,097 МПа и t_1=37,0 °С изоэнтропно сжимается до тех пор, по его удельный объем не становится равным 0,0100 м³/кг.

Определить конечную температуру t_2 сероуглерода при помощ табл. 22 приложения методом «конечной табличной энтропии».

Ответ: t_2=348 °С.

Глава восьмая

РЕАЛЬНЫЕ ГАЗЫ

Сложность точных уравнений состояния реальных веществ сил но затрудняет использование их в учебных примерах. С целью сд лать более наглядными способы применения уравнения состоян для расчета термодинамических свойств веществ и процессов, прои ходящих с ними, в настоящем разделе в учебных целях использую ся простые и имеющие некоторое теоретическое обоснование уравн ния состояния. Авторы полностью отдают себе отчет в их невысок практической ценности и ни в коей мере не рекомендуют эти ура нения в качестве обязательного инструмента аналитического аппар та термодинамики. Они приводятся лишь для иллюстрации возмо ных путей использования уравнений состояния.

Разумеется, основные дифференциальные соотношения термод намики при наличии точных уравнений состояния всегда могут бы использованы для практических расчетов.

8.1. Одним из наиболее известных и теоретически обоснованны уравнений состояния является уравнение Ван-дер-Ваальса

$$\left(p + \frac{a}{v^2}\right)(v - b) = RT.$$

Определить значения постоянных a и b для двуокиси углерод если его критические параметры равны: $p_{\text{кр}}$=7,383 МПа, $t_{\text{кр}}$ =31,05 °С и $v_{\text{кр}}$=0,2136·10⁻² м³/кг.

Ответ:

Критические параметры, выбранные для расчета	a, Н·м⁴/кг²	b, м³/кг
$v_{кр}$ и $p_{кр}$	101,4	$0{,}173 \cdot 10^{-3}$
$v_{кр}$ и $T_{кр}$	140,4	$0{,}173 \cdot 10^{-3}$
$p_{кр}$ и $T_{кр}$	190,9	$0{,}984 \cdot 10^{-3}$

Обратить внимание на то, что при вычислении вандерваальсовых поправок при помощи различных пар критических параметров получаются разные результаты.

8.2. Определить значения постоянных a и b уравнения состояния ертло для водяного пара:

$$\left(p + \frac{a}{Tv^2}\right)(v - b) = RT.$$

Постоянные a и b находятся по условиям для критической очки

$$\left(\frac{\partial p}{\partial v}\right)_{T_{кр}} = 0 \text{ и } \left(\frac{\partial^2 p}{\partial v^2}\right)_{T_{кр}} = 0.$$

Критические параметры воды $p_{кр}$=22,129 МПа, $T_{кр}$=647,30 К и $_{кр}$=0,326·10⁻² м³/кг.

Ответ: $a = \frac{16}{3} p_{кр} v^2_{кр} = 1255$ Н·м⁴/кг²;

$$b = \frac{v_{кр}}{4} = 0{,}814 \cdot 10^{-3} \text{ м}^3/\text{кг}.$$

8.3. Определить значения постоянных a и b уравнения Ван-дер-ааальса по критическим параметрам $p_{кр}$ и $T_{кр}$ для водяного пара см. задачу 8.2).

Ответ: a=1700,36 Н·м⁴/кг²; b=0,1687·10⁻² м³/кг.

8.4. Известное эмпирическое уравнение состояния Воля

$$p = \frac{RT}{(v - b)} - \frac{a}{Tv(v - b)} + \frac{c}{T^2 v^3}$$

ыгодно отличается от уравнений с двумя постоянными (типа ан-дер-Ваальса) тем, что трем условиям для критической точки уравнение состояния и уравнения для первой и второй производных) соответствуют три постоянных a, b, c. Это позволяет избежать неоднозначности определения постоянных, т. е. повысить надежность уравнения. Постоянные уравнения Воля связаны с критическими параметрами следующим образом:

$$a = cv^2_{кр} p_{кр} T_{кр};\ b = v_{кр}/4;\ c = 4v^3_{кр} p_{кр} T^2_{кр}.$$

Определить значение критического давления $p_{кр}$ для пентана, ли его $\mu V_{кр}$=0,312 м³/кмоль и $T_{кр}$=470,2 К. Сравнить рассчитанное значение с опытным $p_{кр,эксп}$=3,35 МПа.

Ответ: $p_{кр}$=3,34 МПа.

8.5. Пользуясь уравнением состояния Воля (см. задачу 8.4), ределить значение $v_{кр}$ для бензола, если $p_{кр}$=4,851 МПа, а $T_{кр}$= 561,6 К. Сравнить рассчитанное значение с экспериментальным $_{кр,эксп}$=0,328·10⁻² м³/кг.

Ответ: $v_{кр}=0{,}329\cdot10^{-2}$ м³/кг.

8.6. Вычислить критическую температуру $T_{кр}$ по уравнению с состояния Воля (см. задачу 8.4), если для хлорбензола критическ давление и объем соответственно равны 4,523 МПа и 0,308 м³/кмол Сравнить рассчитанное значение $T_{кр}$ с экспериментальным $T_{кр,эксп}$ =632,3 К.

Ответ: $T_{кр}=638$ К.

8.7. При помощи уравнения состояния Бертло, записанного в ви риальной форме

$$pv=RT+Bp,$$

в которой второй вириальный коэффициент B выражается чере критические параметры соотношением

$$B=\frac{9RT_{кр}}{128p_{кр}}\left(1-6\frac{T^2_{кр}}{T^2}\right),$$

вычислить теплоемкость c_p двуокиси углерода при $p=1$ МПа $T=420$ К. Теплоемкость двуокиси углерода в идеально-газовом с стоянии принять по табл. 10 приложения.

Сравнить рассчитанное значение c_p с табличным $c_{p,табл}$ =0,978 кДж/(кг·К).

Указание. Воспользоваться уравнением

$$\left(\frac{\partial c_p}{\partial p}\right)_T=-T\left(\frac{\partial^2 v}{\partial v^2}\right)_p.$$

Учесть также, что для уравнения Бертло справедливо соотн шение

$$\frac{9}{32}RT_{кр}=p_{кр}v_{кр}.$$

Ответ: $c_p=c_{p,0}+9v_{кр}T^2_{кр}pT^{-3}=0{,}979$ кДж/(кг·К);

$$c_{p,табл}-c_p=0{,}978-0{,}979=-0{,}001 \text{ кДж/(кг·К)}.$$

8.8. Найти значение теплоемкости c_p водяного пара при p= =2 МПа и $T_{кр}=374{,}15$ °С с помощью уравнения Бертло (см. зад чу 8.7). Сравнить рассчитанное значение с табличным $c_{p,табл}$ =2,219 кДж/(кг·К), вычислив расхождение в процентах. Тепло емкость водяного пара в идеально-газовом состоянии взять и табл. 12 приложения.

Ответ: $c_p=2{,}138$ кДж/(кг·К); $\delta=3{,}6\%$.

8.9. Найти зависимость теплоемкости при постоянном объем C_v от объема при постоянной температуре, предполагая, что пов дение исследуемого вещества описывается:

1) уравнением состояния идеального газа;
2) уравнением Ван-дер-Ваальса;
3) уравнением Бертло (см. задачу 8.7).

Ответ: 1) и 2) — теплоемкость c_v от объема не зависит;

$$3)\ \left(\frac{\partial c_v}{\partial v}\right)_T=T\left(\frac{\partial^2 p}{\partial T^2}\right)_v=\frac{RT\left[2\left(\frac{\partial B}{\partial T}\right)_v+T\left(\frac{\partial^2 B}{\partial T^2}\right)_v\right]}{(v-B)^2}.$$

8.10. Давление пара (в миллиметрах ртутного столба) над тве дым и жидким аммиаком соответственно описывается следующим

авнениями:

$$\ln p_{тв}=23{,}03-\frac{3754}{T};$$

$$\ln p_{жидк}=19{,}49-\frac{3063}{T}.$$

Определить: 1) температуру тройной точки; 2) будет ли твер-ая фаза аммиака плавать в его жидкой фазе?

Ответ: 1) 195,1 К; 2) нет.

8.11. Давление паров цинка при сублимации (для интервала 75—630 К) описывается уравнением

$$\lg p=8{,}972-\frac{6{,}787}{T}.$$

Вычислить теплоту сублимации.

Решение. Предполагая, что $v_{пар}\gg v_{тв}$ и что справедливо урав-ение $v_{пар}=RT/p$, из уравнения Клапейрона—Клаузиуса получаем:

$$\lambda_{суб}=\frac{dp}{dT}\frac{RT}{p}=R\frac{dp/p}{dT/T^2}=-R\frac{d\ln p}{d(1/T)}=-2{,}303R\frac{d\lg p}{d(1/T)}.$$

Вычисляя производную $d(\lg p)/d(1/T)$ при помощи исходного равнения, находим:

$$\lambda_{суб}=\frac{2{,}303\cdot 8314\cdot 6787}{131}=934\ кДж/кг.$$

8.12. Пользуясь уравнениями задачи 8.10, рассчитать теплоты азового перехода $\lambda_{пл}$ при плавлении и r при испарении аммиака ри температуре 10°С. Предполагается, что пар следует уравнению остояния идеального газа, а объем конденсированной фазы пренебрежимо мал.

Ответ: $\lambda_{пл}=1830$ кДж/кг; $r=1230$ кДж/кг.

8.13. Определить, во сколько раз изменится объем кипящей ртути при полном переходе ее в насыщенный пар при $t=250$°С, если звестны зависимость $p_s=p(T_s)$ и теплота фазового перехода, заанные табл. 27 приложения.

Указание. Для нахождения производной dp_s/dT_s использовать ормулу

$$\left(\frac{dy}{dx}\right)_{[0]}=\frac{-2y_{-2}-y_{-1}+y_1+2y_2}{10h},$$

де h — шаг таблиц по независимому аргументу, т. е. в нашем слу-ае — по температуре.

Ответ: в 28 700 раз.

8.14. Вычислить изобарно-изотермический потенциал $\varphi_{пар}$ для кг двуокиси углерода при 0 °С и сравнить его значение со значе-ием $\varphi_{жидк}$ кипящей жидкости при этой же температуре.

Ответ: $\varphi_{пар}=349{,}3$ кДж/кг.

8.15. С помощью уравнения состояния Бертло вывести уравнение ля вычисления энтальпии как функции температуры и давления и

вычислить энтальпию бензола при $T=T_{кр}=561{,}6$ К и давлении $p=0{,}5$ МПа.

Критическое давление бензола $p_{кр}=4{,}851$ МПа. Энтальпи в идеально-газовом состоянии ($t=561{,}6$ К) равна 427 кДж/ [6].

Решение. Полный дифференциал энтальпии

$$dh=\left(\frac{\partial h}{\partial T}\right)_p dT+\left(\frac{\partial h}{\partial p}\right)_T dp.$$

Производная $(\partial h/\partial T)_p=c_p$. Производная же $(\partial h/\partial p)_T$ опред ляется из выражения термодинамического тождества $dh=Tds+vd$ согласно которому

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

Так как по уравнению Максвелла

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

то окончательно

$$dh=c_p dT-\left[T\left(\frac{\partial v}{\partial T}\right)_p-v\right]dp.$$

Уравнение состояния в вириальной форме выражается следу щим образом:

$$pv=RT+Bp.$$

Применительно к уравнению Бертло второй вириальный коэфф циент B равен:

$$B=\frac{9R}{128}\frac{T_{кр}}{p_{кр}}\left[1-6\left(\frac{T_{кр}}{T}\right)^2\right].$$

После дифференцирования, подстановки производных в уравн ние (1) и интегрирования получаем:

$$h(p,\ T)=h_0(T)+\frac{9R}{128}\frac{T_{кр}}{p_{кр}}\left[1-18\left(\frac{T_{кр}}{T}\right)^2\right]p.$$

Подставляя численные данные, находим:

$$h=419\ \text{кДж/кг}.$$

8.16. Вывести уравнение для подсчета энтальпии реального газ подчиняющегося уравнению состояния с вириальным коэффициентс

$$pv=RT+B(T)p,$$

при помощи формулы для изобарно-изотермического потенциала.

Решение. Как известно, изобарно-изотермический потенциал в ражается формулой

$$\Phi=H-TS$$

или, если имеется в виду его удельная величина,

$$\varphi=h-Ts.$$

Отсюда искомая энтальпия

$$h=\varphi+Ts.$$

Энтропию s можно выразить на основании одного из дифференциальных уравнений термодинамики:

$$s = -\left(\frac{\partial \varphi}{\partial T}\right)_p.$$

Следовательно,

$$h = \varphi - T\left(\frac{\partial \varphi}{\partial T}\right)_p. \qquad (2)$$

Таким образом, задача сводится к нахождению при помощи известного уравнения состояния значения изобарно-изотермического потенциала и его производной по температуре.

Записываем другое дифференциальное уравнение:

$$\left(\frac{\partial \varphi}{\partial p}\right)_T = v,$$

котором удельный объем v заменяем, находя его из заданного уравнения состояния:

$$\left(\frac{\partial \varphi}{\partial p}\right)_T = \frac{RT}{p} + B(T).$$

После интегрирования получаем:

$$\varphi = RT \ln p + B(T)\, p + \varphi_0(T), \qquad (3)$$

де $\varphi_0(T)$ есть постоянная интегрирования, которую находим, приближая свойства реального газа к свойствам идеального. Для этого начала находим удельный изобарно-изотермический потенциал φ^0 аза в идеальном состоянии при помощи уравнения Клапейрона

$$\left(\frac{\partial \varphi^0}{\partial p}\right)_T = \frac{RT}{p}$$

$$\varphi^0 = RT \ln p + \varphi^0{}_0(T). \qquad (4)$$

Отличие свойств реального газа от свойств идеального (поправка на «реальность») характеризуется разностью

$$\varphi - \varphi^0 = B(T)\, p + \varphi_0(T) - \varphi^0{}_0(T).$$

Эта разность стремится к нулю, когда свойства реального газа тановятся идентичными свойствам идеального, т. е. когда $p \to 0$. Следовательно,

$$\lim(\varphi - \varphi^0) = \varphi_0(T) - \varphi^0{}_0(T) = 0,$$

ткуда на основании (4) следует, что

$$\varphi_0(T) = \varphi^0{}_0(T) = \varphi^0 - RT \ln p.$$

Изобарно-изотермический потенциал φ^0 (так же как свободная нергия и энтропия) зависит не только от температуры, но и от давления. За точку начала отсчета потенциала принимают состояние аза при некотором стандартном давлении $p_{ст}$, которое для удобста расчетов считают равным единице [в таблицах термодинамических свойств газов $p_{ст} = 1$ атм (физ.)].

При этом условии

$$\varphi_0(T) = \varphi_0(p_{ст} T) - RT \ln p_{ст}.$$

Подставляя $\varphi_0(T)$ в уравнение (3), получаем:

$$\varphi = \varphi^0(T) + RT \ln \frac{p}{p_{ст}} + B(T)\, p.$$

Теперь находим производную:

$$\left(\frac{\partial \varphi}{\partial T}\right)_p = \left(\frac{\partial \varphi^0}{\partial T}\right)_p + R \ln \frac{p}{p_{ст}} + \frac{dB}{dT}\, p.$$

Подставляем найденные значения φ и $(\partial\varphi/\partial T)_p$ соответственно из (5) и (6) в исходное уравнение (2):

$$h = \varphi^0(T) + RT \ln \frac{p}{p_{ст}} + B(T)\, p - T\left[\left(\frac{\partial \varphi^0}{\partial T}\right)_p - R \ln \frac{p}{p_{ст}} - \frac{dB}{dT}\, p\right].$$

Сокращая подобные члены и учитывая, что по аналогии с ($\varphi^0(T) - T\left(\frac{\partial \varphi^0}{\partial T}\right)_p = h_0(T)$, получаем:

$$h = h_0(T) + \left[B(T) - T\left(\frac{dB}{dT}\right)\right] p.$$

В этом окончательном уравнении $h_0(T)$ есть энтальпия газа в идеальном состоянии при заданной температуре T.

8.17. Вычислить значения энтальпии водяного пара при температуре 500 °С и давлениях 0,1 и 20 МПа, пользуясь уравнением Бертло (см. задачи 8.7, 8.15 и 8.16). Сравнить вычисленные значения с табличными [4].

Энтальпию водяного пара в идеально-газовом состоянии принять по табл. 18 приложения. Теплота парообразования воды в состоянии тройной точки r=2501 кДж/кг *.

Ответ:

	0,1 МПа	20 МПа
$h_{расч}$	3489 кДж/кг	3268 кДж/кг
$h_{табл}$	3488 кДж/кг	3238 кДж/кг

8.18. Двуокись углерода при параметрах p_1=0,1 МПа и t=200 °С изотермически сжимается до p_2=0,6 МПа.

Рассчитать изменение энтальпии $\Delta h_{расч}$, пользуясь уравнением Бертло, и сравнить с табличным значением.

Ответ: $\Delta h_{расч}$=0,96 кДж/кг;

$\Delta h_{табл}$=1,8 кДж/кг.

8.19. Рассчитать изменение внутренней энергии двуокиси углерода в процессе при t=200 °С=const, если давление изменяется от p_1=0,5 МПа до p_2=5,5 МПа.

Использовать уравнение Бертло.

Ответ: $\Delta u_{расч}$=—13,6 кДж/кг.

8.20. Определить изменение энтальпии двуокиси углерода в процессе изотермического сжатия от p_1=0,5 МПа до p_2=5,5 МПа при t=200°С.

---

* При решении задачи следует помнить, что отсчет энтальпий в табл. приложения ведется от состояния при T=0 К, а отсчет энтальпий в таблицах водяного пара — практически от состояния воды (жидкости) в тройной точке

Воспользоваться уравнением Ван-дер-Ваальса.

Решение. Так как уравнение Ван-дер-Ваальса составлено в переменных T и v (давление p можно найти в явном виде в зависимости от T и v), то и дифференциальное уравнение для энтальпии следует искать в этих же переменных. Записываем его:

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

При помощи уравнения Ван-дер-Ваальса

$$\left(p + \frac{a}{v^2}\right)(v - b) = RT$$

находим нужные нам частные производные:

$$\left(\frac{\partial p}{\partial T}\right)_v = \frac{R}{v - b}; \quad \left(\frac{\partial p}{\partial v}\right)_T = -\frac{RT}{(v-b)^2} + \frac{2a}{v^3}.$$

Подставляем их в исходное уравнение:

$$\left(\frac{\partial h}{\partial v}\right)_T = -\frac{RTb}{(v-b)^2} + \frac{2a}{v^2}.$$

Интегрируя в пределах от v_1 до v_2 (эти удельные объемы соответствуют давлениям p_1=0,5 МПа и p_2=5,5 МПа при t=200 °С), получаем:

$$\Delta h = \left[\frac{RTb}{(v_1 - b)(v_2 - b)} - \frac{2a}{v_1 v_2}\right](v_1 - v_2).$$

Постоянные a и b берем из задачи 8.1 (по $p_{кр}$ и $T_{кр}$) [1]: a=190,9 Н·м⁴/кг², b=0,984·10⁻³ м³/кг. В таблицах [Л. 15] находим удельные объемы v_1=0,1780 м³/кг и v_2=0,01545 м³/кг. Все эти величины подставляем в найденное уравнение:

$$\Delta h = \left[\frac{8314 \cdot 473 \cdot 0{,}984 \cdot 10^{-3}}{(0{,}1780 - 0{,}984 \cdot 10^{-3})(0{,}01545 - 0{,}984 \cdot 10^{-3} \cdot 44} - \frac{2 \cdot 190{,}9}{0{,}1780 \cdot 0{,}01545}\right](0{,}1780 - 0{,}01545) = 22 \text{ кДж/кг}.$$

8.21. Подсчитать изменение энтропии двуокиси углерода в процессе сжатия при постоянной температуре t=200 °С от p_1=0,5 МПа до p_2=5,5 МПа. При заданных параметрах удельные объемы v_1 и v_2 соответственно равны 0,1780 и 0,01545 м³/кг.

Воспользоваться уравнением Ван-дер-Ваальса.

Решение. При помощи одного из уравнений Максвелла

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

[1] Для подсчета вандерваальсовских констант рекомендуется пользоваться именно этой парой критических параметров, так как удельный объем в критической точке определяется в опытах с меньшей точностью, чем $p_{кр}$ и $T_{кр}$.

находим Δs:

$$\Delta s = \int_{v_1}^{v_2} \left(\frac{\partial p}{\partial T}\right)_v dv.$$

Интегрируем, учитывая, что согласно уравнению Ван-дер-Ваальса $(\partial p/\partial T)_v = R/(v-b)$:

$$\Delta s = \int_{v_1}^{v_2} R\,\frac{dv}{v-b} = R \ln \frac{v_2 - b}{v_1 - b}.$$

После подстановки численных значений получаем:

$$\Delta s = -\frac{8314}{44} \cdot 2{,}303 \lg \frac{0{,}01545 - 0{,}00098}{0{,}1780 - 0{,}00098} = -0{,}479 \text{ кДж/(кг·К)}.$$

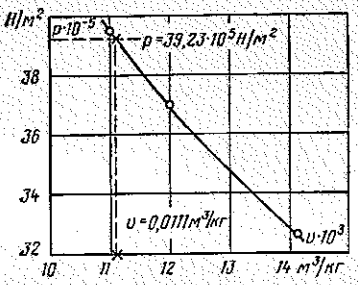


Рис. 8.1. К задаче 8.22.

8.22. В баллоне объемом $V=40$ дм³ находится двуокись углерода при $p=3{,}923$ МПа.

Определить массу газа в баллоне, если его температура равна 20 °С. Расчет произвести при помощи уравнений: 1) Клапейрона и 2) Ван-дер-Ваальса. В случае 2 использовать величины констант a и b, подсчитанные в задаче 8.1.

Определить соответствующие погрешности по сравнению с массой, вычисленной по табличному значению удельного объема $v_{табл}=0{,}01063$ м³/кг.

Решение. 1) По уравнению Клапейрона определяем удельный объем:

$$v_{кл} = \frac{8{,}314 \cdot 293}{44{,}01 \cdot 39{,}23 \cdot 10^5} = 0{,}01411 \text{ м}^3/\text{кг}.$$

Искомая масса газа

$$m_{кл} = \frac{40 \cdot 10^{-3}}{0{,}01411} = 2{,}836 \text{ кг}.$$

2) По уравнению Ван-дер-Ваальса удельный объем находим графо-аналитическим методом. Приняв в первом приближении удельный объем v равным подсчитанному по уравнению Клапейрона, определяем значения давления $p = \frac{RT}{v-b} - \frac{a}{v^2}$, приняв согласно условию $a=190{,}9$ Н·м⁴/кг², $b=0{,}000984$ м³/кг:

$$p = \frac{8{,}314 \cdot 293}{44{,}01\,(0{,}01411 - 0{,}000984)} - \frac{190{,}9}{0{,}01411^2} = 3{,}263 \text{ МПа}.$$

Мы получили значение, меньшее заданного в условиях задачи. Поэтому принимаем другое, меньшее значение v=0,01200 м³/кг и снова подсчитываем: p=3,7 МПа. Задаемся третий раз значением v=0,01100 м³/кг, тогда p=3,949 МПа.

Мы вычислили три точки изотермы t=20 °С по уравнению Ван-дер-Ваальса. Строим этот отрезок изотермы в p, v-координатах и по графику на рис. 8.1 находим нужное нам значение удельного объема v=0,0111 м³/кг. Проверка уравнения показывает, что это значение правильное.

Определяем искомую массу вещества по уравнению Ван-дер-Ваальса и по $v_{табл}$:

$$m_{В-Б} = \frac{40 \cdot 10^{-3}}{0,1110} = 3,604 \text{ кг};$$

$$m_{табл} = \frac{40 \cdot 10^{-3}}{0,01063} = 3,763 \text{ кг}.$$

Отклонения от табличного значения:

$$\delta_{Кл} = \frac{2,836 - 3,763}{3,763} \cdot 100 = -24,6\%;$$

$$\delta_{В-В} = \frac{3,604 - 3,763}{3,763} \cdot 100 = -4,2\%.$$

8.23. Определить давление водяного пара при t=400°С и v=$0,283 \cdot 10^{-2}$ м³/кг.

Расчет провести при помощи констант уравнения Ван-дер-Ваальса, вычисленных по $p_{кр}$ и $T_{кр}$ (см. задачу 8.1). Сравнить с действительным значением давления, которое при этих параметрах равно 30 МПа.

Ответ: p_1=59,4 МПа.

8.24. Значения плотности паров двуокиси углерода в зависимости от температуры и давления следующие:

p, МПа	5	10	30	35
t, °С	250	300	350	350
ρ, кг/м³	51,98	94,89	253,5	292,0

Пользуясь z, π-диаграммой (рис. 8.2), рассчитать значения удельных объемов пара двуокиси углерода для тех же давлений и температур; вычислить ошибку по сравнению с действительными значениями. Критическая температура двуокиси углерода $t_{кр}$=31,05 °С; критическое давление $p_{кр}$=7,383 МПа.

Ответ:

$$\rho_1 = 51,9;\ \rho_2 = 95,0;\ \rho_3 = 266;\ \rho_4 = 299 \text{ кг/м}^3;$$

$$\delta_1 = 0,15\%;\ \delta_2 = 0,12\%;\ \delta_3 = 1,22\%;\ \delta_4 = 2,4\%.$$

8.25. Пользуясь теорией подобия (с помощью z, π-диаграммы рис. 8.2), подсчитать значения плотности двуокиси углерода при указанных ниже параметрах и сравнить их с действительными зна-

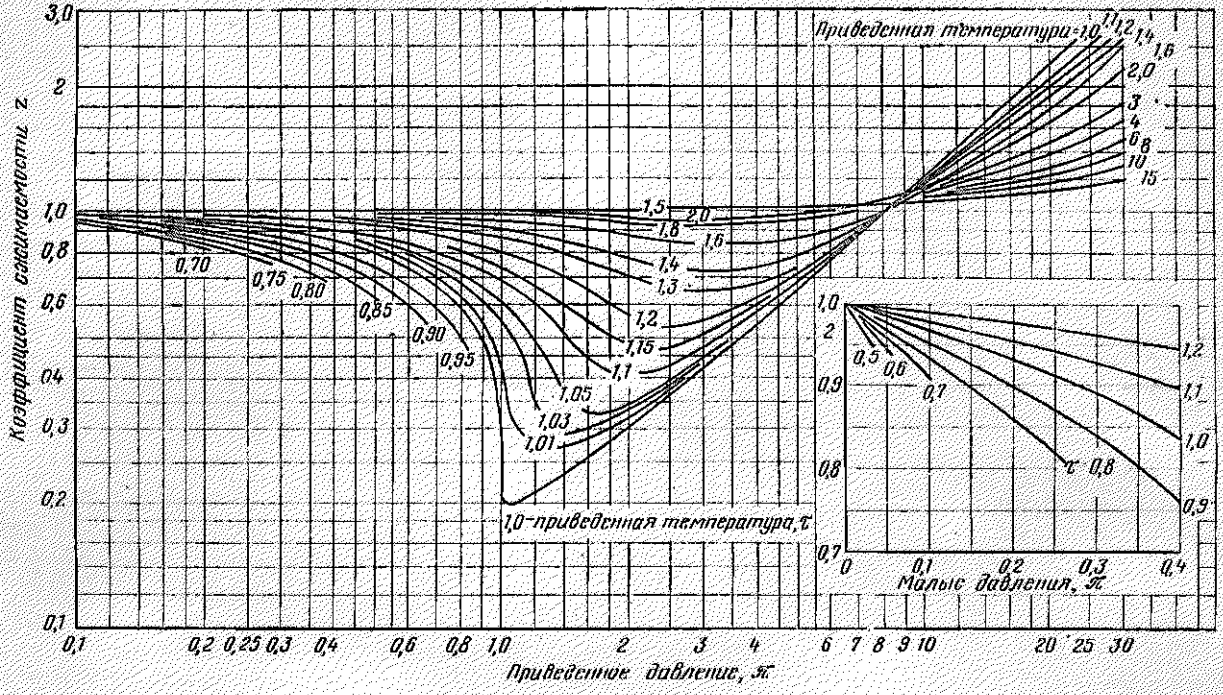


Рис. 8.2. К задачам 8.24 и 8.25.

ениями:

p, МПа	10,0	18,0	20,0
t, °С	80	100	180
ρ, кг/м³	221,9	425,6	280,9

Найти относительную ошибку.

Ответ: $\rho_1=242$; $\rho_2=250$; $\rho_3=293$ кг/м³; $\delta_1=8{,}3\%$; $\delta_2=41{,}1\%$; $\delta_3=4.6\%$.

8.26. С помощью дифференциального уравнения термодинамики

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

доказать, что внутренняя энергия идеального газа не зависит от объема.

8.27. Показать с помощью дифференциального уравнения термодинамики

$$\left(\frac{\partial c_v}{\partial v}\right)_T = T\left(\frac{\partial^2 p}{\partial T^2}\right)_v,$$

что теплоемкость c_v идеального газа не зависит от объема.

8.28. Показать, что теплоемкость c_v для реального газа, подчиняющегося уравнению Ван-дер-Ваальса, не зависит от объема.

8.29. С помощью уравнения Ван-дер-Ваальса определить производную $(\partial u/\partial v)_T$ и выяснить ее физический смысл.

Ответ: $(\partial u/\partial v)_T = a/v^2$, т. е. равна внутреннему молекулярному давлению вандерваальсовского газа.

8.30. Вывести формулу для теплоемкости c_v газа, подчиняющегося уравнению Бертло.

Ответ:

$$c_v = c_{v,\infty}(T) + \frac{2a}{vT^2}.$$

8.31. Определить значения постоянных a и b уравнения состояния Дитеричи $p = \dfrac{RT}{v-b}\, e^{-\frac{a}{RTv}}$ и представить его в приведенной форме.

Ответ:

$$a = \frac{4R^2T_{кр}^2}{p_{кр}^3};$$

$$b = \frac{RT}{p_{кр}e^2};\quad \pi = \frac{\tau}{\omega - \dfrac{1}{e^2}}\, e^{-\frac{4}{\tau\omega e^2}}.$$

8.32. При обработке экспериментальных данных термодинамических свойств большого числа веществ было установлено, что с достаточной для многих практических расчетов точностью удовлетворяется следующая функциональная зависимость:

$$v = f(\pi,\ \tau,\ z_{кр}),$$

где v — удельный объем вещества; $\pi=p/p_{кр}$ — приведенное давление; $\tau=T/T_{кр}$ — приведенная температура; $z_{кр}=\frac{p_{кр}v_{кр}}{RT_{кр}}$ — критический коэффициент сжимаемости.

В зависимости от значения $z_{кр}$ вещества можно разбить на следующие группы:

I) $z_{кр}=0{,}24\div0{,}26$;
II) $z_{кр}=0{,}26\div0{,}28$;
III) $z_{кр}=0{,}28\div0{,}30$;
IV) $z_{кр}\leqslant0{,}23$ (группа воды).

Вещества, принадлежащие к одной из этих групп, термодинамически подобны, находятся в соответственных состояниях и подчиняются уравнению состояния

$$\omega=\omega(\pi, \tau),$$

свойственному данной группе. В этой функциональной зависимости $\omega=v/v_{кр}$ есть приведенный удельный объем, равный обратной величине приведенной плотности.

В табл. 25 приложения приведены значения приведенных плотностей (в зависимости от π и τ) для всех четырех групп.

Рассчитать удельный объем v'_{250} жидкого четыреххлористого углерода при температуре насыщения $t_s=250$°С, если известно, что при $p=0{,}9807$ МПа четыреххлористый углерод имеет температуру насыщения, равную 77 °С, и удельный объем $v'=0{,}001276$ м³/кг.

Экспериментальное значение $v'_{250}=0{,}00190$ м³/кг.

Критические параметры четыреххлористого углерода следующие: $p_{кр}=4{,}5602$ МПа, $T_{кр}=283{,}2$ °С и $v_{кр}=0{,}00179$ м³/кг.

Решение. Находим критический коэффициент сжимаемости:

$$z_{кр}=\frac{p_{кр}v_{кр}}{RT_{кр}}=\frac{45{,}602\cdot0{,}00179\cdot154\cdot10^5}{8314\cdot556{,}4}=0{,}272.$$

Как видно, четыреххлористый углерод относится ко второй группе веществ.

Находим для $t_s=250$ °С:

$$\tau_{s,\,250}=\frac{T}{T_{кр}}=\frac{250+273{,}15}{283+273{,}15}=0{,}940.$$

По табл. 25 приложения определяем приведенную плотность $1/\omega'_{250}=1{,}797$. Аналогично находим приведенную плотность $1/\omega_{77}$ для $t_s=77$ °С:

$$\tau_{s,\,77}=\frac{77+273{,}15}{283+273{,}15}=0{,}629;\quad\frac{1}{\omega'_{77}}=2{,}688.$$

Так как удельные объемы пропорциональны приведенным объемам, то искомый удельный объем

$$v'_{250}=v'_{77}\frac{\omega'_{250}}{\omega'_{77}}=\frac{0{,}001276\cdot2{,}688}{1{,}797}=0{,}0191\ \text{м}^3/\text{кг}.$$

Таким образом, ошибка в расчете по сравнению с экспериментальным значением составляет всего 0,5%.

8.33. Рассчитать, пользуясь таблицами приведенных плотностей (табл. 25 приложения), удельный объем паров этилового спирта при температуре 200°С и давлении 14,711 МПа, если известно, что при

этом же давлении и температуре 150 °С удельный объем v=0,01448 м³/кг. По экспериментальным данным, v_{200}=0,01622 м³/кг. Критические параметры: $p_{кр}$=7,110 МПа; $t_{кр}$=250,8 °С; $v_{кр}$=0,00363 м³/кг.

Определить погрешность в расчете.

Ответ: v_{200}=0,01652 м³/кг; δ=1,8%.

8.34. Рассчитать удельный объем жидкого аммиака в состоянии насыщения при t=50°С, пользуясь табл. 25 приложения.

Известно, что при p=0,615 МПа температура насыщения равна 10 °С, а v'=0,0016 м³/кг. Сравнить расчетное значение с табличными данными, по которым v'=0,00177 м³/кг.

Критические параметры: $T_{кр}$=405,5 К; $v_{кр}$=0,00426 м³/кг; $p_{кр}$=10,934 МПа.

Ответ: v'_{50}=0,00176 м³/кг; δ=0,6%.

8.35. При помощи уравнения Клапейрона—Клаузиуса определить теплоту парообразования r водяного пара при t=210 °С и сравнить ее с табличным значением $r_{табл}$=1900 кДж/кг. Производную dp/dT найти приближенно методом конечных разностей (см. задачу 8.13) на основании следующей зависимости давления насыщения от температуры насыщения:

t_s, °С	208	209	210	211	212
p_s, МПа	1,833	1,871	1,909	1,947	1,987

Ответ: r=1900 кДж/кг.

8.36. Уравнение состояния для 1 кг идеального ассоциированного газа[1] имеет следующий вид:

$$pv = RT\left(1 - \frac{pC}{T^{\frac{5+2m}{2}}}\right),$$

где R — газовая постоянная, отнесенная к 1 кг; m — число «потерянных вращений», величина постоянная; C — постоянная величина.

Воспользовавшись этим уравнением, вывести выражение для разности теплоемкостей c_p—c_v.

Ответ:

$$c_p = c_v = R\left(1 + \frac{3+2m}{2}\,\frac{pC}{T^{\frac{5+2m}{2}}}\right)^2.$$

8.37. Пользуясь обобщенными таблицами коэффициента сжимаемости (табл. 26 приложения), вычислить значение удельного объема водяного пара при t=600 °С и p=29,5 МПа.

Решение. Определяем приведенные параметры:

$$\pi = \frac{p}{p_{кр}} = \frac{295}{221,3} = 1,329;$$

$$\tau = \frac{T}{T_{кр}} = \frac{873,15}{647,30} = 1,349.$$

---

[1] Идеальный ассоциированный газ — это газ, у которого вандерваальсовское взаимодействие между молекулами приводит к образованию комплексов молекул в результате их ассоциации. Поэтому в уравнении состояния такого газа отсутствуют поправки на p и v. Уравнение выведено М. П. Вукаловичем и И. И. Новиковым в предположении, что при ассоциации образуются только двойные комплексы.

Искомое значение z для заданных значений π и τ в таблицах обобщенных свойств веществ (группа z=0,23) отсутствует. Оно должно быть найдено интерполяцией.

Необходимая для решения задачи часть таблицы имеет следующий вид:

τ	$\pi=1{,}300$	$\pi=1{,}350$	$\pi=1{,}400$
1,300	0,827	0,821	0,808
1,400	0,874	0,869	0,859
1,500	0,907	0,903	0,894

В этой таблице находим для π=1,333 и τ=1,349 значение z=0,849. Так как $z=pv/RT$, то $v=zRT/p$. Отсюда

$$v=\frac{0{,}851\cdot 8314\cdot 873{,}15}{18{,}016\cdot 295\cdot 10^5}=0{,}01162 \text{ м}^3/\text{кг}.$$

Табличное значение по [4]: $v_{\text{табл}}$=0,01167 м³/кг. Расхождение δ=0,4%.

8.38. Найти значение плотности двуокиси углерода при p=10 МПа и t=122,31 °С и оценить полученную ошибку. Воспользоваться таблицами для $z_{\text{кр}}$=0,23.

Ответ: $\rho_{\text{расч}}$=166,15 кг/м³; $\rho_{\text{табл}}$=165,49 кг/м³; δ=0,4%.

8.39. Найти коэффициент сжимаемости водяного пара на верхней пограничной кривой при температуре t_s=344,72 °С. Сравнить ее с табличным значением.

Ответ: $z_{\text{расч}}$=0,548; $z_{\text{табл}}$=0,534; δ=2,6%.

8.40. Найти значение давления, создаваемого в сосуде объемом 30 дм³ водой в количестве 2,57 кг при температуре 600 °С.

Решение: Определяем приведенную температуру:

$$\tau=\frac{T}{T_{\text{кр}}}=\frac{873{,}15}{647{,}30}=1{,}349.$$

Удельный объем

$$v=\frac{V}{m}=\frac{0{,}030}{2{,}57}=0{,}01167 \text{ м}^3/\text{кг}.$$

Выражаем коэффициент сжимаемости в функции приведенного давления π:

$$z=\frac{pv}{RT}=\frac{p_{\text{кр}}v}{RT}\pi.$$

Отсюда

$$z=\frac{221{,}29\cdot 10^5\cdot 0{,}01167\cdot 18{,}016}{8314\cdot 873{,}15}=0{,}641\,\pi.$$

Это уравнение представляет собой уравнение с двумя неизвестными и для нахождения давления в сосуде или, что одно и то же, приведенного давления π необходимо иметь второе уравнение. Таким уравнением является зависимость $z=z(\pi)$ при заданной температуре. Проще всего решение находить графически.

В табл. 26 приложения, интерполируя, находим $z=z(\pi)$ для τ=1,349.

Графическое решение приведено на рис. 8.3. На графике находим $\pi=1{,}325$, тогда искомое давление $p=29{,}321$ МПа.

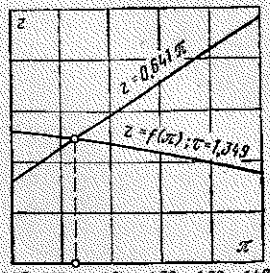


Рис. 8.3. К задаче 8.40.

По табл. [4] при $v=0{,}1167$ м³/кг и $t=600$ °С находим $p_{табл}=29{,}5$ МПа. Таким образом, расхождение между табличным и расчетным значениями давления $\delta=0{,}4\%$.

8.41. Определить удельный объем воды при $p_2=10$ МПа и $t_2=180$ °С, учитывая, что при $p_1=25$ МПа и $t_1=50$ °С он известен ($v_1=0{,}0010110$ м³/кг). Сравнить рассчитанное значение с табличным.

Указание. Использовать соотношение $v_2/v_1=\omega_2/\omega_1$, т. е. условие, что объемы вещества при разных параметрах пропорциональны их приведенным объемам при тех же приведенных параметрах.

Ответ: $v_2=0{,}0011205$ м³/кг; $v_{табл}=0{,}0011201$ м³/кг; $\delta=0{,}04\%$.

8.42. Плотность жидкого этилпропионата при 20 °С и 0,1 МПа равна 891 кг/м³, молекулярная масса $\mu=102$.

Определить плотность жидкости при:

1) $p_1=3{,}0$ МПа и $t_1=146$ °С;

2) $p_2=p_s$ и $t_2=247$ °С.

Критические параметры: $p_{кр}=3{,}214$ МПа; $T_{кр}=546$ К и $v_{кр}=0{,}00338$ м³/кг.

Ответ: 1) $\rho_1=746$ кг/м³ при $t_1=146$ °С;

2) $\rho_2=492$ кг/м³ при $t_2=247$ °С;

$\rho_{табл}=490$ кг/м³ при $t=247$ °С;

$\delta=0{,}4\%$.

8.43. Определить при помощи таблиц $z=f(\pi, \tau)$ (табл. 26 приложения) количество водяного пара, заключенного в сосуде объемом 30 дм³, если температура пара $t=600$ °С, а давление $p=29{,}5$ МПа.

Ответ: 2,57 кг.

8.44. Определить температуру водяного пара, заключенного в сосуд объемом $V=0{,}030$ м³ при $p=29{,}5$ МПа. Масса водяного пара $m=2{,}57$ кг.

Сравнить результат с табличным значением.

Решение.

$$\pi=\frac{p}{p_{кр}}=1{,}329;\quad z=\frac{pv}{RT}=\frac{pv}{RT_{кр}\tau}=\frac{295\cdot10^6\cdot0{,}01167\cdot18{,}016}{8314\cdot647{,}30\tau}=\frac{1{,}144}{\tau}.$$

Задача сводится к графическому решению системы двух уравнений

$$\begin{cases} z(\pi)=f(\tau); \\ z=\dfrac{1{,}144}{\tau}. \end{cases}$$

Решение показано на рис. 8.4. По графику $\tau=1{,}353$. Тогда $T=647{,}30\cdot1{,}353=871$ К.

Ответ: $t=598$ °С; по табл. [4] $t_{табл}=600$ °С;

$\delta=0{,}3\%$.

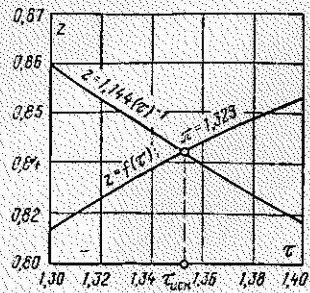


Рис. 8.4. К задаче 8.44.

8.45. Вычислить работу 1 кг газа, подчиняющегося уравнению состояния Ван-дер-Ваальса. Процесс протекает при T=const.

Ответ:

$$l = RT \ln \frac{v_2 - b}{v_1 - b} - a\left(\frac{1}{v_2} - \frac{1}{v_1}\right).$$

8.46. Вычислить работу, совершаемую 5 кг водяного пара в процессе p=const, если его температура изменяется от t_1=115,3 °С до t_2=517,8 °С. Давление пара равно критическому.

При решении задачи воспользоваться таблицами обобщенных свойств веществ.

Ответ: L=930 кДж.

8.47. Определить изменение энтропии и теплоту парообразования водяного пара при p=18 МПа. Воспользоваться табл. 26 приложения.

Ответ: Δs=1,256 кДж/(кг·К); r=789 кДж/кг.

8.48. Определить энтальпию водяного пара при p=29,5 МПа и t=635°С. Энтальпия пара в идеально-газовом состоянии h_0=3790 кДж/кг. Воспользоваться табл. 26 приложения. Сравнить рассчитанное значение энтальпии с табличным.

Ответ. $h_{расч}$=3568 кДж/кг; $h_{табл}$=3560 кДж/кг.

8.49. Вычислить коэффициент сжимаемости $z=pv/RT$ для аргона при p=0,5 МПа и t=15 °С, принимая, что молекулы газа взаимодействуют согласно потенциалу Леннарда—Джонса (потенциалу «6—12»).

Силовые постоянные потенциала Леннарда—Джонса („6—12“)

Газ	ε/k, К	σ, нм	b_0, см³/моль
Ar	119,8	0,3405	49,80
O_2	118,0	0,346	52,26

Приведенные вириальные коэффициенты

T^*	B^*	B^*_1	B^*_2	$B^*_1 - B^*_2$
2,30	—0,41967671	1,3552188	—3,12974	1,7749
2,40	—0,36357566	1,2819016	—2,95401	1,6455
2,50	—0,31261340	1,2155320	—2,79614	1,5281
.	.	.	.	.
.	.	.	.	.
.	.	.	.	.
4,30	0,16106381	0,6017352	—1,39234	0,44067
4,40	0,17469039	0,5838082	—1,35291	0,40912

Необходимые для расчета таблицы силовых постоянных потенциала Леннарда — Джонса и приведенных вириальных коэффициентов приведены на с. 78.

Здесь

$$B^*(T^*) = \frac{B(T)}{b_0}; \quad T^* = \frac{kT}{\varepsilon}; \quad B^*_1 - B^* = \frac{\mu c_p}{b_0};$$

$$B^*_1 = T^*\left(\frac{dB^*}{dT}\right); \quad B^*_2 = T^*\left(\frac{d^2B^*}{dT^{*2}}\right).$$

Решение. Из таблицы получаем следующие данные для аргона: ε/k=119,8 К, b_0=0,001245 м³/кг.

Здесь $b_0 = \frac{2}{3}\pi N_A \sigma^3_A$; N — число Авогадро; σ — диаметр столкновения.

Далее находим T=15+273,15=288,15 К и приведенную температуру $T^*=kT/\varepsilon$=288,15/119,8=2,406.

Соответствующее значение приведенного вириального коэффициента B^* определяется при помощи таблицы как функция T^*. Оно оказывается равным — 0,3605.

Подсчитываем вириальный коэффициент:

$$B=b_0B^*=0{,}001245(-0{,}3605)=-0{,}0004482 \text{ м}^3/\text{кг}.$$

Второй вириальный коэффициент ряда по степеням давления выражается через коэффициент ряда по степеням плотности следующим образом:

$$B' = \frac{B}{RT} = \frac{0{,}4482\cdot10^{-3}\cdot40}{8314\cdot288{,}15} = -7{,}50\cdot10^{-9} \text{ м}^2/\text{Н}.$$

Коэффициент сжимаемости

$$z = \frac{pv}{RT} = 1 + B'p + \ldots = 1 - 7{,}50\cdot10^{-9}\cdot5\cdot10^5 = 0{,}9963.$$

8.50. Вычислить коэффициент сжимаемости z для аргона при t=250 °С и p=0,5 МПа при помощи таблиц, приведенных в условиях задачи 8.49.

Ответ: z=1,0010.

8.51. Рассчитать удельный объем кислорода при p=2 МПа и t=15 °С. Расчет провести: 1) пользуясь уравнением состояния идеального газа и 2) предполагая, что молекула кислорода взаимодействует в соответствии с потенциалом Леннарда — Джонса. Принять во внимание таблицы в условиях задачи 8.49.

Ответ: 1) v=0,0374 м³/кг; 2) v=0,0372 м³/кг.

8.52. Подсчитать дифференциальный температурный эффект адиабатного дросселирования аргона при t=15°С. Воспользоваться обобщенными значениями второго вириального коэффициента (см. задачу 8.49).

Ответ: α_h=0,393 К/Па.

8.53. Определить разницу между дифференциальным диабатным дроссель-эффектом и температурным эффектом адиабатного расширения для кислорода при критической температуре и давлении 0,5 МПа. Воспользоваться уравнением состояния Бертло. Принять $c_p=c_{p0}$=const.

Ответ: 0,0852 К/Па.

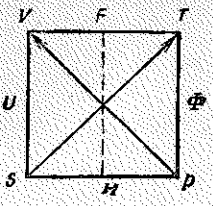


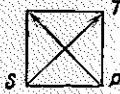
Рис. 8.5. К задачам 8.54, 8.55, 8.56.

8.54. Часто встречающиеся в термодинамических расчетах уравнения Максвелла легко запоминаются при помощи простой мнемонической диаграммы [1].

Она представляет собой квадрат (рис. 8.5) с двумя стрелками в виде диагоналей. Стороны квадрата обозначены символами потенциалов F, Φ, H и U, причем символ свободной энергии записывается сверху. Углы квадрата обозначены соответствующими экстенсивными величинами, являющимися «естественными» переменными потенциала. Например, для свободной энергии F такими величинами являются объем V и абсолютная температура T.

Уравнение Максвелла легко читается при помощи диаграммы.

Пусть нужно определить, например, чему равна производная $(\partial v/\partial s)_p$. На квадрате производная $(\partial v/\partial s)_p$ соответствует изображение

, соответствующее же этой производной выражение лежит на противоположной стороне квадрата 

т. е. представляет собой производную $(\partial T/\partial p)_s$. Следовательно, $(\partial v/\partial s)_p=(\partial T/\partial p)_s$.

Так как стрелки квадрата симметричны относительно воображаемой линии, разделяющей производные (в данном случае вертикальной), то обе производные положительны. В случае отсутствия симметрии знаки у производных будут разными.

Определить, чему равна производная $(\partial p/\partial s)_v$.

Решение. На рис. 8.5 видно, что производная $(\partial p/\partial s)_v$ соответствует $(\partial T/\partial v)_s$. Так как стрелки не симметричны относительно воображаемой линии, разделяющей производные, то они будут иметь разные знаки, т. е.

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

8.55. Написать соотношения Максвелла для независимых переменных v и T, p и T.

Воспользоваться мнемоническим квадратом.

Ответ:

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

[1] Диаграмма была предложена Максом Борном в 1929 г. и впервые опубликована в J. Chem. Phys., 3,29 (1935).

8.56. Представить изобарно-изотермический потенциал через дифференциалы его естественных переменных.

Указание. Задача легко решается при помощи мнемонического квадрата (рис. 8.5). Стрелки, направленные от переменной, обозначают, что она должна быть взята со знаком $+$, и наоборот.

Ответ: $d\Phi = vdp - sdT$.

8.57. Написать дифференциалы u, h, F в функции их естественных переменных.

Воспользоваться мнемоническим квадратом.

Глава девятая

СВОЙСТВА ВОДЫ И ВОДЯНОГО ПАРА; ПРОЦЕССЫ ИЗМЕНЕНИЯ ЕГО СОСТОЯНИЯ

9.1. Состояние воды определяется параметрами:

1) $p = 6{,}0$ МПа; $t = 320$ °С;
2) $p = 0{,}4$ МПа; $v = 0{,}015$ м³/кг;
3) $t = 170$ °С; $v = 0{,}00105$ м³/кг;
4) $p = 18{,}2$ МПа; $t = 357{,}87$ °С.

Каковы качественно эти состояния (жидкость, кипящая жидкость, влажный пар, сухой насыщенный пар, перегретый пар)?

Ответ: 1) перегретый пар; 2) влажный пар; 3) жидкость; 4) состояние неопределенно: кипящая жидкость, влажный пар с любой степенью сухости или сухой насыщенный пар.

9.2. Состояние водяного пара задано следующими параметрами: $p = 8{,}5$ МПа и $\rho = 0{,}120$ г/см³.

Определить температуру, внутреннюю энергию, энтальпию и энтропию 1 кг пара.

Ответ: $t = 299{,}24$ °С; $u = 1746$ кДж/кг;
$h = 1817$ кДж/кг; $s = 4{,}080$ кДж/(кг·К).

9.3. В сосуде объемом $V = 0{,}035$ м³ содержится 0,1 кг водяного пара при $p = 0{,}6$ МПа/м².

Определить внутреннюю энергию пара.

Ответ: $U = 263$ кДж.

9.4. В трубе течет водяной пар при давлении $p = 2$ МПа и степени сухости $x = 0{,}96$ со скоростью $w = 40$ м/с. Расход пара $m = 5000$ кг/ч.

Определить внутренний диаметр трубы.

Ответ: $d = 65$ мм.

9.5. В сосуде объемом $V = 500$ см³ находится в равновесии смесь сухого насыщенного пара и кипящей воды общей массой $m = 0{,}05$ кг. Температура внутри сосуда $t = 310$ °С.

Найти степень сухости смеси.

Ответ: $x = 50{,}7\%$.

9.6. В барабане котельного агрегата находится кипящая вода и над ней водяной пар под давлением $p = 9$ МПа. Масса воды $m = 5000$ кг. Объем барабана $V = 8$ см³.

Какова масса пара, находящегося над зеркалом испарения, если пар считать сухим насыщенным?

Ответ: $m_п = 45$ кг.

9.7. В сосуде находится влажный пар. Его масса $m = 100$ кг и параметры $t_1 = 220$ °С, $x_1 = 0{,}64$.

В сосуде отсепарировано и удалено 20 кг воды, причем давление все время поддерживалось постоянным.

Определить параметры (p, v, h, s) оставшегося в сосуде пара.

Ответ: p=2,3201 МПа; v=0,06909 м³/кг;

$$h=2430{,}3 \text{ кДж/кг}; \quad s=5{,}5315 \text{ кДж/(кг·К)}.$$

9.8. При постоянном давлении смешиваются две порции водяного пара. Масса пара первой порции m=200 кг, его параметры p_1=1,0 МПа, x_1=0,85. Масса пара второй порции m_2=80 кг, его параметры $p_2=p_1$ и x_2=0,10.

Определить степень сухости пара в образовавшейся смеси и его полную энтальпию.

Ответ: x=0,636, H=572 МДж.

9.9. В резервуаре объемом 5 м³ находится влажный пар со степенью сухости x=0,3.

Определить массу влажного пара, объем, занимаемый водой, и объем, занимаемый сухим насыщенным паром. Давление в резервуаре p=19,0 МПа.

Ответ: m=1,464 кг; $V_п$=2,999 м³; $V_в$=2,001 м³.

9.10. Определить объем резервуара, заполненного влажным паром со степенью сухости x=0,65, если масса пара m=160 кг, а температура в резервуаре t=280 °С.

Ответ: V=3,21 м³.

9.11. Вакуумметр, установленный на конденсаторе паровой турбины, показывает разрежение $p_{вак}$=720 мм рт. ст., а ртутный барометр, находящийся в машинном зале, — давление $B=0{,}998\cdot10^5$ Н/м².

Определить объем поступающего в конденсатор пара со степенью сухости x=0,872 в течение 1 с, если расход пара, проходящего через установку, D=540 т/ч. Во сколько раз объем пара превышает объем конденсата?

Ответ: $V_п$=4797 м³/с; $V_п/V_к$=31 860.

9.12. По существующему международному соглашению[1] внутренняя энергия и энтропия воды приняты равными нулю при параметрах тройной точки.

Определить значение энтальпии воды в тройной точке, для которой параметры имеют следующие значения: $p_{тр}$=610,8 Па; $t_{тр}$=0,01 °С; $v_{тр.т}$=0,0010002 м³/кг.

Ответ: $h_{тр.т}$=0,0006109 кДж/кг.

9.13. Найти в общем виде разность между значением энтальпии жидкости на нижней пограничной кривой $h'=h'(p)$ и теплотой q'_p, которую нужно подвести к 1 кг воды, чтобы нагреть ее при постоянном давлении от температуры в тройной точке $t_{тр}$ до температуры насыщения t_s.

Вычислить значение этой разности для давлений 2,0 и 20,0 МПа. Определить, какую долю в процентах составляет искомая разность от значения h'.

Решение. Полный дифференциал энтальпии h равен:

$$dh = c_p dt + \left(\frac{\partial h}{\partial p}\right)_T dp.$$

---

[1] Достигнуто на V Международной конференции по свойствам водяного пара (Лондон, 1956 г.).

следовательно,

$$h - h_0 = \int_{t_0}^{t} c_p dt + \int_{p_0}^{p} \left(\frac{\partial h}{\partial p}\right)_t dp.$$

В состоянии тройной точки энтальпия воды практически равна нулю (см. задачу 9.12), поэтому без ощутимой ошибки началом отсчета энтальпии воды и водяного пара можно, так же как и для внутренней энергии, считать состояние воды при $p_{тр}$ и $t_{тр}$, т. е. положить, что $h_0 = h_{тр} \approx 0$. При этом оказывается, что энтальпия кипящей жидкости

$$h' = \int_{t_{тр.т}}^{t_s} c_p dt + \int_{p_{тр.т}}^{p} \left(\frac{\partial h}{\partial p}\right)_{t=t_{тр}} dp.$$

В этом выражении первый интеграл представляет собой величину q'_p, а второй равен величине энтальпии жидкости при температуре $t = t_{тр.т}$ и давлении p (рис. 9.1). Значит $h' = q'_p = h(p,$

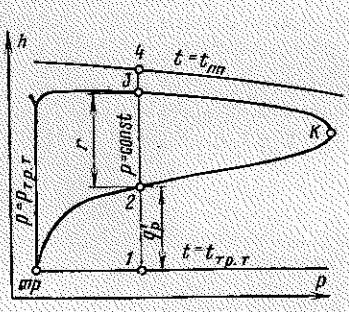


Рис. 9.1. К задаче 9.13.

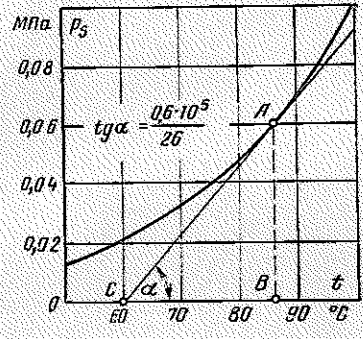


Рис. 9.2. К задаче 9.17.

$t_{тр.т}$). Допуская очень малую ошибку, можно принять, что $t_{тр.т} = 0{,}01 \approx 0$ °С. Тогда искомая в задаче разность находится прямо из таблиц при $t = 0$ °С и различных давлениях.

В таблицах находим: при $p = 0{,}2$ МПа значение $h' - q'_p = 2{,}0$ кДж/кг, что составляет от $h' = 908{,}5$ кДж/кг всего лишь 0,2%. При $p = 2{,}0$ МПа искомая разность равна 20,1 кДж/кг, т. е. 1,1% значения $h' = 1828{,}8$ кДж/кг.

Таким образом, при невысоких давлениях приближенно можно считать, что $h' \approx q'_p$.

9.14. Пользуясь таблицами, определить значения разности между энтальпией и внутренней энергией на нижней пограничной кривой при давлениях 2,0 и 20,0 МПа.

Какой процент составляет эта разность от значения h'?

Ответ: при $p = 2{,}0$ МПа $h' - u' = 1{,}98$ кДж/кг, или 0,22% h'; при $p = 20{,}0$ МПа $h' - u' = 40{,}76$ кДж/кг, или 2,22% h'.

9.15. Влажный пар из турбины поступает в конденсатор со степенью сухости 0,88 при давлении $p_2 = 0{,}004$ МПа.

Определить расход охлаждающей воды на 1 кг поступающего пара, если вода нагревается на 10°С, а температура конденсата на 3 °С меньше температуры насыщения?

Ответ: $m_в \approx 51$ кг.

9.16. При помощи h, s-диаграммы определить теплоту парообразования r при абсолютном давлении p=2,0 МПа. Сравнить результат с табличным значением.

Указание. На изобаре 2,0 МПа выбрать точку, отвечающую некоторой произвольной степени сухости x.

Для этого состояния выразить энтальпию влажного пара h_x через r и h''. Значения h_x и h'' определить по h, s-диаграмме.

9.17. Из опыта получена зависимость $p_s = f(t_s)$ между давлением и температурой насыщения водяного пара, которая описывается кривой (рис. 9.2). Найти графо-аналитическим методом теплоту парообразования r при p_s=0,06 МПа. Сравнить полученные данные с табличными.

Решение. Из уравнения Клапейрона — Клаузиуса следует, что

$$r = \frac{dp_s}{dt_s} T_s (v'' - v').$$

Величину dp_s/dt_s находим графически, построив касательную к кривой $p_s = f(t_s)$ в точке, для которой p_s=0,06 МПа.

Очевидно, что $\frac{dp_s}{dt_s} = \operatorname{tg}\alpha = \frac{\text{отрезок } AB}{\text{отрезок } AC} = \frac{0{,}06\,\text{МПа}}{26\,\text{К}}$. По графику определяем значение T_s=86+273=359 К. Значение v'' подсчитываем приближенно по уравнению Клапейрона — Клаузиуса (ошибка при этом для такого малого давления составляет примерно 0,7%):

$$v'' = \frac{8314 \cdot 359}{18{,}016 \cdot 0{,}6 \cdot 10^5} = 2{,}76 \text{ м}^3/\text{кг}.$$

Значением v' можно пренебречь, так как удельный объем воды приблизительно равен 0,001 м³/кг, а это составляет всего лишь 6% погрешности определения v''.

Таким образом,

$$r = \frac{0{,}6 \cdot 10^5 \cdot 359 \cdot 2{,}76}{26 \cdot 10^3} = 2290 \text{ кДж/кг}.$$

По таблицам при p=0,06 МПа и r=2293 кДж/кг ошибка в определении r δ=0,13%.

9.18. Каково значение перегрева $\Delta T_{пер}$ воды, окружающей пузырек пара, образовавшегося на нагреваемой стенке сосуда, если давление на свободную поверхность воды p=0,1 МПа, высота уровня h=300 мм и радиус кривизны пузырька r=0,005 мм (рис. 9.3)? Коэффициент поверхностного натяжения, Н/м, на границах поверхностей вода — пар в пузырьке можно подсчитать по эмпирической формуле Бачинского

$$\sigma = 0{,}0697 \left(\frac{\rho' - \rho''}{1000} \right),$$

в которой ρ' и ρ'', кг/м³, — соответственно плотности жидкости и сухого насыщенного пара.

Ответ: $\Delta T_{пер}$=6,6 К.

9.19. На абсолютно несмачиваемой поверхности происходит капельная конденсация насыщенного водяного пара, имеющего температуру $t=200$ °С.

Определить давление внутри капли радиуса $r=0{,}01$ мм, если коэффициент поверхностного натяжения на границе вода — пар $\sigma=0{,}03773$ Н/м.

Ответ: 1,563 МПа.

9.20. Для исследования термодинамических свойств веществ на линии насыщения применяется калориметр, устроенный по следующему принципу (рис. 9.4). Адиабатически изолированный сосуд, в котором в равновесии находятся кипящая жидкость и над нею сухой насыщенный пар, снабжен пароотводной трубкой с вентилем *1*

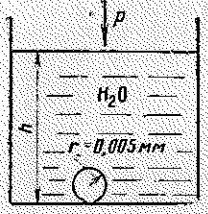


Рис. 9.3. К задаче 9.18.

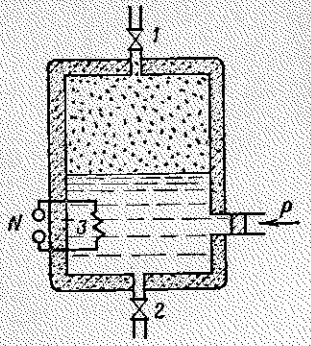


Рис. 9.4. К задаче 9.20.

водоотводной трубкой с вентилем *2*. Открывая нужные вентили, можно выпускать из сосуда либо сухой насыщенный пар, либо кипящую воду. Давление $p=p_s$ в калориметре все время поддерживается постоянным. Для сохранения равновесного состояния к системе подводят энергию. Эта энергия, сообщаемая нагревателем *3*, расходуется на испарение некоторого количества жидкости.

Какова мощность N на клеммах нагревателя, установленного в калориметре, если исследуемое вещество — вода и при закрытом вентиле *1* из калориметра за время $\tau=10$ мин удаляется $m=0{,}8$ кг жидкой кипящей воды?

Абсолютное давление в калориметре $p=2$ МПа.

Решение. Количество воды, испаренной во время опыта, не равно количеству воды, выпущенной из калориметра. Действительно, если из калориметра удаляется m, кг, воды, то высвобождается mv', м³, пространства. Для сохранения первоначального состояния необходимо это пространство заполнить сухим насыщенным паром, количество которого должно быть равным mv'/v'', кг. Если бы это количество пара вводилось в освободившийся объем извне, равновесие системы не было бы нарушено. Но по условию опыта этот пар должен быть получен за счет теплоты, сообщенной нагревателем, путем испарения mv'/v'', кг, жидкости, находящейся в калориметре. Когда это количество воды полностью испаряется, высвобождается новый объем, равный $(mv'/v'')v'$, м³. Его снова нужно заполнить путем испарения новой порции воды, равной

$(mv'/v'')(v'/v'')$, кг. При этом высвобождается объем, котор опять-таки нужно заполнить, и т. д.

Очевидно, что полное количество испаренной за время опы воды

$$m_{\text{исп}} = \frac{mv'}{v''} + m\left(\frac{v'}{v''}\right)^2 + m\left(\frac{v'}{v''}\right)^3 + \ldots + m\left(\frac{v'}{v''}\right)^n =$$

$$= m\left[\frac{v'}{v''} + \left(\frac{v'}{v''}\right)^2 + \left(\frac{v'}{v''}\right)^3 + \ldots + \left(\frac{v'}{v''}\right)^n\right],$$

где $n \longrightarrow \infty$.

Выражение, заключенное в квадратные скобки, представля собой убывающую прогрессию, у которой первый член $a=v'/v''$ равен знаменателю прогрессии $q=v'/v''$. Предел суммы членов так прогрессии при $n \longrightarrow \infty$:

$$\frac{a}{1-q} = \frac{\frac{v'}{v''}}{1-\frac{v'}{v''}} = \frac{v'}{v''-v'}.$$

Таким образом, за время τ опыта при выпуске m, кг, жидк кипящей воды необходимо испарять $m_{\text{исп}}$, кг, воды: $m_{\text{исп}} = m[v'/(v''-v')]$. При этом равновесие системы сохранится. Ве чина $v'/(v''-v')$ представляет количество жидкости, которое в ц лях сохранения равновесия нужно испарить, если во время опы удаляется 1 кг воды в виде кипящей жидкости.

Энергия, необходимая для этого, равна:

$$\beta = r\frac{v'}{v''-v'},$$

где r, Дж/кг, — теплота парообразования при $p_s=p$.

Искомая мощность нагревателя

$$N = \frac{\beta m}{60\tau}.$$

В таблицах находим значения v', v'' и r при $p=2{,}0$ МП $v'=0{,}0011766$ м³/кг; $v''=0{,}09958$ м³/кг; $r=1891$ кДж/кг. Подстави все эти значения, получаем:

$$N = \frac{1891 \cdot 0{,}0011766 \cdot 0{,}8 \cdot 10^3}{(0{,}09958 - 0{,}00118)\,60 \cdot 10} = 30{,}1 \text{ Вт}.$$

При хорошей организации опыта выпуск и нагревание вод при $p=\text{const}$ происходят одновременно и достаточно медленно. П этому процесс изменения состояния системы можно считать близки к равновесному. Отклонения от равновесия компенсируются введ нием ряда поправок.

9.21. Из калориметра, описанного в задаче 9.20 (рис. 9.4), пр закрытом вентиле *2* удаляется 1 кг сухого насыщенного пара.

Какое количество воды нужно испарять с помощью нагрева теля, чтобы в калориметре при неизменном давлении $p=2{,}0$ МП сохранялось равновесие?

Какова мощность нагревателя, если при тех же условиях уд ляется $m=0{,}8$ кг пара в течение $\tau=10$ мин?

Ответ: на каждый килограмм удаляемого пара нужно испарять $\frac{v''}{v''-v'}=1{,}012$ кг воды; $N=\gamma\frac{m}{60\tau}=2{,}55$ кВт, где $\gamma=r\frac{v''}{v''-v'}$ Дж/кг.

9.22. Водяной пар движется в трубопроводе. В некотором сечении трубы он имеет параметры p=10,0 МПа; t=600 °С и скорость v=200 м/с.

Определить эксергию 1 кг пара в этом сечении. Температура окружающей среды t_0=20 °С.

Ответ: ex=1619 кДж/кг.

9.23. Водяной пар движется в трубе с малой скоростью.

Найти эксергию 1 кг пара, если он имеет параметры p=13,0 МПа и t=560 °С. Температура окружающей среды t_0=20 °С.

Задачу решить графически при помощи h, s-диаграммы, на которой следует построить прямую окружающей среды. Проверить результат при помощи таблиц.

Ответ: ex=1548 кДж/кг.

9.24. Какое количество теплоты q_v, кДж/кг, нужно отвести от 1 кг водяного пара, имеющего параметры p_1=11 МПа и x_1=0,90, если при постоянном объеме паросодержание уменьшается до x_2=0,10?

Ответ: q_v=−1406 кДж/кг.

9.25. Водяной пар охлаждается в закрытом сосуде и изменяет свое состояние от p_1 и t_1 до комнатной температуры с t_2=20 °С.

Каким будет конечное состояние вещества, если: 1) p_1=10,0 МПа; t_1=600 °С; 2) p_1=0,01 МПа; t_1=80 °С.

Ответ: в обоих случаях образуется влажный пар $p_{2a}=p_{2в}=p_{s,\ t=20^\circ\text{C}}=0{,}002337$ МПа; $x_1=0{,}065\%$; $x_2=28{,}1\%$.

9.26. В начале растопки парового котла состояние пароводяной смеси определяется давлением p_1=2,0 МПа и x_1=0,02.

За какое время при закрытых вентилях на линии питательной воды и паровой магистрали давление пара в котле возрастет до p_2=5,0 МПа, если мощность Q теплового потока, направленного от топочных газов к рабочему телу, равна 350 кВт, а масса пароводяной смеси $m=1\cdot10^4$ кг?

Потери теплоты при теплопередаче от газов к воде и водяному пару не учитывать.

Ответ: τ=2 ч 12 мин.

9.27. В толстостенный стальной сосуд, из которого был предварительно удален воздух, поместили некоторое количество воды, а затем подвергли ее нагреванию и исследовали опытным путем зависимость давления в сосуде от температуры. В результате опыта была получена зависимость $p=f(t)$, которая представлена на рис. 9.5.

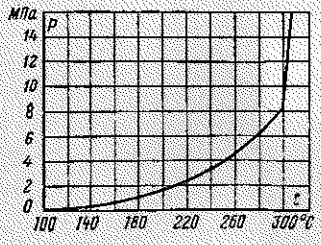


Рис. 9.5. К задаче 9.27.

Используя этот график и таблицы свойств воды и водяного пара, определить массу помещенной в сосуд воды, если объем сосуда 300 см³.

Ответ: m=214 г.

9.28. В пароперегреватель котельного агрегата поступает водяной пар в количестве 16 т/ч. Определить сообщаемое пару часовое количество теплоты Q, необходимое для перегрева пара до t=560 °С, если степень сухости пара перед входом в пароперегреватель x=0,98, а абсолютное давление пара в пароперегревателе p=13,0 МПа. Выразить Q в мегаваттах. Изобразить процесс в T, s- и h, s-диаграммах. Задачу решить, пользуясь таблицами.

Ответ: Q=3,79 МВт (рис. 9.6).

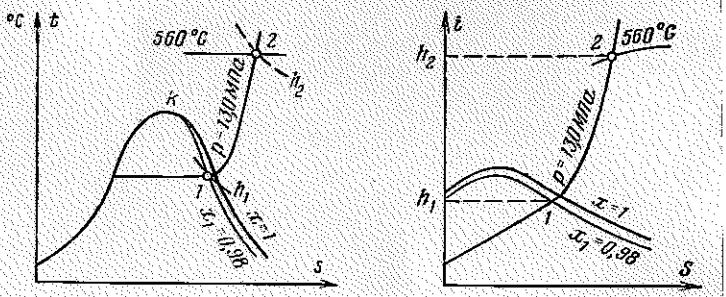


Рис. 9.6. К задаче 9.28.

9.29. К питательной воде, вводимой в прямоточный паровой котел при p=24 МПа и t=350 °С в количестве D=900·10³ кг/ч, от топочных газов подводится Q=1600 ГДж/ч теплоты.

Определить температуру пара на выходе из парового котла, его энтальпию и внутреннюю энергию. Падением давления при протекании воды и пара по трубам пренебречь.

Представить процесс в T, s- и h, s-диаграммах.

Ответ: t_2=570 °С; h_2=3403 кДж/кг; u_2=3069 кДж/кг.

9.30. Питательная вода при p=14 МПа и t_1=300 °С поступает в паровой котел, где превращается в перегретый пар с температурой t_2=570 °С. Подсчитать среднюю интегральную температуру в процессе изменения состояния воды, пренебрегая потерями давления.

Указание. Средняя интегральная температура тела в процессе подвода тепла к нему равна:

$$T_{ср} = \frac{\int_1^2 \delta q}{s_2 - s_1}.$$

Так как по условию p=const, можно записать, что $\delta q_p = dh$, следовательно,

$$T_{ср} = \frac{h_2 - h_1}{s_2 - s_1}.$$

На рис. 9.7 изображен рассматриваемый процесс *1-2* и показана изотерма $T=T_{ср}$. Очевидно, что на этом чертеже заштрихованная площадь $12\,s_2s_1$ равна площади $34\,s_2s_1$.

Ответ: $t_{ср}=365$ °С.

9.31. Теплоэлектроцентраль отдает на производственные нужды заводу $D_{пр}=20\,000$ кг/ч пара при $p=0{,}7$ МПа и $x=0{,}95$.

Завод возвращает конденсат в количестве 60% $D_{пр}$ при температуре $t_{возвр}=70$ °С. Потери конденсата покрываются химически очищенной водой, имеющей температуру $t_{хим}=90$ °С.

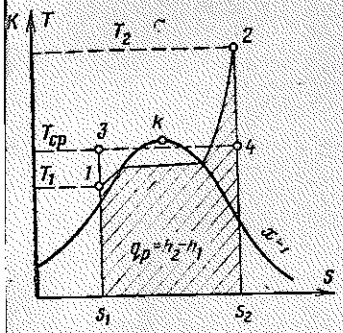


Рис. 9.7. К задаче 9.30.

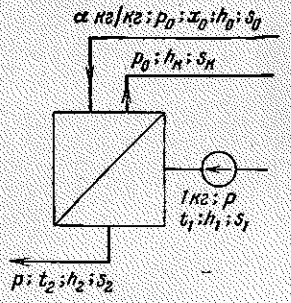


Рис. 9.8. К задаче 9.33.

Сколько килограммов топлива в час нужно было бы сжечь в топке парового котла, работающего с к. п. д. $\eta_{п.г}=0{,}80$, если бы этот паровой котел специально вырабатывал пар, нужный заводу и если теплота сгорания топлива $Q^р_н=30$ МДж/кг?

Ответ: $m=1946$ кг/ч.

9.32. В целях регулирования температуры перегретого пара в смеситель впрыскивается холодная вода. Какое количество воды на 1 кг пара следует подать в смеситель, если через него проходит перегретый пар $p=3{,}0$ МПа и $t_1=480$ °С, которую нужно снизить до $t_2=460$ °С?

Вода на входе имеет давление такое же, как и давление пара, а ее температура $t_в=20$ °С.

Ответ: $m=0{,}0137$ кг/кг пара.

9.33. В поверхностном подогревателе (рис. 9.8) производится регенеративный подогрев питательной воды греющим паром, отобранным из турбины при $p_0=0{,}66$ МПа и степени сухости $x_0=0{,}94$. Конденсат выходит с температурой на $\Delta t=2{,}0$ °С меньшей, чем температура насыщения при p_0. Питательная вода, подаваемая насосом при $p=10$ МПа, имеет на входе $t_1=110$ °С и на выходе $t_2=155$ °С.

Определить количество пара, необходимое для подогрева 1 кг питательной воды.

Найти увеличение энтропии, происходящее из-за необратимости процесса теплообмена. Потерями на трение пренебречь.

Ответ: $\alpha=0{,}0975$ кг/кг; $\Delta s_0=0{,}031$ кДж/(кг·К).

9.34. Определить эксергетический к. п. д. η_{Ex} регенеративного подогревателя, описанного в задаче 9.33.

Применительно к теплообменному аппарату η_{Ex} равен отн
шению приращения эксергии потока нагреваемого тела к уменьш
нию эксергии потока охлаждаемого тела.

Температура окружающей среды t_0=20 °С.

Ответ: η_{Ex}=0,823.

9.35. Водяной пар при p_1=6,0 МПа и t_1=440 °С изоэнтроп
расширяется до тех пор, пока его температура t_2 не оказывает
равной 200 °С.

Определить средний показатель k_{cp} процесса, если он опис
вается уравнением pv^k=const.

Решение. Как известно, уравнение Пуассона pv^k=const спр
ведливо для всех веществ только тогда, когда

$$k=\left(\frac{\partial h}{\partial u}\right)_s=-\frac{p}{v}\left(\frac{\partial p}{\partial v}\right)_s.$$

Из этого общего выражения лишь в частном случае идеальног
газа получается значение $k=c_p/c_v$. Значение производной $(\partial h/\partial u$
меняется на протяжении изоэнтропного процесса, поэтому расчетны
уравнением этого процесса для водяного пара (как и для любог
другого вещества) должно служить выражение

$$pv^{k_{cp}}=\text{const},$$

в котором значение среднего для заданного отрезка изоэнтроп
показателя k_{cp} равно:

$$k_{cp}=\frac{\lg\dfrac{p_1}{p_2}}{\lg\dfrac{v_2}{v_1}}.$$

Входящие в эту формулу значения параметров должны бы
найдены из таблиц при условии соблюдения постоянства энтропи

Для того чтобы определить параметры p_2 и v_2, необходим
сначала найти энтропию $s_1=s_2$=6,681 кДж/(кг·К). Так как $s_2>s''_{2\,t=200\,°C}$=6·4318 кДж/(кг·К), пар в состоянии 2 являет

перегретым. Из таблиц перегретого пара следует, что при t_2=200 °
значение энтропии s_2=6,681 кДж/(кг·К) соответствует давлени
p_2, лежащему между 1,0 и 1,05 МПа.

Линейно интерполируя, находим, что p_2=1,02 МПа и v_2
=0,2018 м³/кг. Следовательно,

$$k=\frac{\dfrac{6,00}{1,02}}{\dfrac{0,2018}{0,05124}}=1,293,$$

где 0,05124 м³/кг=v_1.

Значительно проще, но менее точно находятся параметры, ну
ные для вычисления k, при помощи h, s-диаграммы.

9.36. Сухой насыщенный пар при p_1=1,5 МПа расширяется обратимой адиабате до тех пор, пока его удельный объем не станится равным 0,5 м³/кг.

Пользуясь h, s-диаграммой, определить средний показатель ажного пара для этого процесса.

Ответ: k=1,124.

9.37. Полезная внешняя работа тела при изменении его состоя- я $l_{пол}=\int_{p_1}^{p_2} v dp$. При изоэнтропном расширении этот интеграл равен еплоперепаду», т. е. разности энтальпий h_1-h_2.

Определить теоретическую мощность турбины, если часовой сход пара D, протекающего через нее, составляет 640 т/ч. На оде в турбину пар имеет параметры p_1=13,0 МПа и t_1=565 °С. авление в конденсаторе турбины p_2=0,004 МПа. Процесс расшиния пара в турбине считать обратимым, т. е. изоэнтропным.

Задачу решить, пользуясь только таблицами.

Решение. Полезная внешняя работа в единицу времени, т. е. скомая мощность, составляет:

$$N=D(h_1-h_2).$$

Задача, таким образом, сводится к нахождению табличных ачений энтальпий пара в начальном и конечном состояниях. Энльпия h_1 находится непосредственно по заданным начальным паметрам. Для определения h_2 воспользуемся условием изоэнтропости процесса, которое определяется равенством

$$s_1=s_2.$$

Находим необходимые начальные значения:

$$h_1=3506 \text{ кДж/кг и } s_1=6{,}653 \text{ кДж/(кг·К)}.$$

Энтропия сухого насыщенного пара при p_2=0,004 МПа s''= 8,473 кДж/(кг·К), а энтальпия кипящей жидкости s'= 0,4225 кДж/(кг·К).

Сопоставляя эти три значения энтальпий, заключаем, что в конечном состоянии пар оказывается влажным.

Отсюда степень сухости

$$x_2=\frac{s_1-s'_2}{s''_2-s'_2}=\frac{6{,}653-0{,}4225}{9{,}473-0{,}4225}=0{,}774.$$

Теперь легко найти энтальпию h_2 в конечном состоянии:

$$h_2=h'_2+r_2x_2.$$

В таблицах находим (при p_2=0,004 МПа) h'_2=121,42 кДж/кг и =2433 кДж/кг. Определяем далее:

$$h_2=121+2433\cdot 0{,}774=2004 \text{ кДж/кг}.$$

Вычисляем, наконец, искомую мощность:

$$N=\frac{640\cdot 10^3}{3600}(3506-2004)=267\,022 \text{ кВт}\approx 267 \text{ МВт}.$$

9.38. В результате прожога стенки барабанного котла произошел взрыв. Барабан имел объем V=8,5 м³; 0,6 V было заполнено одой, а остальная часть сухим насыщенным паром. Давление в бабане 1 МПа. Давление в топке 0,1 МПа.

Определить объем пара в конце взрыва и работу расширен пара в этом процессе, если считать, что он протекал изоэнтропно

Ответ: $V_2=1086$ м³; $L=288$ МДж.

9.39. Водяной пар массой 1 кг с параметрами $p_1=13$ МПа $t_1=560$ °С изоэнтропно расширяется до давления $p_2=0{,}004$ МПа

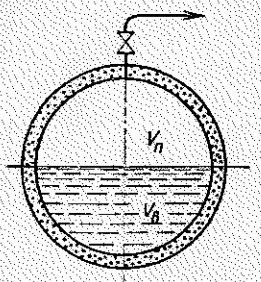


Рис. 9.9. К задаче 9.41.

Рассчитать процесс, т. е. найти «достающие» параметры (t, v, h, s, x) начале и конце процесса. Определи работу расширения и изменение вн ренней энергии.

Расчет сделать, пользуясь толь таблицами, и проверить его при мощи h, s-диаграммы.

Ответ: $v_1=0{,}02728$ м³/кг; $h_1=3$ кДж/кг; $s_1=s_2=6{,}638$ кДж/(кг·К); v $=26{,}87$ м³/кг; $t_2=29{,}0$ °С; $x_2=0{,}772$; h $=1999$ кДж/кг; $l=-(u_2-u_1)=-1$ кДж/кг.

9.40. Водяной пар, имеющий пар метры $p_1=3{,}4$ МПа и $x_1=98\%$, изо тропно снимается до $p_2=9{,}0$ МПа.

Найти температуру и энтальпию пара в конечном состоян Определить работу сжатия и изменение внутренней энергии 1 пара.

Задачу решить, пользуясь таблицами. Проверить результат h, s-диаграмме.

Ответ: $t_2=356{,}4$ °С; $h_2=2977$ кДж/кг.

$$l=-\Delta u=-167 \text{ кДж/кг.}$$

9.41. Покрытый тепловой изоляцией резервуар объемом $V=10$ наполовину заполнен водой при температуре насыщения и напол вину сухим насыщенным паром. Давление в резервуаре $p_1=9{,}0$ МП Быстро открывая задвижку (рис. 9.9), выпускают пар в атмосфе до тех пор, пока давление в резервуаре p_2 не становится равн 6,0 МПа, после чего задвижку закрывают.

Сколько килограммов пара выпускается в атмосферу?

Какой объем будет занимать пар, оставшийся в барабане пос закрытия задвижки?

Процесс изменения состояния H_2O в резервуаре считать из энтропным.

Ответ: $m_{вып}=2055$ кг; $V_{п2}=8{,}06$ м³.

9.42. Вода в состоянии насыщения при температуре $t_1=t_s$ $=30$ °С подается в насос, который изоэнтропно сжимает ее в одн случае до 3,0 МПа и во втором — до 30 МПа.

Определить энтальпию 1 кг воды в конце процесса и полезну внешнюю работу насоса в обоих случаях.

Ответ: 1) $h_2=128{,}7$ кДж/кг; $l'=-3{,}0$ кДж/кг;
2) $h_2=155{,}8$ кДж/кг; $l'=-30{,}1$ кДж/кг.

9.43. На входе в турбину с противодавлением пар имеет пар метры $p_1=9$ МПа и $t_1=535$ °С. На выходе из турбины давлен $p_2=1{,}8$ МПа.

В проточной части турбины происходит необратимый адиаба ный процесс изменения состояния пара. Необратимость объясняет потерями на трение, которые составляют 70 кДж/кг.

Найти относительный внутренний и эксергетический к. п. д. процесса.

Ответ: $\eta_{oi}=0{,}852$; $\eta_{ex}=0{,}925$.

9.44. Водяной пар массой 1 кг сжимается изотермически. При этом состояние пара меняется так, что начальные его параметры $p_1=3{,}0$ МПа и $t_1=360$ °С, а конечные соответствуют состоянию кипящей жидкости.

Определить параметры в конце процесса и количество отведенной теплоты.

Ответ: $p_2=18{,}67$ МПа; $v''_2=0{,}001894$ м³/кг; $h''_2=1762$ кДж/кг; $s''_2=3{,}9162$ кДж/(кг·К); $q=-1809$ кДж/кг.

9.45. В цилиндре под поршнем находится пароводяная смесь при давлении $p_1=9{,}0$ МПа и степени сухости $x=0{,}125$. Первоначальный объем смеси $V=10$ м³. К содержимому в цилиндре изотермически подводится теплота в количестве $Q=6\cdot10^3$ МДж.

Определить начальные и конечные параметры состояния вещества (p, t, h, s), изменение его внутренней энергии и работу, произведенную при расширении.

Представить процесс в h, s-диаграмме.

Решение. Начальные параметры находятся при помощи таблиц. По таблицам параметры на пограничных линиях находим при $p=9$ МПа; $t_1=t_2=303{,}92$°С или $T_1=T_2=577{,}07$ К.

Удельный объем смеси

$$v_1=(1-x)v'_1+xv''_1=$$

$$=0{,}875\cdot0{,}0014174+0{,}125\cdot0{,}02048=0{,}00380 \text{ м}^3/\text{кг};$$

энтальпия

$$h_1=h'+r_1x_1=1363{,}7+1379{,}3\cdot0{,}125=1536{,}1 \text{ кДж/кг};$$

энтропия

$$s_1=(1-x)s'_1+x_1s''_1=$$

$$=0{,}875\cdot3{,}287+0{,}125\cdot5{,}678=3{,}5859 \text{ кДж/(кг·К)}.$$

При этих подсчетах параметры на пограничных линиях и их значения берутся также при $p_1=9{,}0$ МПа.

Энтропия в конечной точке процесса определяется по формуле

$$s_2=s_1+\frac{Q}{mT},$$

где

$$m=\frac{V_1}{v_1}=\frac{10}{0{,}00380} \text{ кг},$$

следовательно,

$$s_2=3{,}5859+\frac{6\cdot10^9\cdot0{,}00380}{577{,}07\cdot10}=7{,}5369 \text{ кДж/(кг·К)}.$$

Остальные параметры в конце процесса находятся при помощи h, s-диаграммы. При $t_2=304$ °С и $s_2=7{,}537$ кДж/(кг·К) определяем: $p_2=0{,}43$ МПа; $h_2=3070$ кДж/кг; $v_2=0{,}61$ м³/кг. Более точно эти параметры можно определить по таблицам, интерполируя дважды — по вертикали и горизонтали.

Изменение внутренней энергии

$$\Delta U = m(u_2 - u_1) = m(h_2 - p_2v_2) - (h_1 - p_1v_1) = m(h_2 - h_1) - (p_2v_2 - p_1v_1] = \frac{10}{0{,}00386}(3070 - 1536) - (0{,}43 \cdot 0{,}61 - 9{,}0 \cdot 0{,}00380) \cdot 10^2 = 344 \cdot 10^4 \text{ кДж}.$$

Работа расширения определяется из уравнения первого закона термодинамики

$$L = Q - \Delta U = 6 \cdot 10^6 - 3{,}44 \cdot 10^6 = 2{,}56 \cdot 10^6 \text{ кДж}.$$

9.46. К 1 кг воды при $p_1 = 20{,}0$ МПа и $t = 320$ °С изотермически подводится $q = 1700$ кДж/кг теплоты.

Определить параметры в конце процесса, работу расширения и изменение внутренней энергии.

Ответ: $p_2 = 5{,}264$ МПа; $v_2 = 0{,}04539$ м³/кг; $s_2 = 6{,}268$ кДж/(кг·К) $h_2 = 2{,}972$ кДж/кг; $\Delta u = 1319$ кДж/кг; $l = 381$ кДж/кг.

Глава десятая

ВЛАЖНЫЙ ВОЗДУХ

При решении задач этого раздела следует пользоваться h, d-диаграммой влажного воздуха (рис. 10.1), если не сделано никаких оговорок.

10.1. При определении состояния влажного воздуха с помощью психрометра зафиксировано, что «сухой» термометр показывает 20 °С, а «мокрый» 15 °С.

Найти влагосодержание d, относительную влажность φ, энтальпию h, а также температуру точки росы для этого воздуха.

Ответ: $d = 9{,}2$ г/кг с. в.; $\varphi = 62\%$; $h = 43$ кДж/кг с. в.; $t_р = 12{,}6$ °С.

10.2. Состояние влажного воздуха задано параметрами: $t = 25$ °С, $\varphi = 0{,}6$. С помощью таблиц водяного пара определить парциальное давление водяных паров в воздухе.

Ответ: $p_п = 1{,}90$ кПа.

10.3. Состояние влажного воздуха при температуре 20 °С определяется с помощью гигрометра, которым измерена точка росы, равная 10 °С.

Определить относительную влажность φ, влагосодержание d и энтальпию h влажного воздуха.

Ответ: $\varphi = 52\%$; $d = 7{,}8$ г/кг с. в.;
$h = 40$ кДж/кг с. в.

10.4. В сушильной установке производится подсушка топлива с помощью воздуха при атмосферном давлении. От начального состояния с температурой $t = 20$ °С и относительной влажностью $\varphi_1 = 40\%$ воздух предварительно подогревается до температуры 80 °С и далее направляется в сушильную камеру, где в процессе высушивания топлива воздух охлаждается до 35 °С.

Рассчитать необходимое количество теплоты q для нагревания 1 кг воздуха, параметры воздуха на выходе из сушильной камеры и количество воды, которое отбирает каждый килограмм воздуха от топлива. Считать, что тепловые потери отсутствуют. Определить также, какое максимальное количество воды мог бы унести с собой 1 кг воздуха, если бы он направлялся в сушильную камеру без предварительного подогрева.

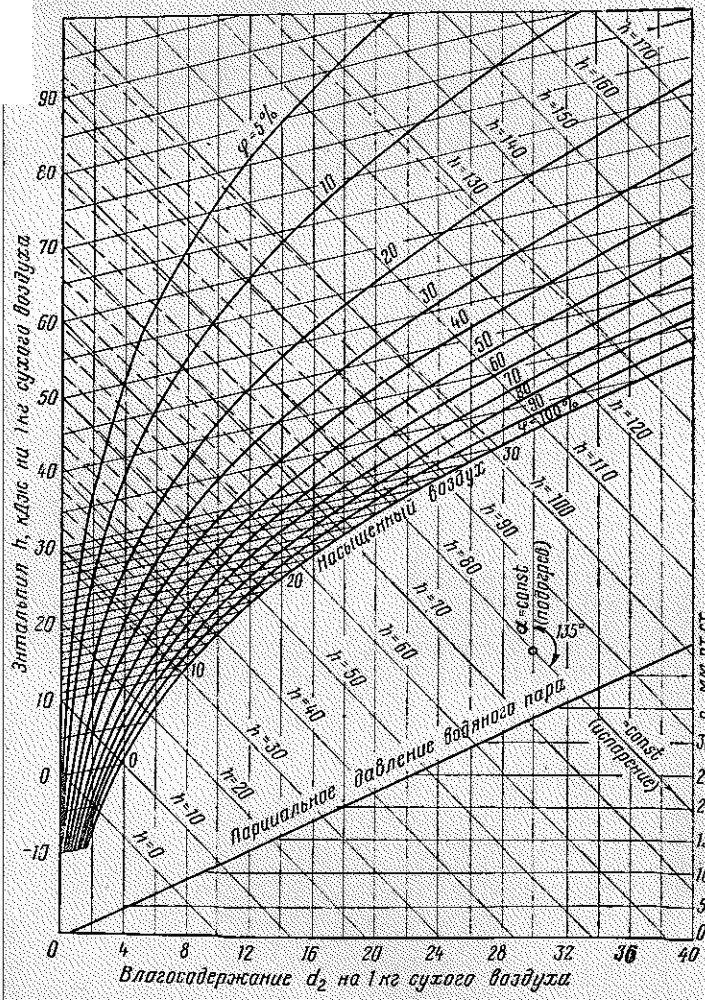


Рис. 10.1. h, d-диаграмма влажного воздуха при p=745 мм рт. ст. (993,3 гПа).

Ответ: $q=61$ кДж/кг с. в. С каждым килограммом сухого воздуха уходит 18,0 г воды. На выходе из сушильной камеры параметры воздуха следующие: $d=23{,}9$ г/кг с. в., $\varphi=66\%$, $h=96$ кДж/кг с. в. Если бы воздух не нагревался, то при прохождении через сушильную камеру каждый килограмм воздуха мог бы воспринять максимально 3,1 г воды.

10.5. Начальное состояние воздуха задано параметрами: $t=20$ °С, $d=8$ г/кг с. в., $p=993{,}3$ гПа. Воздух сжимается адиабатически до давления 6 бар и затем охлаждается.

Определить, при какой температуре начнется выделение влаги из этого воздуха. Для решения задачи воспользоваться таблицами водяного пара.

Решение. По h, d-диаграмме находим, что относительная влажность $\varphi=54\%$. Следовательно, парциальное давление водяных паров $p=\varphi p_s=0{,}54\cdot 0{,}023368=0{,}01262$ бар; здесь значение давления насыщения взято из таблиц водяного пара. Так как парциальное давление водяных паров будет увеличиваться пропорционально общему давлению влажного воздуха, то парциальное давление водяного пара при $p=6$ бар составит:

$$p=\frac{0{,}01262\cdot 6}{0{,}9933}=0{,}0762 \text{ бар}.$$

Это давление водяного пара соответствует температуре насыщения 40,6 °С, при которой и начнется выпадение воды из воздуха.

10.6. Начальное состояние влажного воздуха при атмосферном давлении задано параметрами: $t=25$ °С, $\varphi=70\%$. Воздух охлаждается до температуры 15 °С.

Определить, сколько влаги выпадет из каждого килограмма воздуха.

Ответ: $\Delta d=3{,}4$ г/кг с. в.

10.7. Определить плотность влажного воздуха при параметрах $t=320$ °С, $p=0{,}3$ МПа, $d=30$ г/кг с. в.

Решение. Находим газовую постоянную влажного воздуха $R_{\text{вл.в}}$:

$$R_{\text{в.л.в}}=g_{\text{с.в}}R_{\text{с.в}}+g_{\text{в.п}}R_{\text{в.п}},$$

где индексы «с. в.» и «в. п.» относятся к сухому воздуху и водяному пару:

$$R_{\text{вл.в}}=\frac{1}{1+d}R_{\text{с.в}}+\frac{d}{1+d}R_{\text{в.п}};$$

$$R_{\text{вл.в}}=\frac{1}{1{,}030}\cdot\frac{8314}{28{,}96}+\frac{0{,}030}{1{,}030}\cdot\frac{8314}{18{,}016}=292{,}1 \text{ Дж/(кг·К)}.$$

Плотность влажного воздуха определяется из уравнения Клапейрона — Менделеева:

$$\rho=\frac{p}{RT}=\frac{0{,}3\cdot 10^6}{292{,}1\cdot 593{,}15}=1{,}733 \text{ кг/м}^3.$$

10.8. Определить удельный объем влажного воздуха при следующих параметрах: $t=200$ °С, $p=0{,}2$ МПа, $d=40$ г/кг с. в.

Ответ: $v=0{,}695$ м³/кг.

10.9. Определить энтальпию влажного воздуха при параметрах $p=0{,}4$ МПа, $t=70$ °С, $d=20$ г/кг с. в.

Ответ: $h=121$ кДж/кг.

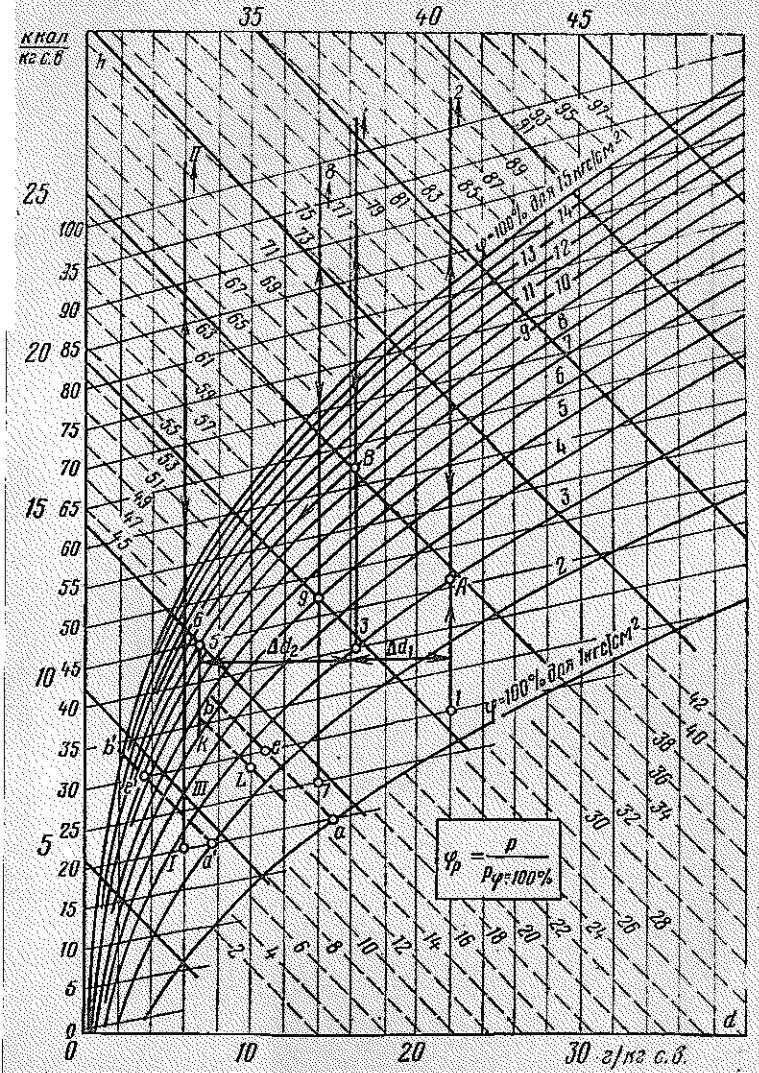


Рис. 10.2. К задаче 1.10. h, d-диаграмма влажного воздуха для давлений от 1 до 15 кгс/м² (кривые $t=100\%$ для различных давлений).

10.10. Построить h, d-диаграмму влажного воздуха для давле ний воздуха от 1 до 15 кгс/см², т. е. построить в h, d-координата линии $\varphi=100\%$ для различных давлений.

Решение. Диаграмму можно построить, принимая, что влаж ный воздух до 15 кгс/см² является идеальным газом. В этом случа энтальпия h влажного воздуха зависит только от температуры и влагосодержания пара $d_п$ и воды $d_ж$ в воздухе и рассчитывается по обычной формуле

$$h=0{,}24t+10^{-3}d_п(597+0{,}46t)+$$

$$+10^{-3}d_ж t, \text{ ккал/кг с. в.} \quad (1$$

Положение линий $\varphi=\text{const}=100\%$ определяется соотношением

$$d_п=622\frac{p_s}{p-p_s}, \quad (2$$

где p_s — давление насыщения при данной температуре; p — давле ние влажного воздуха.

Произведя расчеты по этим двум формулам, можно построить требуемую диаграмму (рис. 10.2), которая была впервые опубли кована в [12].

На построенной диаграмме показаны изотермы области тумана наклон которых определяется обычным соотношением

$$\left(\frac{\partial h}{\partial d_ж}\right)_t=0{,}001t. \quad (3$$

Изотермы области тумана нанесены пунктирными линиями и не привязаны к линиям $\varphi=1$.

Для нахождения относительной влажности сжатого воздуха можно воспользоваться тем, что относительная влажность прямо пропорциональна давлению сжатого воздуха, т. е.

$$\frac{p_1}{\varphi_1}=\frac{p_2}{\varphi_2}. \quad (4$$

Учитывая, что в диаграмме имеются лишь линии $\varphi=100\%$, формулу (4) перепишем следующим образом:

$$\varphi_p=\frac{p}{p_{\varphi=100\%}}, \quad (5$$

где p — давление сжатого воздуха; $p_{\varphi=100\%}$ — значение давления на той линии $\varphi=100\%$, которая проходит через выбранную точку диаграммы.

По формуле (5) и производят расчет относительной влажности сжатого воздуха.

10.11. Состояние влажного воздуха при атмосферном давлении определяется с помощью психрометра, причем «сухой» термометр показывает 30 °С, а «мокрый» 20 °С.

Определить относительную влажность и влагосодержание воздуха с помощью h, d-диаграммы рис. 10.2 *.

---

* Эта и все последующие задачи раздела решаются с помощью h, d-диаграммы рис. 10.2.

Решение. Прежде всего необходимо нанести на диаграмму изотерму «мокрого» термометра $t=20$ °С при 1 кгс/см². Для этого (см. рис. 10.2) из точки a (точки пересечения изотермы $t=20$ °С и линии $\varphi=100\%$ для 1 кгс/см²) проводим линию, параллельную изотерме тумана при 20 °С — линию ab; на пересечении линии ab и изотермы $t=30$ °С находим точку e, определяющую состояние воздуха. В этом состоянии по диаграмме определяем влагосодержание $d=11$ г/кг с. в. Относительная влажность рассчитывается по формуле, написанной на диаграмме:

$$\varphi_p = \frac{p}{p_{\varphi=100\%}} = \frac{1}{2,5} = 0,4.$$

В этом случае $p_{\varphi=100\%} = 2,5$ кгс/см² (соответствует точке e).

Можно легко убедиться, что по обычной h, d-диаграмме получается такой же результат.

Для атмосферного давления проще пользоваться обычной диаграммой.

10.12. В трубе, внутри которой протекает воздух при давлении 2 кгс/см², находятся «сухой» и «мокрый» термометры; их показания соответственно равны 30 и 20 °С.

Требуется определить влагосодержание d и относительную влажность φ проходящего воздуха.

Решение. На h, d-диаграмме (рис. 10.2) необходимо провести изотерму тумана при $t=20$ °С и $p=2$ кгс/см². Эта линия проходит параллельно пунктирной с температурой $t=20$ °С и начинается в точке a' (в точке пересечения изотермы $t=20$ °С и линии $\varphi=100\%$ для 2 кгс/см²) — линия $a'b'$. Аналогично задаче 10.11 находим точку e', которая соответствует состоянию воздуха. Влагосодержание d в этой точке равно 3,5 г/кг с. в. Относительная влажность φ рассчитывается по формуле, приведенной на диаграмме:

$$\varphi_p = \frac{p}{p_{\varphi=100\%}} = \frac{2}{8} = 0,25$$

10.13. Воздух с параметрами $t=20$ °С, $p=1$ кгс/см² и $d=6$ г/кг с. в., сжимается в компрессоре до давления 4 кгс/см² и охлаждается затем в трубах.

Определить, при какой температуре начинается выпадение воды.

Решение. На h, d-диаграмме рис. 10.2 начальное состояние обозначено точкой I. Процесс сжатия воздуха изображается линией I-II при $d=$const. Температура при сжатии повышается; конечная точка при сжатии выходит, вероятно, за пределы диаграммы. Последующий процесс охлаждения изображается также прямой $d=6$ г/кг с. в.=const, направленной сверху вниз. Выпадение влаги начинается тогда, когда в процессе охлаждения наступает состояние насыщения воздуха при $d=6$ г/кг с. в. и $p=4$ кгс/см², т. е. на линии $\varphi=100\%$ для 4 кгс/см² — точка III.

Таким образом, находим, что выпадение влаги начинается при $t=27,5$ °С. Рассматривая диаграмму, видим, что если бы в данном случае воздух сжимался до 10 кгс/см², то выпадение влаги началось бы уже при 45 °С.

10.14. Влажный воздух при начальных параметрах $p_1=6$ кгс/см², $t_1=55$ °С и $d_1=10$ г/кг с. в. течет в трубопроводе к потребителю, постоянно охлаждаясь по мере движения.

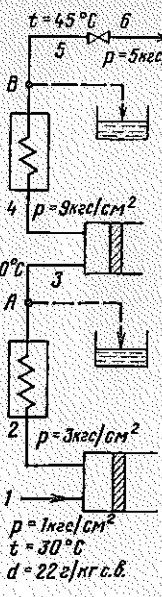


Рис. 10.3. К задаче 10.16.

Определить, при какой температуре t_2 начнет выпадать вода из воздуха, если при расчете пренебречь снижением давления вследствие гидравлических сопротивлений.

Какова будет температура t_2, в начале выпадения воды, если этот воздух пройдет через дроссельный вентиль, и манометр, измеряющий давление воздуха после дросселя, покажет $p_{\text{изб}}=2$ кгс/см²?

Ответ: $t_2=44$ °С; $t_{2'}=32$ °С.

10.15. Воздух с параметрами $t_1=15$ °С; $p_1=1$ кгс/см² и $d_1=10$ г/кг с. в. сжимается с отводом теплоты. Параметры воздуха в конце процесса сжатия $t_2=60$ °С; $p_2=7$ кгс/см².

Определить относительную влажность в конце процесса сжатия.

Ответ: $\varphi_2=55\%$.

10.16. На рис. 10.3 изображена схема сжатия воздуха в двухступенчатом компрессоре с промежуточными холодильниками и отбором влаги, и также с последующим дросселированием воздуха. Параметры воздуха указаны на схеме. Необходимо проследить при помощи диаграммы весь путь воздуха, определить температуру начала выпадения воды, количество выпадающей воды и относительную влажность подаваемого потребителю воздуха. При решении этой задачи предполагается, что удается отсепарировать и удалить всю выпавшую влагу.

Решение. Процесс сжатия воздуха в первой ступени компрессора изображается линией *1-2* при $d=22$ г/кг с. в. (см. рис. 10.2). При охлаждении воздуха в первом холодильнике (давление воздуха 3 кгс/см²) начинается выпадение воды при температуре $t=46$ °С. На диаграмме этот момент отмечен точкой *A*, т. е. точкой пересечения прямой $d=22$ г/кг с. в. и кривой $\varphi=100\%$ для 3 кгс/см².

Так как по условию вся выпадающая влага удаляется из воздуха, то дальнейшее охлаждение воздуха до 40 °С проходит по линии $\varphi=100\%$ для 3 кгс/см² (отрезок *A-3*); во вторую ступень компрессора будет подаваться насыщенный воздух ($\varphi=100\%$) при $p=3$ кгс/см² и $t=40$ °С (состояние *3*). Для второй ступени компрессора процесс сжатия изображен на диаграмме линией *3-4*, охлаждение — линией $d=\text{const}$. Выпадение влаги начинается в точке *B*, т. е. при температуре 63 °С, а из холодильника второй ступени воздух выходит при $t=45$ °С, $\varphi=100\%$ и $p=9$ кгс/см² — состояние *5*.

Для уменьшения относительной влажности воздух адиабатно дросселируется до 5 кгс/см² (состояние *6*). При этом на *h, d*-диаграмме точки *5* и *6* совпадают, так как энтальпия и влагосодержание в процессе дросселирования не изменяются. Температура при дросселировании согласно предположению об идеальности влажного воздуха остается постоянной.

Относительная влажность воздуха в состоянии *6* будет уже

менее 100%. Рассчитывается она по формуле, написанной на диаграмме:

$$\varphi_p = \frac{p}{p_{\varphi=100\%}} = \frac{5}{9} = 0{,}56, \text{ т. е. } \varphi = 56\%.$$

Из построений на диаграмме (см. рис. 10.2) следует, что если выходящий из компрессора воздух (состояние *6*) будет в дальнейшем охлаждаться в трубах, то выпадение влаги начнется при температуре $t=33$ °С.

При условии полной сепарации влаги после первого холодильника из каждого килограмма воздуха удаляется $\Delta d_1=22-16{,}2=5{,}8$ г воды, а после второго холодильника отделяется $\Delta d_2=16{,}2-6{,}8=9{,}4$ г воды на каждый килограмм сухого воздуха.

10.17. Параметры воздуха перед сжатием его в компрессоре следующие: $p_1=1$ кгс/см²; $t_1=25$ °С; $d_1=14$ г/кг с. в. Воздух сжимается до 5 кгс/см² и охлаждается затем до $t=35$ °С, причем в процессе охлаждения удается отделить воду в количестве 4 г/кг с. в. После этого воздух дросселируется до давления $p=2$ кгс/см². Необходимо определить относительную влажность воздуха после дросселя, а также температуру, при которой начнет выпадать вода из этого воздуха.

Решение. Процесс сжатия воздуха (см. рис. 10.2) изображается вертикальной линией *7-8*, процесс охлаждения — линией *8-9*; выпадение влаги начинается в точке *9*, где при давлении 5 кгс/см² будет достигнута относительная влажность $\varphi=100\%$. Дальнейшее охлаждение проходит с выпадением влаги. Если бы из воздуха удалось удалить всю выпавшую влагу, то (см. задачу 10.16) в конце охлаждения до 35 °С в воздухе осталось бы воды 7,2 г/кг с. в., т. е. было бы удалено воды 14—7,2=6,8 г/кг с. в. Однако в соответствии с условием настоящей задачи удаляется воды лишь 4 г/кг с. в. Следовательно, после охлаждения до 35 °С и удаления части влаги в воздухе остается вода в виде тумана. Для определения состояния такого воздуха нужно учесть, что влагосодержание его будет равно 10 г/кг с. в., а температура 35 °С. Изотерма области тумана (она же изотерма «мокрого» термометра) при давлении $p=5$ кгс/см² и температуре $t=35$ °С представлена линией *KL* (о построении такой линии говорится в задачах 10.11 и 10.12); здесь она направлена в область тумана при $p=5$ кгс/см². Точка *L* отвечает, очевидно, искомому состоянию воздуха. Дросселирование воздуха не изменит положения точки *L* на *h, d*-диаграмме, однако после дросселирования до давления 2 кгс/см² воздух станет ненасыщенным, так как точка окажется выше линии $\varphi=100\%$ для 2 кгс/см². В данном случае при дросселировании влажного воздуха, в котором вода находится в виде тумана, температура воздуха понижается. Так, в состоянии *L* при $p=2$ кгс/см² температура воздуха равна 28 °С (см. рис. 10.2). Относительная влажность в этом состоянии рассчитывается, как и в предыдущих задачах, по формуле

$$\varphi_p = \frac{p}{p_{\varphi=100\%}} = \frac{2}{2{,}4} = 0{,}83.$$

Через точку *L* проходит линия $\varphi=100\%$ для давления $p=2{,}6$ кгс/см². Построив из точки *L* линию процесса охлаждения воздуха до пересечения с кривой $\varphi=100\%$ для $p=2$ кгс/см², мы убеждаемся, что воздух в состоянии *L*, охлаждающийся в трубах при 2 кгс/см², начинает выделять влагу при $t=25$ °С.

ИСТЕЧЕНИЕ И ДРОССЕЛИРОВАНИЕ ГАЗОВ И ПАРОВ

11.1. Из суживающегося сопла вытекает кислород, находящийся в резервуаре, давление и температура в котором постоянны и соответственно равны: p_0=6 МПа и t_0=100 °С *. Давление среды, в которую происходит истечение, $p_{ср}$=3,6 МПа.

Определить скорость истечения и расход кислорода, если площадь выходного сечения сопла f=20 мм^2.

Газ подчиняется уравнению $pv=RT$, теплоемкость не зависит от температуры. Входная скорость близка к нулю. Процесс изменения состояния текущего газа — изоэнтропный.

Решение. Прежде всего устанавливаем, каков режим истечения, для чего находим значение $\beta=p_{ср}/p_0$:

$$\beta=\frac{3,6}{6,0}=0,6.$$

Сравниваем полученное значение с критическим отношением давлений:

$$\beta_{кр}=\frac{p_{кр}}{p_0}=\left(\frac{2}{k+1}\right)^{\frac{k}{k-1}}.$$

Для кислорода k=1,4 и $\beta_{кр}$=0,528. Следовательно, $\beta>\beta_{кр}$, т. е. отношение давления среды к давлению перед соплом больше, чем критическое. Это означает, что располагаемый перепад давлений будет использован полностью, на выходе из сопла установится давление, равное давлению среды, а скорость истечения окажется меньшей, чем критическая, т. е. будет дозвуковой. Ее следует подсчитать по формуле

$$w_2=\sqrt{2\frac{k}{k-1}RT_1\left[1-\left(\frac{p_2}{p_0}\right)^{\frac{k-1}{k}}\right]}=$$

$$=\sqrt{2\frac{1,4}{1,4-1}\cdot\frac{8314}{32}373\left[1-\left(\frac{3,6}{6,0}\right)^{0,286}\right]}=303\ \text{м/с}.$$

Подсчитываем удельный объем кислорода в выходном сечении:

$$v_2=v_0\left(\frac{p_0}{p_2}\right)^{\frac{1}{k}}=\frac{RT_0}{p_0}\left(\frac{p_0}{p_2}\right)^{\frac{1}{k}}=\frac{8314}{32\cdot6\cdot10^5}\left(\frac{6,0}{3,6}\right)^{\frac{1}{1,4}}=0,0232\ \text{м}^3/\text{кг}.$$

Наконец, находим массовый секундный расход кислорода при помощи формулы неразрывности:

$$m=\frac{f_2w_2}{v_2}=\frac{20\cdot10^{-6}\cdot303}{0,0232}=0,256\ \text{кг/с}.$$

---

* Индексы 0 у p и t указывают, что на входе в сопло скорость очень близка к нулю и, следовательно, входные параметры почти равны параметрам полного адиабатного торможения (p_0 и t_0).

В последующих задачах индексами 0 будут снабжаться обозначения входных параметров тогда, когда начальной скоростью можно пренебречь по причине ее малых значений.

11.2. Двухатомный газ, для которого газовая постоянная R=296,9 Дж/(кг·К), имея на входе в суживающееся сопло параметры p_0=6,4 МПа и T_0=300 К, вытекает в среду, где давление $p_{ср}$=4,5 МПа.

Определить скорость истечения и секундный расход газа, если диаметр выходного отверстия равен 5 мм. Истечение считать изоэнтропным.

Ответ: w_2=307 м/с; m=0,283 кг/с.

11.3. Как изменятся скорость и секундный расход газа (задача 11.2), если он вытекает в среду с давлением $p_{ср}$=0,1 МПа.

Решение. В этом случае газ вытекает в среду, где давление ниже критического: $p_{кр}$=0,528 p_0=0,528·6,4 МПа=3,379 МПа. Как известно, при таком режиме течения на выходе из сопла устанавливается давление, равное критическому. При этом скорость истечения оказывается также равной критической, а расход — максимальным. Скорость

$$w_2 = w_{кр} = \sqrt{2\frac{k}{k+1}RT_0} = \nu\sqrt{RT_0}.$$

Расход при этом должен быть определен по формуле

$$m = m_{макс} = f\sqrt{2\frac{k}{k+1}\left(\frac{2}{k+1}\right)^{\frac{2}{k-1}}\frac{p_0}{v_0}} = f\psi\sqrt{\frac{p_0}{v_0}}.$$

Подсчитываем значения постоянных коэффициентов ν и ψ для идеальных газов различной атомности и результаты сведем в следующую таблицу:

Газ	k	ν	ψ
Одноатомный	1,67	1,118	0,726
Двухатомный	1,40	1,08	0,685
Трех- и многоатомный	1,3	1,06	0,669

Воспользовавшись коэффициентом ν и ψ, находим скорость и расход:

$$w_{кр} = 1{,}08\sqrt{296{,}9\cdot 300} = 322 \text{ м/с};$$

$$m = 0{,}785\cdot 5^2\cdot 10^{-6}\cdot 0{,}685\sqrt{\frac{64\cdot 10^5}{0{,}0139}} = 0{,}288 \text{ кг/с};$$

здесь 0,0139 — значение v_0, м³/кг:

$$v_0 = \frac{RT_0}{p_0} = \frac{296{,}9\cdot 300}{64\cdot 10^5}.$$

Проверяем, действительно ли скорость $w_{кр}$ является звуковой. В выходном сечении скорость звука:

$$a_2 = \sqrt{kRT_2},$$

где

$$T_2 = T_0\beta_{кр}^{\frac{k-1}{k}} = T_0\frac{2}{k+1} = 300\frac{2}{1{,}4+1} = 250 \text{ К},$$

следовательно,

$$a_2 = \sqrt{1{,}4 \cdot 296{,}9 \cdot 250} = 322 \text{ м/с}.$$

Таким образом, убеждаемся, что $\omega_{\text{кр}} = a_2$, т. е. что на выходе из сопла действительно устанавливается скорость, равная местной скорости звука.

11.4. Для охлаждения цилиндров двигателя их обдувают при помощи воздуходувки потоком воздуха, который вытекает из суживающихся сопл с выходным сечением общей площадью $f = 20$ см^2. Параметры воздуха перед соплом $p_0 = 1$ МПа, $t_0 = 60$ °С. Давление среды $p_{\text{ср}} = 0{,}1$ МПа.

Определить теоретическую мощность N воздуходувки, обеспечивающую требуемый расход воздуха.

Ответ: $N = 39$ кВт.

11.5. Определить мощность, необходимую на создание в аэродинамической трубе диаметром 12 см скорости потока, равной скорости звука при 10 °С и давлении 0,7 МПа, считая к. п. д. винто-моторного агрегата равным 45%.

Ответ: $N = 408$ кВт.

11.6. Определить размеры минимального и выходного сечений сопла Лаваля, если давление воздуха на входе в сопло $p_0 = 0{,}7$ МПа, температура $t_0 = 27$ °С. Наружное давление $p_{\text{ср}} = 0{,}1$ МПа. Расход воздуха $m = 7200$ кг/ч.

Как изменяется скорость и расход, если температура воздуха на входе в сопло станет равной 177 °С? Как нужно изменить сопло, чтобы расход оставался прежним?

Ответ: $f_{\text{мин}} = 12{,}24$ см^2; $f_2 = 19{,}70$ см^2. При $t_0 = 177$ °С скорость увеличится, а расход уменьшится до 5850 кг/ч. Чтобы сохранить его прежним, следует минимальное сечение увеличить до $f_{\text{мин}} = 15{,}10$ см^2.

11.7. Составной частью проектируемой опытной установки является баллон с углекислым газом, давление в котором поддерживается постоянным. За запорным вентилем баллона должно быть поставлено суживающееся сопло.

Рассчитать сопло, т. е. найти значение скорости истечения и диаметр выходного сечения. Заданные для расчета условия: массовый расход вытекающего из сопла газа $m = 0{,}3$ кг/с; давление перед соплом $p_0 = 5{,}5$ МПа; температура $t_0 = 680$ °С. Давление в сосуде, в который вытекает газ, колеблется в пределах от 1 до 2 МПа.

Задачу решить с помощью табл. 16 приложения.

Решение. Так как давление среды не превышает 2,0 МПа, колебание его не повлияет на величину выходного давления (отношение давлений $\frac{p_{\text{ср}}^{\text{макс}}}{p_0} = \frac{2{,}0}{5{,}5} < \beta_{\text{кр}} \approx 0{,}55$), на выходе давление будет критическим, а скорость — звуковая. Главная часть задачи сводится к определению критических параметров, при которых $w_2 = a_2$. Рекомендуется применять вариантный графо-аналитический метод, который заключается в том, что задаются не менее чем четырьмя значениями выходных температур, для которых определяют при помощи таблиц все необходимые параметры и подсчитывают ω_2 и a_2. Затем строят на миллиметровой бумаге совмещенные графики $w_2 = w_2(t_2)$ и $a_2 = a_2(t_2)$. Пересечение этих графиков и опре-

Величина	Температура, °С				Примечания
	500	580	600	620	
π_{02}	35,7	41,43	47,96	55,38	$t_0 = 680$°С
θ_{02}	449,7	396,8	350,8	310,7	$T_0 = 953$ К
$p_2 = p_0 \frac{\pi_{02}}{\pi_{00}}$, МПа	2,34	2,71	3,14	3,62	$p_0 = 5{,}5$ МПа
$v_2 = v_0 \frac{\theta_{02}}{\theta_{00}}$, м³/кг	0,0673	0,0594	0,0525	0,0465	$v_0 = \frac{RT_0}{p_0} = 0{,}0327$ м³/кг
h_2, кДж/кг	770,3	794,0	817,8	841,8	$\pi_{00} = 84{,}06$
u_2, кДж/кг	612,9	632,8	652,9	673,1	$\theta_{00} = 218{,}5$
$h_0 - h_2 = \Delta h$, кДж/кг	144,3	120,6	96,8	72,8	$h_0 = 914{,}6$ кДж/кг
$u_0 - u_2 = \Delta u$, кДж/кг	121,6	101,7	86,7	61,4	$u_0 = 734{,}5$ кДж/кг
$k_{ср} = \frac{\Delta h}{\Delta u}$	1,187	1,186	1,186	1,186	
$w_2 = 44{,}72\sqrt{\Delta h}$, м/с	537	491	440	392	
$a_2 = \sqrt{k_{ср} p_2 v_2}$, м/с	432	437	442	447	

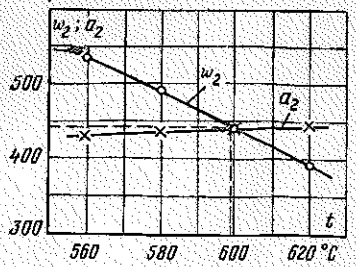


Рис. 11.1. К задаче 11.7.

деляет значения параметров для выходного («критического») сечения сопла.

Ход расчета ясен из приведенной на с. 105 таблицы и рис. 11.1.

Пересечение кривых (рис. 11.1) произошло при $t_2=599$°С и $w_2=442$ м/с. В таблице находим $\theta_2=353{,}0$; $\pi_{02}=47{,}62$; $h_2=816{,}6$ кДж/кг. Определяем p_2 и v_2:

$$p_2 = p_0\frac{\pi_{02}}{\pi_{00}} = 5{,}5\,\frac{47{,}62}{84{,}06} = 3{,}12 \text{ МПа};$$

$$v_2 = v_0\frac{\theta_{02}}{\theta_{00}} = 0{,}0327\,\frac{353{,}0}{218{,}5} = 0{,}0528 \text{ м}^3/\text{кг}.$$

Площадь выходного сечения и его диаметр равны:

$$f = \frac{mv_2}{w_2} = \frac{0{,}300\cdot 0{,}0528}{442} = 35{,}8\cdot 10^{-6} \text{ м}^2 = 35{,}8 \text{ мм}^2;$$

$$d = \sqrt{\frac{4f}{\pi}} = \sqrt{\frac{4\cdot 35{,}8}{3{,}14}} = 6{,}74 \text{ мм}.$$

Наконец, проверяем скорости:

$$w_2 = 44{,}72\sqrt{h_0 - h_2} = 44{,}72\sqrt{914{,}6 - 816{,}6} = 442 \text{ м/с};$$

$$a_2 = \sqrt{k_{\text{ср}}RT_2} = \sqrt{1{,}186\cdot\frac{8314}{44}\cdot 872} = 442 \text{ м/с}.$$

11.8. Определить секундный массовый расход окиси углерода и скорость истечения ее из суживающегося сопла, если известно, что на входе в сопло газ имеет параметры $p_0=0{,}5$ МПа и $t_0=680$ °С. Давление среды, в которую газ вытекает, $p_{\text{ср}}=0{,}3$ МПа. Площадь выходного сечения сопла $f=1$ см^2. Коэффициент скорости $\varphi=1$.

Подсчитать скорость звука в выходном сечении.

Задачу решить при помощи таблиц термодинамических свойств газов, учитывая зависимость энтальпии от температуры.

Ответ: $m=0{,}0630$ кг/с; $w_2=523$ м/с; $a_2=574$ м/с.

11.9. Определить, насколько температура на поверхности ракеты, движущейся со скоростью 1000 м/с, выше температуры окружающей среды за счет торможения воздуха.

Ответ: $\Delta t\approx 500$ К.

11.10. Воздух с начальной скоростью $w_1=250$ м/с при давлении $p_1=1{,}0$ МПа и температуре $t_1=350$ °С вытекает через суживающееся сопло в среду с давлением $p_2=0{,}25$ МПа. Площадь выходного сечения $f=1500$ мм^2. Определить скорость истечения воздуха. При решении воспользоваться табл. 16 приложения.

Решение. Учет начальной скорости потока удобно проводить,

используя параметры полного адиабатного торможения. Считается, что скорость потока w_1 возникает в результате расширения газа от некоторых параметров $p_0 v_0$, соответствующих параметрам торможения (при $w_0=0$), до начальных параметров $p_1 v_1$. При этом формулы для расчета скорости и расхода сохраняют свой обычный вид. В нашем случае режим истечения критический, поэтому для скорости и расхода они будут иметь вид:

$$w_{кр} = w_2 = 44{,}72\sqrt{h_0 - h_{кр}};$$

$$m = \frac{f w_{кр}}{v_{кр}}.$$

Энтальпия адиабатного торможения определяется из уравнения энергии потока при изоэнтропном течении:

$$h_0 + \frac{w^2_0}{2\cdot 10^3} = h_1 + \frac{w^2_1}{2\cdot 10^3},$$

где $w_0=0$.

После подстановки численных значений получим:

$$h_0 = 631{,}8 + \frac{250^2}{2\cdot 10^3} = 663{,}05 \text{ кДж/кг}.$$

Воспользовавшись табл. 13 приложения, из соотношения

$$\frac{p_0}{p_1} = \frac{\pi_{00}}{\pi_{01}},$$

где $\pi_{01}=18{,}712$; $\pi_{00}=22{,}259$ (находим по температуре $T_0=653{,}16$ К и соответствующей энтальпии h_0), определим p_0:

$$p_0 = 10^6 \frac{22{,}259}{18{,}712} = 1{,}19 \text{ МПа}.$$

Остается определить $w_2=w_{кр}$:

$$w_{кр} = 44{,}72\sqrt{h_0 - h_{кр}},$$

где $h_{кр}$ находим по

$$p_{кр} = p_0 \beta_{кр} = 1{,}19\cdot 0{,}528 = 0{,}627 \text{ МПа}.$$

Критическая температура $T_{кр}$ определяется из соотношения

$$\frac{p_0}{p_{кр}} = \frac{\pi_{00}}{\pi_{кр}}; \quad \pi_{кр} = \frac{p_{кр}\pi_{00}}{p_0} = \frac{0{,}627\cdot 22{,}259}{1{,}19} = 11{,}8.$$

$T_{кр}=546$ К, откуда $h_{кр}=550{,}58$ кДж/кг.

Далее вычисляем:

$$w_{кр} = 44{,}72\sqrt{663{,}05 - 550{,}58} = 474 \text{ м/с};$$

$$v_{кр} = \frac{8314\cdot 546}{28{,}96\cdot 6{,}27\cdot 10^5} = 0{,}252 \text{ м}^3/\text{кг};$$

$$m = \frac{1500\cdot 10^{-6}\cdot 474}{0{,}252} = 2{,}81 \text{ кг/с}.$$

11.11. Решить задачу 11.10, считая теплоемкость воздуха не зависящей от температуры.

Ответ: $w_2=470$ м/с; $m=2{,}78$ кг/с.

11.12. Углекислый газ подводится к соплу с начальной скоростью $w_1=200$ м/с при давлении 5 МПа и температуре $t_1=500$ °С и вытекает из него в среду с давлением $p_{ср}=3$ МПа.

Выбрать сопло (суживающееся или Лаваля) и рассчитать площадь его выходного сечения, если известен расход газа $m=5$ кг/с. При решении воспользоваться табл. 16 приложения.

Ответ: Сопло суживающееся, $f=530$ мм².

11.13. Определить площадь отверстия суживающегося насадка, из которого вытекает углекислый газ, имеющий начальную скорость $w_1=250$ м/с при расходе $m=2{,}73$ кг/с. Параметры газа на входе: $p_1=1{,}0$ МПа, $t_1=350$ °С. Давление среды, в которую газ вытекает, $p_{ср}=0{,}25$ МПа. При решении воспользоваться табл. 16 приложения.

Ответ: $f=1{,}14\cdot10^{-3}$ м².

11.14. Воздух на входе в суживающееся сопло с минимальным сечением $f_{мин}=10$ мм² имеет параметры: $p_0=0{,}98$ МПа; $t_0=300$ °С. Отношение $p_{ср}/p_0<\beta_{кр}$.

Определить расход, если к суживающемуся соплу присоединить расширяющийся насадок и получить, таким образом, сопло Лаваля.

Каким должно быть давление на выходе из этого сопла, если оно работает в расчетном режиме и если отношение площадей выходного и минимального сечений $f_2/f_{мин}=1{,}5$?

Определить скорость истечения из этого сопла, пренебрегая потерями на трение и входной скоростью.

Указание. При истечении из суживающегося сопла на выходе имеет место звуковая скорость $w_{кр}=a_2$, так как $p_{ср}/p_0<\beta_{кр}$. Эта же скорость сохранится и в минимальном сечении сопла Лаваля, а, следовательно, расход через него останется таким же, как и расход через суживающееся сопло. Для определения p_2 на выходе из сопла Лаваля необходимо написать уравнение для определения расхода:

$$m=f_{мин}\sqrt{2\frac{k}{k+1}\frac{p_0}{v_0}\left(\frac{2}{k+1}\right)^{\frac{2}{k-1}}}=$$

$$=f_2\sqrt{2\frac{k}{k-1}\frac{p_0}{v_0}\left[\left(\frac{p_2}{p_0}\right)^{\frac{2}{k}}-\left(\frac{p_2}{p_0}\right)^{\frac{k+1}{k}}\right]}$$

и определить, пользуясь им, значение p_2/p_0 (для решения можно использовать графический метод).

Ответ: $m=0{,}01657$ кг/с; $p_2=0{,}158$ МПа; $w_2=684$ м/с.

11.15. Из суживающегося сопла вытекает кислород. Параметры адиабатного торможения, соответствующего входной скорости, $p_0=2$ МПа и $t_0=127$ °С, давление среды $p_{ср}=0{,}2$ МПа.

Потери на трение учитываются коэффициентом скорости $\varphi=0{,}92$.

Определить скорость истечения и секундный расход газа, если площадь выходного сечения $f_2=100$ мм². Воспользоваться табл. 15 приложения.

Решение. При заданных условиях режим истечения критический, на что указывает отношение давлений

$$\beta = \frac{p_{ср}}{p_0} = \frac{0,2}{2,0} = 0,1 < \beta_{кр}.$$

Выходная скорость с учетом потерь может быть рассчитана по формуле

$$w_{2д} = 44,72\varphi \sqrt{h_0 - h_{кр}} = 44,72 \sqrt{h_0 - h_{2д}}.$$

Для нахождения энтальпии при критическом давлении $p_{кр} = 0,528 \cdot 2 = 1,056$ МПа воспользуемся формулой

$$\frac{\pi_{00}}{\pi_{кр}} = \frac{p_1}{p_{кр}}; \quad \pi_{кр} = \frac{\pi_{00} p_{кр}}{p_0} = \frac{1,056 \cdot 14,692}{2} = 7,755.$$

В табл. 16 приложения находим:

$\pi_{00} = 14,692$; $h_0 = 361,4$ кДж/кг; $T_{кр} = 329,65$ К (по $\pi_{кр}$).

Находим $h_{2д}$:

$$h_{2д} = h_{кр} + \eta (h_0 - h_{кр}) = 295,52 + (1 - 0,92^2)(361,4 - 295,52) = 305,7 \text{ кДж/кг},$$

отсюда по таблицам находим

$$T_{2д} = 337 \text{ К};$$

$$w_{2д} = 44,72 \sqrt{361,4 - 305,7} = 44,72 \cdot 7,45 = 334 \text{ м/с}.$$

Определяем удельный объем $v_{2д}$:

$$v_{2д} = \frac{RT_{2д}}{p_{кр}} = \frac{8,314 \cdot 337}{32 \cdot 1,056 \cdot 10^3} = 0,083 \text{ м кг}.$$

Рассчитываем массовый секундный расход:

$$m = \frac{f w_{2д}}{v_{2д}} = \frac{100 \cdot 10^{-6} \cdot 339}{0,083} = 0,403 \text{ кг/с}.$$

11.16. Расход воздуха при истечении его из суживающегося сопла составляет 425 кг/ч. Начальное давление $p_0 = 1,0$ МПа, температура $t_0 = 20$ °С. Воздух вытекает в среду с давлением 100 кПа.

Принимая скоростной коэффициент сопла φ равным 0,93, определить площадь выходного сечения и скорость потока.

Ответ: $f = 55$ мм²; $w_{2д} = 291$ м/с.

11.17. Сжатый воздух вытекает из суживающегося сопла в среду с давлением $p_{ср} = 0,09$ МПа. Начальное давление воздуха $p_0 = 2,5$ МПа, температура $t_0 = 27$ °С. Расход воздуха составляет 0,5 кг/с, скоростной коэффициент сопла $\varphi = 0,9$.

Определить площадь выходного сечения и скорость истечения.

Ответ: $f = 97$ мм²; $w_{2д} = 283$ м/с.

11.18. Определить площадь выходного сечения суживающегося сопла, в котором протекает азот при входных давлении $p_1 = 1,0$ МПа и температуре $t_1 = 217$ °С. Давление за выходным сечением $p_{ср} = 0,1$ МПа. Скоростной коэффициент сопла $\varphi = 0,90$. Газ подходит к соплу со скоростью 220 м/с. Расход $m = 2,7$ кг/с.

Ответ: $f=728$ мм².

11.19. Азот при давлении $p_0=3$ МПа и температуре $t_0=250$ °С вытекает через сопло в среду, давление в которой $p_2=0{,}6$ МПа.

Какого типа сопло нужно выбрать, чтобы получить как можно большую скорость истечения? Определить эту скорость и рассчитать сечения отверстий, если известны: расход $m=0{,}410$ кг/с и скоростной коэффициент сопла $\varphi=0{,}95$. Использовать табл. 14 приложения.

Ответ: нужно установить сопло Лаваля; $w_{2д}=602$ м/с; $f_{мин}=85$ мм²; $f_2=118$ мм².

11.20. Какого типа сопло нужно установить для полного использования располагаемого перепада давлений при истечении кислорода, если его начальные параметры следующие: $p_0=1{,}8$ МПа, $t_0=100$ °С, а давление среды в одном случае 1,2 МПа, в другом 0,7 МПа?

Определить для обоих случаев действительную скорость истечения, если скоростной коэффициент сопла $\varphi=0{,}9$. Воспользоваться табл. 15 приложения.

Ответ: в первом случае сопло суживающееся, $w_{2д}=245$ м/с; во втором случае сопло Лаваля, $w_{2д}=364{,}4$ м/с.

11.21. Какое сопло нужно установить, чтобы полностью использовать располагаемый перепад давлений при истечении воздуха от начальных параметров $p_0=2{,}5$ МПа и $t_0=150$ °С до давления $p_{ср}=1{,}4$ МПа?

Какова действительная скорость истечения, если $\varphi=0{,}9$?

Ответ: сопло суживающееся, $w_{2д}=313{,}53$ м/с.

11.22. Рассчитать сопло Лаваля и найти скорость истечения из него кислорода. Расход кислорода $m=3{,}0$ кг/с; давление на входе постоянное $p_0=1{,}2$ МПа, температура $t_0=230$ °С; давление среды $p_{ср}=0{,}095$ МПа; коэффициент скорости $\varphi=0{,}95$; угол раствора сопла $\gamma=10°$. При решении воспользоваться табл. 15 приложения.

Решение. Сначала находим действительную скорость истечения $w_{2д}$ и рассчитываем выходное сечение:

$$w_{2д}=44{,}72\sqrt{h_0-h_{2д}}.$$

Из таблиц находим $h_0=463{,}7$ кДж/кг. Чтобы определить $h_{2д}$, воспользуемся соотношением

$$\frac{p_0}{p_2}=\frac{\pi_{00}}{\pi_{02}},$$

откуда

$$\pi_{02}=\frac{p_2\pi_{00}}{p_0}=\frac{0{,}095\cdot 34{,}107}{1{,}2}=2{,}7;$$

$\pi_{00}=34{,}107$; $T_2=238$ К; $h_2=224{,}95$ кДж/кг; $h_{2д}=h_2+(1-\varphi^2)\times$

$\times(h_0-h_2)=224{,}95+(1-0{,}95)\,(463{,}7-224{,}95)\cdot 0{,}0975\cdot 238{,}75=$

$=224{,}95+23{,}27=248{,}2$ кДж/кг,

тогда скорость на выходе из сопла Лаваля

$$w_{2д}=44{,}72\sqrt{463{,}7-248{,}2}=656{,}48\text{ м/с}.$$

Для расчета площади выходного сечения сопла необходимо определить удельный объем в состоянии, которое определяется точ-

ой 2д:

$$v_{2д} = \frac{RT_{2д}}{p_2}.$$

Неизвестная температура $T_{2д}$ находится из таблиц по $h_{2д}$:

$$T_{2д} = 273{,}69 \text{ К},$$

следовательно,

$$v_{2д} = \frac{8314 \cdot 273{,}69}{32 \cdot 0{,}095 \cdot 10^6} = 0{,}748 \text{ м}^3/\text{кг}.$$

Выходное сечение f_2 равно:

$$f_2 = \frac{mv_{2д}}{w_{2д}} = \frac{3{,}0 \cdot 0{,}748}{656{,}48} = 0{,}00342 \text{ м}^2;$$

аметр выходного отверстия сопла

$$d_2 = \sqrt{\frac{4f_2}{\pi}} = \sqrt{\frac{4 \cdot 0{,}00342}{3{,}14}} = 0{,}0665 \text{ м} \approx 66 \text{ мм}.$$

Теперь необходимо рассчитать минимальное сечение сопла. Рассмотрим h, s-диаграмму процесса расширения газа в сопле (рис. 11.2), на которой нанесена изоэнтропа *1-3-2* и условно пунктиром необратимая адиабата *1-4-5-2д*, построенная на основании заданного коэффициента потери энергии $\eta = 1 - \varphi^2$. Рассматривая диаграмму, мы видим, что звуковая скорость достигается в точке *5*, для которой справедливо соотношение

$$w_{кр} = a = 44{,}72\varphi\sqrt{h_0 - h_3} = 44{,}72\sqrt{h_0 - h_5}.$$

Через эту точку проходит изобара $p_{кр.д}$, соответствующая меньшему давлению, чем $p_{кр.теор} = \beta_{кр} p_0$. С очень малой погрешностью можно считать, что пересечение изобары $p_{кр.теор}$ с пунктирной кривой действительного процесса расширения дает точку *4*, соответствующую состоянию газа в минимальном сечении сопла. Физически это значит, что газ, пройдя минимальное сечение, в котором он еще не достигнет звуковой скорости [1], далее продолжает расширяться и на некотором небольшом расстоянии от минимального сечения сопла при давлении $p_{кр.д}$ получает скорость, равную местной скорости звука (точка *5*).

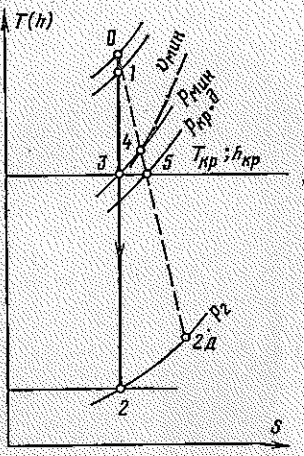


Рис. 11.2. К задаче 11.22.

На основании сказанного выше скорость в минимальном сечении (точка *4*) равна:

$$w_{мин} = 44{,}72\varphi\sqrt{h_0 - h_3} = 44{,}72\sqrt{h_0 - h_4},$$

[1] Факт «переноса» критического сечения в расширяющуюся часть подтверждается законом обращения воздействия.

где $h_4 = h_{мин}$ находится из формулы

$$h_{мин} = h_3 + \eta_1 (h_0 - h_3).$$

Энтальпия в точке 3 находится по температуре T_3, определяемой из соотношений

$$\frac{\pi_{02}}{\pi_{03}} = \frac{p_0}{p_3}; \quad \pi_{03} = \frac{\pi_{02} p_0}{p_0} = \frac{34,107 \cdot 0,633}{1,2} = 17,99,$$

где

$$p_3 = p_{мин} = \beta_{кр} p_{01} = 0,528 \cdot 1,2 = 0,633 \text{ МПа};$$

из таблиц находим: $h_3 = 386,9$ кДж/кг; $T_3 = 423,15$ К, тогда

$$h_{мин} = 386,9 + (1 - 0,95^2)(463,7 - 386,9) = 394,383 \text{ кДж/кг};$$

$$w_{мин} = 44,72 \sqrt{463,7 - 394,38} = 44,72 \cdot 8,325 = 368 \text{ м/с}.$$

Удельный объем $v_{мин}$ находится из формулы

$$v_{мин} = \frac{RT_{мин}}{p_{мин}} = \frac{8314 \cdot 423,15}{32 \cdot 0,633 \cdot 10^6} = 0,1736 \text{ м}^3/\text{кг}.$$

Площадь минимального сечения

$$f_{мин} = \frac{m v_{мин}}{w_{мин}} = \frac{3 \cdot 0,1736}{368} = 0,001415 \text{ м}^2.$$

Диаметр

$$d_{мин} = \sqrt{\frac{4 \cdot 0,001415}{3,14}} = 0,0424 \text{ м} \approx 42 \text{ мм}.$$

Рассчитываем длину расширяющейся части:

$$l = \frac{d_2 - d_{мин}}{2 \operatorname{tg} \frac{\gamma}{2}} = \frac{66 - 42}{2 \cdot 0,0875} = 137 \text{ мм}.$$

11.23. Из суживающегося сопла вытекает воздух в среду, где давление $p_{ср} = 0,1$ МПа. Давление воздуха перед соплом $p_0 = 2,8$ МПа и температура $t_0 = 480$ °С. Известны коэффициент скорости $\varphi = 0,96$ и площадь выходного отверстия $f = 2,0$ см². Определить скорость истечения и часовой массовый расход газа. Задачу решать при помощи табл. 13 приложения, считая энтальпию зависящей от температуры.

Ответ: $w_{2д} = 480$ м/с; $m = 2790$ кг/ч.

11.24. Из баллона воздух через вентиль с проходным сечением площадью 20 мм² вытекает в атмосферу (где давление $p_2 = 0,1$ МПа). Определить давление p_1, которое установится в баллоне через $\tau = 150$ с после начала истечения, если начальные параметры воздуха: $p_1 = 4,0$ МПа, $t_1 = 15$ °С. Объем баллона $v = 400$ дм³. Истечение происходит изоэнтропно.

Решение. В начальный момент отношение давлений $\beta = \frac{p_2}{p_1} = \frac{0{,}1}{4{,}0} = 0{,}025$, т. е. $\beta < \beta_{кр} = 0{,}528$. Это значит, что истечение начинается при звуковой скорости. Звуковой режим продолжается до тех пор, пока давление p в баллоне оказывается более высоким, чем то давление, для которого постоянное давление среды p_2 является критическим. При дальнейшем уменьшении давления в баллоне режим истечения становится дозвуковым.

Необходимо определить время, в течение которого происходит вытекание газа со скоростью, равной местной скорости звука. Для этого составляет уравнение материального баланса:

$$-dM = m d\tau, \tag{1}$$

где M — масса газа в баллоне в данный момент времени при текущих значениях давления p и удельного объема v; m — мгновенное значение массового расхода газа.

Так как нас интересует время, на протяжении которого сохраняется условие $\beta < \beta_{кр}$, значение m должно быть определено по формуле

$$m = f \sqrt{2 \frac{k}{k+1} \frac{p}{v} \left(\frac{2}{k+1}\right)^{\frac{2}{k-1}}}; \tag{2}$$

заменяя v на RT/p, после преобразований получаем:

$$m = f \frac{p}{\sqrt{RT}} \sqrt{2 \frac{k}{k+1} \left(\frac{2}{k+1}\right)^{\frac{2}{k-1}}} = f\psi \frac{p_1}{\sqrt{RT}}. \tag{3}$$

Подставляя значение m из (3) в (1), находим:

$$-dM = f\psi \frac{p}{\sqrt{RT}} d\tau. \tag{4}$$

Величина $M = V/v$, где V — объем баллона. Значит, $dM = \frac{-V}{v^2} dv$. Удельный объем v следует выразить через давление p. Для этого примем, что температура в баллоне не меняется, т. е. $t = t_1 = \text{const}$ (это достоверно при достаточно медленном выпуске газа, т. е. при малых открытиях вентиля). Тогда изменение состояния содержимого баллона можно описать уравнением изотермы

$$dv = -v \frac{dp}{p}, \tag{5}$$

следовательно,

$$-dM = -\frac{V}{pv} dp. \tag{6}$$

Подставляя (6) в (4), получаем:

$$-\frac{V}{pv} dp = f\psi \frac{p}{\sqrt{RT_1}} d\tau. \tag{7}$$

Разделяем переменные и заменяем pv на RT:

$$d\tau = -\frac{V\sqrt{RT_1}}{f\psi pv}\frac{dp}{p} = \frac{V}{f\psi\sqrt{RT_1}}\frac{dp}{p}. \qquad (8)$$

Интегрируем уравнение (8) в пределах от p_1 до p и от 0 до τ:

$$\tau = -\frac{V}{f\psi\sqrt{RT_1}}\ln\frac{p}{p_1} = \frac{V}{f\psi\sqrt{RT_1}}\ln\frac{p_1}{p}. \qquad (9)$$

Ранее указывалось, что звуковой режим истечения продолжается до тех пор, пока давление p не становится равным такому давлению, для которого постоянное давление среды p_2 является критическим. Именно это текущее значение давления p, равное

$$\frac{p_{кр}}{\beta_{кр}} = \frac{p_2}{\beta_{кр}} = \frac{1}{0{,}528} = 0{,}1894 \text{ МПа},$$

и следует подставить в (9) для определения времени сохранения звукового режима. Вычисляем его [1]:

$$\tau = \frac{V}{f\psi\sqrt{RT_1}}\ln\frac{p_1\beta_{кр}}{p_2} = \frac{0{,}4\cdot 2{,}303\lg\left(\dfrac{4{,}0}{0{,}1894}\right)}{20\cdot 10^{-6}\cdot 0{,}685\sqrt{\dfrac{8314}{28{,}96}\,288}} = 310 \text{ с}.$$

По условию задачи истечение газа длится всего 150 с. Это значит, что режим истечения все время звуковой и, следовательно, для расчета того давления p_i, которое установится спустя 150 с после начала истечения, нужно пользоваться формулой (9). Из этой формулы находим $p_i = p$:

$$\lg\frac{p_1}{p_i} = \frac{\tau f\psi\sqrt{RT_1}}{2{,}303V} = \frac{150\cdot 20\cdot 10^{-6}\cdot 0{,}685\sqrt{\dfrac{8314}{28{,}96}\,288}}{2{,}303\cdot 0{,}4} = 0{,}641;$$

$$\frac{p_1}{p_i} = 4{,}375; \qquad p_i = \frac{4{,}0}{4{,}375} = 0{,}91 \text{ МПа}.$$

11.25. Из резервуара объемом $V=5$ м³ вытекает в атмосферу воздух. Давление среды $p_2=0{,}1$ МПа. Начальные параметры воздуха в резервуаре: $p_1=3$ МПа, $t_1=100$ °С, сечение выходного отверстия $f=5$ мм². Процесс изменения состояния воздуха в резервуаре считать изотермическим, а истечение — адиабатным.

Определить время, необходимое для понижения давления в резервуаре до $p_i=1{,}4$ МПа.

Ответ: $\tau=57$ мин 24 с.

11.26. В пусковом баллоне двигателя Дизеля емкостью 60 дм³ находится сжатый воздух при давлении 6,0 МПа и температуре 20 °С. При запуске двигателя воздух вытекает через отверстие диаметром 5 мм в цилиндр, где давление $p_2=0{,}1$ МПа.

[1] Значение коэффициента ψ нужно взять из таблицы (см. решение задачи 11.3).

Определить время, необходимое для падения давления в баллоне до 1,2 МПа, и температуру воздуха при этом давлении. Коэффициент расхода $\mu=0{,}6$ *, давление в баллоне падает по политропе с показателем $n=1{,}25$.

Решение. Как и в задаче 11.24, для получения взаимозависимости между временем истечения и давлением в сосуде используется уравнение баланса количества газа, но с учетом, что расширение газа в баллоне происходит политропно и температура находящегося в нем газа изменяется согласно соотношению $T=T_1\left(\frac{p}{p_1}\right)^{\frac{n-1}{n}}$.

Искомое дифференциальное уравнение принимает вид:

$$-\frac{V}{npv}\,dp=\mu f\psi\,\frac{p}{\sqrt{RT}}\,d\tau,$$

или, так как $T=T_1\left(\frac{p}{p_1}\right)^{\frac{n-1}{n}}$,

$$d\tau=-\frac{V}{n\mu\varphi f\sqrt{RT_1}\sqrt{\left(\frac{p}{p_1}\right)^{\frac{n-1}{n}}}}\,\frac{dp}{p}.$$

После преобразований получаем:

$$d\tau=-\frac{V}{n\mu\psi f\sqrt{RT_1}}\,\frac{p_1^{\frac{n-1}{2n}}}{p^{\frac{3n-1}{2n}}}\,dp.$$

Интегрируя в пределах от p_1 до p (где p — текущее значение давления), получаем время истечения:

$$\tau=\frac{V}{f\mu\psi\sqrt{RT_1}}\,\frac{2}{n-1}\left[\left(\frac{p_1}{p}\right)^{\frac{n-1}{n}}-1\right].$$

В начальный момент истечения отношение давлений $\beta_{нач}=p_2/p_1=0{,}1/6{,}0$, а в конечный $\beta_{кон}=0{,}1/1{,}2$. Оба эти значения меньше $\beta_{кр}$. Значит, истечение все время происходит в звуковом режиме, поэтому время истечения нужно подсчитывать по выведенной формуле. Подставляя численные значения ($\psi=0{,}685$), получаем:

$$\tau=\frac{6{,}0\cdot10^{-3}}{0{,}6\cdot0{,}785\cdot25\cdot10^{-6}\cdot0{,}685\sqrt{\frac{8314}{28{,}96}\,293}}\times$$

$$\times\frac{2}{1{,}25-1}\left[\left(\frac{6{,}0}{1{,}2}\right)^{\frac{0{,}25}{2{,}5}}-1\right]=36\text{ с}.$$

* Коэффициентом расхода называется отношение действительного (за вычетом потерь) расхода к теоретическому.

Температура в конце расширения

$$T = T_1 \left(\frac{p}{p_1}\right)^{\frac{n-1}{n}} = 293 \left(\frac{1,2}{6,0}\right)^{\frac{1,25-1}{1,25}} = 208 \text{ К}.$$

11.27. Сжатый кислород из резервуара объемом 0,8 м³ при давлении 3,0 МПа вытекает в окислительную камеру, где давление составляет 0,12 МПа. Истечение происходит через отверстие диаметром 10 мм. Коэффициент расхода $\mu = 0{,}65$. Начальная температура кислорода 20 °С.

Через сколько времени давление в резервуаре понизится до 0,3 МПа? Расчет произвести для двух случаев: 1) состояние кислорода меняется по политропе с показателем $n = 1{,}25$; 2) состояние кислорода в резервуаре изменяется по изотерме.

Ответ: 1) при $n = 1{,}25$ $\tau = 173$ с;
2) при $n = 1$ $\tau = 191$ с.

11.28. Газ, обладающий свойствами воздуха, поступает к соплам газовой турбины, имея параметры $p = 3{,}0$ МПа и $t = 700$ °С. Параметры окружающей среды: $p_{ср} = 0{,}1$ МПа и $t_{ср} = 20$ °С.

Каково значение эксергии этого газа?

Ответ: $ex = 639$ кДж/кг.

11.29. В процессе адиабатного расширения газов в турбине параметры их изменяются от $p_1 = 0{,}6$ МПа и $t_1 = 700$ °С до $p_2 = 0{,}1$ МПа.

Определить изменение эксергии газового потока, считая, что рабочее тело обладает свойствами воздуха с не зависящей от температуры теплоемкостью.

Параметры среды: $t_{ср} = 20$ °С и $p_{ср} = 0{,}1$ МПа.

Ответ: $\Delta ex = 391$ кДж/кг.

11.30. Решить задачу 11.29 с применением табл. 13 приложения, считая теплоемкость зависящей от температуры.

Ответ: $\Delta ex = 394{,}5$ кДж/кг.

11.31. Сопло Лаваля с минимальным сечением $f_{мин} = 10$ мм² и $f_2 = 1{,}5 f_{мин}$ работает при следующих условиях: рабочее тело — воздух, $p_0 = 1$ МПа, $t_0 = 300$ °С, $p_{ср} = 0{,}7$ МПа.

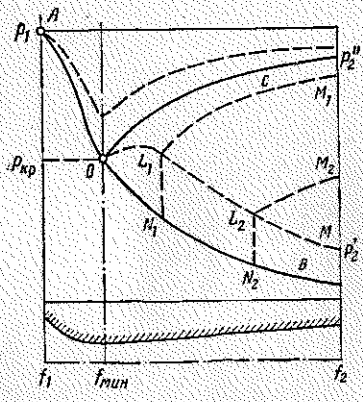


Рис. 11.3. К задаче 11.31.

Определить секундный расход, пренебрегая потерями на трение и значением входной скорости.

Решение. Сопло работает в неблагоприятных для него условиях нерасчетного режима. Оно было рассчитано на меньшее, чем заданное в условии задачи, давление среды, при котором справедливо соотношение

$$p_{ср} = p_{2расч} < p_{кр} = \beta_{кр} p_0.$$

Сопло же работает в других условиях, когда

$$p_{ср} = p_2 > p_{кр} = \beta_{кр} p_0.$$

Если превышение давления незначительно, то внутри сопла сохранится расчетный режим (кривая AOB на рис. 11.3), и

а пределами сопла в струе возникают так называемые скачки уплотнения, за которыми скорость резко падает. Если давление среды станет больше некоторого значения p'_2, то скачки уплотнения войдут внутрь сопла, нарушая режим течения. С дальнейшим увеличением давления среды скачок передвигается внутрь сопла (рис. 11.3, линии $N_2L_2M_2$; $N_1L_1M_1$), в результате чего давление внутри сопла повышается (линии N_2L_2, N_1L_1), а скорость понизится и станет дозвуковой. Таким образом, на участках L_2M_2, L_1M_1 и т. д. расширяющаяся часть сопла работает как диффузор. При некотором значении давления среды $p_{ср}=p''_2$ скачок уплотнения входит в минимальное сечение и там исчезает. Процесс пойдет по линии AOC. В минимальном сечении будет критическое давление, но скорость, равная в этом сечении значению местной скорости звука, далее не переходит в сверхзвуковую, а, наоборот, убывает на всем протяжении расширяющейся части. Давление же соответственно возрастает до $p''_2=p_{ср}$. В этом случае вся расширяющаяся часть начинает работать в диффузорном режиме. Если давление среды продолжает расти, скорость в минимальном сечении оказывается меньшей, чем звуковая, а давление — бо́льшим, чем критическое. Все сопло Лаваля при этом работает в дозвуковом режиме — расход через него уменьшается по мере роста давления среды. Этот режим показан на рис. 11.3 пунктирной линией.

Для того чтобы решить поставленную задачу, необходимо определить значение давления p''_2, после чего можно будет судить, будет ли при заданных условиях расход максимальным или меньшим, чем $m_{макс}$. Для нахождения p''_2 нужно приравнять максимальный расход к расходу в выходном сечении (на основании уравнения неразрывности), т. е.

$$f_{мин}\sqrt{2\frac{k}{k+1}\frac{p_0}{v_0}\left(\frac{2}{k+1}\right)^{\frac{2}{k-1}}}=$$

$$=f_2\sqrt{2\frac{k}{k-1}\frac{p_0}{v_0}\left[\left(\frac{p''_2}{p_0}\right)^{\frac{2}{k}}-\left(\frac{p}{p_0}\right)^{\frac{k+1}{k}}\right]}.$$

Из этого соотношения можно определить $p''_2/p_0=\beta$. Возводя левую и правую части в квадрат и сокращая на $2p_0/v_0$, получаем:

$$\frac{k-1}{k+1}\left(\frac{2}{k+1}\right)^{\frac{2}{k-1}}=\left(\frac{f_2}{f_{мин}}\right)^2\left(\beta^{\frac{2}{k}}-\beta^{\frac{k+1}{k}}\right)=\left(\frac{f_2}{f_{мин}}\right)^2\beta^{\frac{2}{k}}\left(1-\beta^{\frac{k-1}{k}}\right).$$

В этом уравнении $k=1{,}4$ и $f_2/f_{мин}=1{,}5$. Уравнение решается подбором или графически. В результате решения получаем:

$$\beta=\frac{p''_2}{p_0}=0{,}8806.$$

Таким образом, $p''_2=0{,}8806p_0=0{,}8806$ МПа. Так как по условию $p_{ср}=0{,}7$ МПа, заключаем, что в минимальном сечении оказываются звуковая скорость, максимальный расход и $p_{мин}=p_{кр}$. На некотором расстоянии от минимального сечения происходит прямой скачок уплотнения, переводящий режим течения из сверхзвукового в дозвуковой [1].

[1] Место возникновения скачка, его величина и положение точки M (т. е. кривую OL_1L_2M) здесь не определяются. Этот вопрос рассматривается в работах по газовой динамике (см., например, [11]).

Изменение давления вдоль сопла качественно может быть опи
сано, например, кривой AON, L, M.

Расход через сопло равен:

$$m = m_{\text{макс}} = \psi f_{\text{мин}} \sqrt{\frac{p_0}{v_0}} = 10 \cdot 10^{-6} \cdot 0{,}685 \sqrt{\frac{1 \cdot 10^6}{0{,}1644}} = 0{,}01689 \text{ кг/с}$$

здесь $0{,}1644 = \frac{RT_0}{p_0} = \frac{8314 \cdot 573}{28{,}96 \cdot 1 \cdot 10^6}$ м³/кг.

11.32. Начальные параметры водяного пара, поступающего к соп
лу, следующие: $p_0 = 4{,}5$ МПа; $t_0 = 350$ °С; давление за соплом $p_{\text{ср}} =$
$= 2{,}4$ МПа. Расход пара 0,5 кг/с. Выбрать тип сопла и рассчитат
площадь выходного сечения.

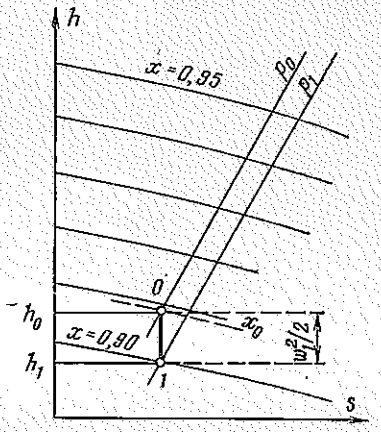


Рис. 11.4. К задаче 11.34.

Представить процесс в h
s-диаграмме.

Ответ: $f_2 = 86$ мм².

11.33. Паровая турбина
имеет два сопла с выходными
сечениями $f = 4$ см² каждое. К
соплам подводится пар при
давлении $p_0 = 10{,}0$ МПа и тем-
пературе $t_0 = 500$°С. В резуль-
тате адиабатного расширения
давление падает до $p_2 =$
$= 6{,}0$ МПа.

Определить тип сопла, се-
кундный расход пара и теоре-
тическую мощность, которую
можно получить от турбины,
пренебрегая трением струи в
канале сопла и начальной ско-
ростью.

Ответ: $m = 0{,}457$ кг/с че-
рез каждое сопло; $N =$
$= 142{,}4$ кВт.

11.34. В трубе течет водяной пар, параметры которого: $p_1 =$
$= 0{,}18$ МПа; $x_1 = 0{,}90$; $w_1 = 250$ м/с.

Найти параметры полного адиабатного торможения потока.

Указание. Отложить в h, s-диаграмме от точки *1* вверх по изо
энтропе величину $\Delta h = \frac{w^2}{2 \cdot 10^3}$ кДж/кг. Полученная точка соот
ветствует состоянию с параметрами торможения (рис. 11.4).

Ответ: $p_0 = 0{,}22$ МПа; $t_0 = 122$ °С; $x_0 = 0{,}909$; $h_0 = 2312$ кДж/кг

11.35. Водяной пар с начальной скоростью $w_1 = 200$ м/с при
давлении $p_1 = 2{,}0$ МПа и $t_1 = 400$ °С вытекает через суживающееся
сопло в среду с давлением $p_2 = 0{,}6$ МПа.

Определить расход и выходную скорость пара. Площадь выход-
ного сечения принять равной 1000 мм². Потерями на трение пре
небречь.

Ответ: $w_2 = 572$ м/с; $m = 2{,}3$ кг/с.

11.36. По трубе течет пар с начальной скоростью $w_1 = 300$ м/с;
его параметры $p_1 = 1{,}5$ МПа; $t_1 = 300$ °С.

Определить, насколько действительная температура отличается
от температуры пара, фиксируемой термометром, если считать, что
термометр показывает температуру торможения.

Ответ: $\Delta t = 20\ ^\circ C$.

11.37. Рассчитать основные размеры сопла Лаваля, если водяной пар с начальным давлением $p_0 = 2{,}0$ МПа и температурой $t_0 = 350\ ^\circ C$ изоэнтропно расширяется до давления $p_2 = 0{,}9$ МПа. Расход пара составляет 0,5 т/ч .

Ответ: $f_2 = 208$ мм^2; $f_{мин} = 54$ мм^2; $l = 45$ мм.

11.38. Водяной пар расширяется в сопле Лаваля от $p_0 = 3{,}5$ МПа и $t_0 = 450\ ^\circ C$ до $p_2 = 0{,}05$ МПа.

Определить скорость истечения и размеры сопла, если коэффициент потери энергии $\eta = 0{,}12$, а расход $m = 0{,}5$ кг/с.

Решение. Определяем приближенно критическое давление, принимая значение $\beta_{кр} = 0{,}546$:

$$p_{кр} = \beta_{кр} p_0 = 0{,}546 \cdot 3{,}5 = 1{,}911 \text{ МПа}.$$

Процесс изменения состояния перегретого пара при изоэнтропном его течении может быть описан уравнением адиабаты $pv^k = \text{const}$, в котором $k = (\partial h / \partial u)_s$. Значение k зависит от термических параметров состояния и меняется на протяжении процесса расширения при течении. На участке от входного сечения до минимального среднее значение k нужно подсчитать по формуле

$$k = \frac{\lg \dfrac{p_0}{p_{кр}}}{\lg \dfrac{v_{кр}}{v_0}},$$

в которой v_0 и $v_{кр}$ — удельные объемы пара, взятые из диаграммы (или, что еще точнее, из таблиц) при условии $s = \text{const}$.

Подсчитываем значение k:

$$k = \frac{\dfrac{3{,}5}{1{,}911}}{\dfrac{0{,}147}{0{,}092}} = 1{,}288.$$

Подсчитываем $\beta_{кр}$ по найденному показателю k:

$$\beta_{кр} = \left(\frac{2}{k+1}\right)^{\frac{k}{k-1}} = \frac{2}{2{,}288} = 0{,}547.$$

Мы видим, что уточненное значение критического давления, равное $0{,}547 \cdot 3{,}5 = 1{,}915$ МПа, очень мало отличается от принятого (в противном случае задачу надо решать методом последовательного приближения), поэтому оставляем значение критического давления $p_{кр} = 1{,}911$ МПа.

Предполагая коэффициент скорости φ не меняющимся в направлении движения, определяем его значение:

$$\varphi = \sqrt{1 - \eta} = \sqrt{1 - 0{,}12} = 0{,}938.$$

При истечении с трением поток приобретает критическую скорость не в минимальном сечении, а в начальной части расширяющегося насадка, однако заданный расход пара ограничивается минимальным сечением. Давление в этом сечении считаем с весьма малой погрешностью равным давлению в минимальном сечении при истечении без трения, т. е. $p_{мин} = p_{кр}$.

Действительную скорость пара в рассматриваемом сечении определяем из уравнения

$$w_{\text{мин.д}} = \varphi \sqrt{2 \cdot 10^3 (h_0 - h_{\text{кр}})} = 0{,}938 \cdot 44{,}72 \sqrt{3336 - 3154} = 565 \text{ м/с}$$

Чтобы определить площадь минимального и выходного сечения необходимо найти действительный удельный объем пара в этих сечениях. Для этого на h, s-диаграмме следует отложить точки, соответствующие действительному (с учетом трения) состоянию пара. Находим сначала на h, s-диаграмме (или с помощью таблиц) энтальпию $h_{\text{ср}} = 3154$ кДж/кг и $h_2 = 2435$ кДж/кг в конце теоретического (изоэнтропного) процесса, а затем подсчитываем энтальпию в минимальном и выходном сечениях:

$$h_{\text{мин.д}} = h_{\text{кр}} + \eta (h_0 - h_{\text{кр}}) = 3154 + 0{,}12 (3336 - 3154) = 3176 \text{ кДж/кг};$$

$$h_{2\text{д}} = h_2 + \eta (h - h_2) = 2435 + 0{,}12 (3336 - 2435) = 2543 \text{ кДж/кг}.$$

Отложив на изобарах $p = p_{\text{кр}}$ и $p = p_2$ полученные энтальпии, фиксируем искомые точки и находим, что $v_{\text{мин}} = 0{,}147$ м³/кг, $v_{2\text{д}} = 3{,}1$ м³/кг.

Площадь минимального сечения

$$f_{\text{мин}} = \frac{0{,}5 \cdot 0{,}147}{565} = 0{,}00130 \text{ м}^2 = 130 \text{ мм}^2.$$

Выходная скорость

$$w_{2\text{д}} = 44{,}72 \sqrt{h_0 - h_{2\text{д}}} = 44{,}72 \sqrt{3336 - 2543} = 1260 \text{ м/с}.$$

Площадь выходного сечения

$$f_2 = \frac{0{,}5 \cdot 3{,}1}{1260} = 0{,}00123 \text{ м}^2 = 1230 \text{ мм}^2.$$

Если расширяющийся насадок имеет форму прямого конуса, то

$$d_{\text{мин}} = \sqrt{\frac{f_{\text{мин}}}{0{,}785}} = \sqrt{\frac{130}{0{,}785}} = 13 \text{ мм};$$

$$d_2 = \sqrt{\frac{f_2}{0{,}785}} = \sqrt{\frac{1230}{0{,}785}} = 40 \text{ мм}.$$

Приняв угол конусности $\gamma = 12°$, находим длину расширяющейся части сопла:

$$l = \frac{d_2 - d_{\text{мин}}}{2 \operatorname{tg} \frac{\gamma}{2}} = \frac{40 - 13}{2 \cdot 0{,}15} = 129 \text{ мм}.$$

11.39. Определить скорость струи пара на выходе из сопла Лаваля и потерю кинетической энергии вследствие трения, если состояние пара на входе в сопло определяется давлением $p_1 = 6{,}0$ МПа и температурой $t_1 = 450$ °С; давление на выходе из сопла $p_2 = 1{,}2$ МПа, скоростной коэффициент сопла $\varphi = 0{,}94$, начальная скорость $w_1 = 200$ м/с.

Ответ: $w_2 = 880$ м/с; $\Delta h_{\text{тр}} = 51{,}5$ кДж/кг.

11.40. Определить эксергию потока водяного пара при $p = 10{,}0$ МПа и $t = 500$ °С, если температура среды $t_0 = 20$ °С, а $p_0 = 0{,}1$ МПа.

Ответ: $ex = 1438$ кДж/кг.

11.41. Водяной пар расширяется изоэнтропно в потоке при $t_1 = 550$ °С от $p_1 = 8{,}0$ МПа до $p_2 = 0{,}004$ МПа, причем полезная техническая работа, произведенная в процессе, отводится потребителю. Определить уменьшение эксергии 1 кг пара.

Ответ: $ex_1 - ex_2 = 1449$ кДж/кг.

11.42. Влажный пар при $p_0 = 0{,}25$ МПа и $x_0 = 0{,}98$ адиабатически расширяется в суживающемся сопле до $p_2 = 0{,}12$ МПа.

Определить скорость истечения и секундный расход пара, если площадь выходного сечения сопла $f = 400$ мм².

Пояснение. Опыты, проведенные при адиабатном течении слабо перегретого и насыщенного пара, показывают, что при достижении давления насыщения пар не сразу начинает конденсироваться, а некоторое время остается в однофазном, метастабильном, переохлажденном состоянии. Температура его становится меньшей, чем температура насыщения, соответствующая тому давлению, которое пар в данный момент имеет. Переохлаждение $\Delta t = t_s - t_п$ иногда бывает значительным и достигает 60—70 °С. Конденсация начинается в свободной струе, если пар вытекает из суживающегося сопла. При течении в сопле Лаваля конденсация начинается в расширяющейся его части и протекает скачкообразно. Место возникновения «скачка конденсации» определяется многими факторами (величиной перегрева пара на входе в сопло или начальной влажностью, отношением давлений $\beta = p_{ср}/p_0$, числом Рейнольдса, формой сопла).

Расчет сопла обычно производится с учетом опытных значений коэффициента расхода. Если их не имеется в распоряжении расчетчика, можно с не очень большой погрешностью считать, что процесс расширения идет равновесно и что пар подчиняется уравнению $pv^k = \text{const}$, и принимать $k = 1{,}3$. Ответ на задачу справедлив при этом условии.

Ответ: $w_2 = 447$ м/с; $m = 0{,}156$ кг/с.

11.43. Давление сухого насыщенного пара на входе в суживающееся сопло $p_0 = 0{,}32$ МПа. За соплом давление среды $p_{ср} = 0{,}12$ МПа.

Определить площадь выходного сечения сопла, если секундный расход пара $m = 0{,}5$ кг/с, а скоростной коэффициент сопла $\varphi = 0{,}96$.

Замечание. Учесть пояснение к задаче 11.42.

Ответ: $f = 1390$ мм².

11.44. Пар при начальных параметрах $p_0 = 13{,}0$ МПа и $t_0 = 580$ °С вытекает из расширяющегося сопла в среду с давлением 0,1 МПа. Площадь минимального сечения $f_{мин} = 3$ см².

Определить секундный расход пара, скорость истечения и площадь выходного сечения сопла. Потерями в сопле и начальной скоростью пренебречь.

Задачу решать, сравнивая критическую скорость с местной скоростью звука.

Решение. Отношение давлений $\beta = p_{ср}/p_0 = 0{,}1/13{,}0 = 0{,}0077$; $\beta < \beta_{кр} \approx 0{,}55$, поэтому при расчетном режиме в расширяющейся части поток будет сверхзвуковым, а в минимальном сечении будет критическая скорость, м/с,

$$w_{кр} = \sqrt{2 \cdot 10^3 (h_0 - h_{кр})},$$

если энтальпия измеряется в килоджоулях на килограмм. Эта скорость равна местной скорости звука, м/с, которая в самом общем

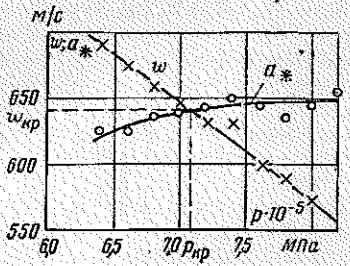


Рис. 11.5. К задаче 11.44.

случае должна быть подсчитан по формуле

$$a_* = \sqrt{-v^2\left(\frac{\partial p}{\partial v}\right)_s},$$

где p берется в паскалях.

Для нахождения параметров в минимальном сечении («критических») нужно сделать тождественно равными выражения для $w_{кр}$ и a_*, т. е. добиться, чтобы

$$\sqrt{2\cdot 10^3\,(h_0 - h_{кр})} = \sqrt{-v^2\left(\frac{\partial p}{\partial v}\right)_s}.$$

Эту задачу можно выполнить, пользуясь таблицами свойств водяного пара, заменяя $(\partial p/\partial v)_s \approx (\Delta p/\Delta v)_s$, т. е. через первые табличные разности при постоянной энтропии. По таблицам [4] находим значения $s=6{,}698$ кДж/(кг·К) и $h_0=3543$ кДж/кг, затем составляем расчетную таблицу $(w,\ a_*)=f(p)$. Интервалы для давле-

p, МПа	v, м³/кг	h, кДж/кг	$\left(\frac{\Delta p}{\Delta v}\right)_s \cdot 10^{-8}$	a_*, м/с	w, м/с
6,2	0,05037	3297	—	—	—
6,4	0,04914	3307	—1,625	625	689
6,6	0,04794	3316	—1,670	624	674
6,8	0,04686	3326	—1,852	635	658
7,0	0,04581	3335	—2,01	641	645
7,2	0,04483	3345	—2,041	641	630
7,4	0,04385	3353,5	—2,222	650	630
7,6	0,04296	3363,7	—2,250	643	599
7,8	0,04207	3369,25	—2,250	635	590
8,0	0,04125	3378,2	—2,440	644	573
8,2	0,04049	3389,2	—2,630	654	555

ния выбираем при критическом давлении $p_{кр}\approx 0{,}55\cdot 13{,}0=7{,}1$ МПа.

При составлении таблицы величины v и h находим, линейно интерполируя при $s=6{,}698=\text{const}$. После этого строим графики $(w,\ a_*)=f(p)$, представленные на рис. 11.5[1]. Очевидно, что пересечение кривых дает положение критической точки, для которой $p_{кр}=7{,}08$ МПа; $w_{кр}=640$ м/с.

Дальнейшее решение задачи проводится обычным порядком. Удельный объем в минимальном сечении находится из составленной нами таблицы, значения h_2 и v_2 подсчитываются при помощи таблиц водяного пара при $s=\text{const}=6{,}698$ кДж/(кг·К) или находятся по h, s-диаграмме.

[1] Разбег точек кривой $a_*=f(p)$ объясняется некоторой негладкостью таблиц водяного пара.

Ответ: $w_2=1493$ м/с; $m=0{,}421$ кг/с; $f_2=42{,}4$ см^2.

11.45. С целью регулирования мощности турбин применяется дросселирование пара, приводящее к потере работоспособности.

Построить график зависимости удельной полезной работы турбины от давления p'_1 перед соплом турбины, приняв $p'_1=2{,}0$; 1,8; 1,6; 1,4; 1,2 и 1,0 МПа. Начальные параметры пара: $p_1=2{,}5$ МПа; $t_1=340$ °С.

Пар изоэнтропно расширяется до $p_2=0{,}005$ МПа.

11.46. Определить изменение эксергии воздушного потока при дросселировании и температуру в конце процесса, если давление воздуха понижается от $p_1=1{,}0$ МПа до $p_2=0{,}7$ МПа. Начальная температура $t_1=120$ °С, температура среды $t_0=20$ °С.

Ответ: $\Delta ex=32$ кДж/кг; $t_2=t_1=120$ °С.

11.47. Для определения состояния пара в трубопроводе применяется дроссель-калориметр. В этом калориметре пар дросселируется, при этом измеряют его температуру и давление.

Определить начальное состояние пара, если давление пара на выходе в дроссель-калориметр $p_1=1{,}2$ МПа, после дросселя $p_2=0{,}3$ МПа, температура $t_2=150$ °С.

Ответ: в начальном состоянии пар влажный; температура $t_1=187{,}95$ °С; степень сухости $x_1=0{,}99$.

11.48. Насыщенный водяной пар при начальном давлении $p_1=2{,}0$ МПа и $x_1=0{,}9$ дросселируется до давления $p_2=0{,}6$ МПа.

Определить изменение температуры и степени сухости пара, пользуясь таблицами водяного пара.

Ответ: $\Delta t=53{,}5$ °С; степень сухости повысится до 0,93.

11.49. Водяной пар при прохождении через дроссельный вентиль дросселируется от $p_1=9{,}8$ МПа при температуре $t_1=350$ °С до $p_2=0{,}1$ МПа. Скорость пара на выходе из дросселя равна 250 м/с. Параметры среды $p_{ср}=0{,}1$ МПа, $t_{ср}=15$ °С.

Определить температуру выходящего пара и потерю эксергии вследствие дросселирования. Начальной скоростью пара пренебречь.

Ответ: $t_2=212{,}5$ °С; $\Delta ex=584{,}6$ кДж/кг.

11.50. Теплоемкость водяного пара при $p=12$ МПа и $t=520$ °С $c_p=2{,}65$ кДж/(кг·К). Зависимость удельного объема от температуры при давлении $p=12{,}0$ МПа согласно таблицам водяного пара выражается следующими данными:

t, °С	500	510	520	530	540
v, м^3/кг	0,02679	0,02730	0,02780	0,02829	0,02878

Определить дифференциальный дроссель-эффект при $t=520$ °С.

Решение. Составляем таблицу первых табличных разностей функции $v=f(t)_p$:

t, °С	500	510	520	530	540
$10^3\,v$, м^3/кг	26,79	27,30	27,80	28,29	28,78
$10^3\,\Delta v$, м^3/кг	—	0,51	0,50	0,49	0,49

Производная $(\partial v/\partial T)_p$ при 520 °С приближенно равна отношению первой разности к приращению аргумента в данной точке, т. е.

$$\left(\frac{\partial v}{\partial T}\right)_p=\left(\frac{\Delta v}{\Delta t}\right)_p=\frac{0{,}50\cdot 10^{-3}}{10}=0{,}50\cdot 10^{-4}\ \text{м}^3/(\text{кг}\cdot\text{К}).$$

Зная производную $(\partial v/\partial T)_p$, легко найти значение искомо адиабатного дроссель-эффекта:

$$\alpha_h = \left(\frac{\partial T}{\partial p}\right)_h = \frac{T\left(\frac{\partial v}{\partial T}\right)_p - v}{c_p} =$$

$$= \frac{793 \cdot 0{,}5 \cdot 10^{-4} - 0{,}02780}{2{,}65 \cdot 10^3} = 0{,}447 \cdot 10^{-5} \text{ К/Па}.$$

11.51. Пользуясь полученным в задаче 11.50 значением дроссел эффекта $\alpha_h = 0{,}447 \cdot 10^{-5}$ К/Па при $t = 520$ °С, определить интеграл ный дроссель-эффект при падении давления пара от $p_1 = 12{,}0$ МП до $p_2 = 10$ МПа. Результаты расчета сравнить с табличными да ными.

Ответ: $\Delta t = 8{,}94$ К; по таблицам водяного пара $\Delta t = 9{,}06$ К.

11.52. Водяной пар при температуре $t_1 = 400$ °С и давлении $p_1 = 8$ МПа в клапанах турбины дросселируется до $p_2 = 6{,}4$ МПа.

Определить интегральный дроссель-эффект и потерю эксерги водяного пара, если температура конденсата после турбины равн 20 °С. Давление среды $p_0 = 0{,}1$ МПа.

Ответ: $\Delta t = 10{,}36$ °С; $\Delta ex = 28{,}714$ кДж/кг.

11.53. Водяной пар при давлении $p_1 = 18{,}0$ МПа и температур $t_1 = 370$°С дросселируется до $p_2 = 8{,}6$ МПа.

Определить конечное состояние пара, пользуясь таблицами в дяного пара.

Каково будет конечное состояние пара, если дросселирован производить до давлений 0,9 и 0,1 МПа?

Ответ: при $p_2 = 8{,}6$ МПа пар становится влажным со степень сухости $x_2 = 0{,}956$. Дросселирование до 0,9 МПа почти не измен степени сухости $x'_2 = 0{,}957$. Дальнейшее дросселирование до $p_2 = 0{,}1$ МПа переведет рабочее тело в состояние перегретого пар с температурой $t_2 = 104{,}9$ °С.

11.54. Определить интегральный дроссель-эффект и изменени эксергии, если водяной пар, имеющий параметры $t_1 = 140$ °С и $p_1 = 8{,}0$ МПа, дросселируется до давления $p_2 = 5{,}0$ МПа. Решать зад чу, пользуясь h, s-диаграммой. Параметры среды: $t_0 = 20$ °С; $p_0 = 0{,}1$ МПа.

Ответ: $\Delta t = 22{,}79$ °С; $\Delta ex = 57{,}9$ кДж/кг.

11.55. С помощью таблиц термодинамических свойств воды водяного пара определить точку инверсии для воды при темпера туре 270 °С.

Решение. В точке инверсии коэффициент дифференциальног дроссель-эффекта равен нулю:

$$\alpha_h = \left(\frac{\partial T}{\partial p}\right)_h = \frac{T\left(\frac{\partial v}{\partial T}\right)_p - v}{c_p} = 0$$

или, иначе,

$$\alpha_h = \frac{-\left(\frac{\partial h}{\partial p}\right)_T}{c_p} = 0.$$

Для равенства $\alpha_h=0$ нужно, чтобы существовало равенство $(\partial h/\partial p)_T=0$ при заданной температуре 270 °С. Воспользовавшись таблицами воды и водяного пара, составим таблицу значений энальпий для различных давлений при температуре 270 °С:

p, МПа	15,0	17,0	18,5—19	20,5—21,0	23,0—24,5	25,0—31,5
h, кДж/кг	1182,9	1182,6	1182,4	1182,2	1182,0	1181,9

Рассматривая таблицу, заключаем, что при некотором давлении, находящемся в интервале 31,5—32,0 МПа, производная $(\partial h/\partial p)_T=0$ (меняет свой знак). Приближенно считаем, что эта точка соответствует среднему давлению, равному 31,8 МПа.

11.56. Смешиваются два потока пара. Первый характеризуется давлением $p_1=10$ МПа и температурой $t_1=450$ °С. Его расход $m_1=860$ кг/ч. Пар во втором потоке имеет такое же давление $p_2=10$ МПа и степень сухости $x_2=0{,}90$, расход $m_2=620$ кг/ч. После смешения устанавливается давление 9,0 МПа. Температура окружающей среды $t_0=20$ °С.

Определить удельные энтальпию h и энтропию s после смешения и полную потерю эксергии ΔEx, возникшую в результате необратимости процесса.

Ответ: $h=2969{,}83$ кДж/кг; $s=6{,}065$ кДж/(кг·К); $\Delta Ex=34{,}2$ МДж/ч.

Глава двенадцатая

КОМПРЕССОРЫ И ЦИКЛЫ ДВИГАТЕЛЕЙ ВНУТРЕННЕГО СГОРАНИЯ

12.1. Идеальный поршневой компрессор сжимает 450 м³/ч воздуха (в пересчете на нормальные условия) температурой $t_1=30$ °С от $p_1=0{,}10$ МПа и до $p_2=0{,}5$ МПа.

Определить мощность, затрачиваемую на привод компрессора, если сжатие происходит адиабатно, и температуру газа на выходе из компрессора.

Ответ: $N=28{,}7$ кВт; $t_2=207$ °С.

12.2. Компрессор сжимает 600 м³/ч воздуха от давления $p_1=0{,}098$ МПа до $p_2=0{,}6$ МПа.

Определить мощность, необходимую на привод компрессора, если сжатие происходит: 1) адиабатно; 2) политропно с показателем $n=1{,}3$; 3) изотермически.

Ответ: 1) $N_{ад}=38{,}9$ кВт; 2) $N_{пол}=36{,}8$ кВт; 3) $N_{изот}=29{,}6$ кВт.

12.3. Многоступенчатый поршневой компрессор без вредного объема сжимает воздух от начального давления $p_1=0{,}0981$ МПа до давления $p_2=5{,}4$ МПа. Известно, что отношение конечного давления к начальному одинаково для всех цилиндров и находится в пределах 6—8.

Определить число ступеней в компрессоре, мощность двигателя, если к. п. д. ступени равен 0,7, и расход охлаждающей воды при увеличении ее температуры на 15 °С. Известно, что начальная температура воздуха $t_1=17$ °С, а сжатие политропическое с показателем $n=1{,}3$. Производительность компрессора 300 м³/ч (в пересчете на нормальные условия).

Ответ: число ступеней равно двум; $N=65{,}3$ кВт; $m=493{,}5$ кг/ч.

12.4. Двухступенчатый поршневой компрессор сжимает возду от давления $p_1=0{,}0981$ МПа до давления $p_2=5{,}88$ МПа. Сжати политропическое с показателем $n=1{,}25$.

Начальная температура воздуха $t_1=20$ °С, производительност компрессора 500 м³/ч.

Определить расход охлаждающей воды на охлаждение ци линдров и промежуточного холодильника, если ее температура воз растает от 10 до 30 °С, а также мощность двигателя на приво компрессора, если $\eta_к=0{,}65$. Компрессор без вредного объема.

Ответ: $m=2142$ кг/ч; $N=58{,}9$ кВт.

12.5. В двухступенчатом компрессоре без вредного объема воз дух адиабатически сжимается от 0,098 до 4,9 МПа.

Определить производительность компрессора, если мощност его двигателя 60 кВт, к. п. д. компрессора $\eta_к=0{,}65$. Начальна температура воздуха 27 °С.

Ответ: $V_в=240$ м³/ч (в пересчете на нормальные условия).

12.6. В изотермическом компрессоре воздух сжимается от 0,09 до 0,981 МПа. Как изменится мощность двигателя для привод компрессора, если сжатие будет производиться изотермически д 98,1 МПа.

Ответ: в 3 раза.

12.7. Определить объемную часовую производительность по сжа тому воздуху компрессора, сжимающего воздух от $p_1=0{,}098$ МП и $t_1=15$ °С до $p_2=0{,}784$ МПа. Сжатие изотермическое, мощност двигателя 40 кВт.

Ответ: $V=85{,}4$ м³/ч.

12.8. В результате уменьшения расхода воды, охлаждающе цилиндр компрессора, температура сжатого воздуха на выходе и компрессора возрастает от 100 до 150 °С. Начальная температур воздуха остается постоянной и равной 17 °С. Давление сжатог воздуха $p_2=0{,}5$ МПа, начальное давление $p_1=0{,}1$ МПа.

Как изменится затрачиваемая мощность? Сжатие политропное

Ответ: приблизительно на 6%.

12.9. Турбокомпрессор адиабатно сжимает 500 м³/ч воздуха о $p_1=0{,}1$ МПа и $t_1=20$ °С до $p_2=0{,}4$ МПа. Адиабатный к. п. д. ком прессора $\eta_{ад}=0{,}85$. Определить конечную температуру сжатия затраченную на сжатие работу. Расчет произвести при помощ табл. 13 приложения.

Ответ: $T_2=459$ К; $L=258$ кДж/ч.

12.10. Кислородный компрессор сжимает кислород от $p_1=$ $=0{,}098$ МПа и $t_1=17$ °С до давления 0,4 МПа.

Определить необходимую мощность двигателя, если адиабат ный к. п. д. установки $\eta_{ад}=0{,}83$. Производительность компрессор равна 200 м³/ч сжатого газа.

Ответ: $N=31$ кВт.

12.11. Определить экономию в работе, полученную за счет пе рехода от одноступенчатого к двухступенчатому адиабатному сжа тию воздуха в поршневом компрессоре без вредного объема.

Начальное давление $p_1=0{,}098$ МПа, температура $t_1=17$ °С. Ко нечное давление $p_2=0{,}981$ МПа.

Ответ: $100\,\dfrac{l_1-l_2}{l_1}=16{,}5\%$.

12.12. Определить предельное давление (в долях от начально го), при котором производительность одноступенчатого компрессо

ра, сжимающего воздух, становится равной нулю. Объем вредного пространства составляет 2, 4 и 6% части объема цилиндра, соответствующей ходу поршня. Сжатие — адиабатное.

Ответ: 1) $245p_1$; 2) $95{,}6p_1$; 3) $55{,}7p_1$.

12.13. Рассчитать эффективную мощность на валу поршневого одноступенчатого неохлаждаемого компрессора, сжимающего кислород. Параметры среды, из которой всасывается газ: p_1=0,0981 МПа и t_1=20°С. Степень повышения давления $\beta=p_2/p_1=7$. Эффективный к. п. д. $\eta_к$=0,7. Длина цилиндра $h_ц$=250 мм; ход поршня h=240 мм; диаметр цилиндра d=120 мм. Вал компрессора совершает 240 об/мин. Считать, что коэффициент наполнения цилиндра λ равен объемному коэффициенту λ_v, т. е. считать, что параметры всасываемого газа равны параметрам среды, а утечки отсутствуют.

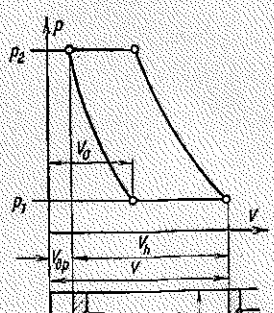


Рис. 12.1. К задаче 12.13.

Решение. Эффективную мощность в общем виде следует записать так:

$$N_e=\frac{N}{60\eta_к}=\frac{m_{мин}l_к}{60\eta_к},$$

где $m_{мин}$ — масса газа, всасываемая за 1 мин, кг/мин, $l_к$ — зависящая от вредного объема теоретическая работа, отнесенная к 1 кг рабочего тела, Дж/кг; N_e, Вт.

Величину $m_{мин}$ можно выразить следующим образом:

$$m_{мин}=\lambda V_h n\frac{p_1}{RT_1},$$

где $\lambda=\lambda_v=(V-V_0)/V_h$; V_h — объем, соответствующий ходу поршня, м³/об.; V_0 — объем расширившегося к моменту начала всасывания газа, находящегося во вредном объеме, м³ (рис. 12.1).

Величина V_0 подсчитывается по формуле

$$V_0=V_{вр}\beta^{\frac{1}{k}}.$$

После подстановки этих величин в основную формулу получаем, Вт:

$$N_e=\frac{1}{60\eta_к}\lambda V_h n p_1\frac{k}{k-1}\left(\beta^{\frac{k-1}{k}}-1\right).$$

По линейным размерам определяем объемы: $V=\pi d^2h_ц/4=$ $=0{,}00282$ м³; $V_h=\frac{\pi d^2h}{4}=0{,}00271$ м³; $V_{вр}=V-V_h=0{,}00011$ м³;

$V_0=V_{вр}\beta^{1/k}=0{,}00011\cdot 7^{1/1.4}=0{,}00044$ м³.

Следовательно, $\lambda=\lambda_v=(0{,}00282-0{,}00044)/0{,}00271=0{,}878$.

Рассчитываем мощность:

$$N_e=\frac{1}{60\cdot 0{,}7}\cdot 0{,}878\cdot 0{,}00271\cdot 2400{,}98\times$$

$$\times 10^6\,\frac{1{,}4}{1{,}4-1}\left(7^{\frac{1{,}4-1}{1{,}4}}-1\right)=3474\ \text{Вт}\approx 3{,}5\ \text{кВт}.$$

12.14. Определить часовую нормальную производительность од ноступенчатого неохлаждаемого компрессора $V_н$, м³/ч, а такж полный объем цилиндра V, если известны: параметры всасываемо го воздуха $p_1=0{,}098$ МПа и $t_1=20$ °С; степень повышения давле ния $\beta=8$; эффективный к. п. д. $\eta_к=0{,}68$; частота вращения вал $n=300$ об/мин; коэффициент наполнения, равный объемному коэф фициенту $\lambda=\lambda_v=0{,}883$; мощность на валу компрессора $N=52$ кВт

Ответ: $V_н=413$ м³/ч; $V=29{,}7$ дм³.

12.15. Начальное состояние воздуха, поступающего в воздуш ный двигатель, характеризуется параметрами: $p_1=1{,}2$ МПа и $t_1=$ $=157$ °С. Расширение в цилиндре двигателя происходит по политро пе с $n=1{,}3$; $p_2=0{,}1$ МПа.

Определить часовой расход сжатого воздуха, если мощност двигателя $N=200$ кВт.

Ответ: $m=3065$ кг/ч.

12.16. Воздушный двигатель, использующий для работы сжа тый воздух, должен развивать мощность $N=30$ кВт.

Каков часовой расход сжатого воздуха, если начальные пара метры его $p_1=2{,}0$ МПа; $t_1=30$ °С. Давление в конце адиабатног расширения $p_2=0{,}098$ МПа.

Ответ: $m=616$ кг/ч.

12.17. Построить график, иллюстрирующий зависимость термн ческого коэффициента полезного действия от степени сжатия дл цикла поршневого двигателя внутреннего сгорания с подводом теп ла при $v=$const, изменяя ε от 3 до 9. Показатель политропы $n=$ $=1{,}3$. Начальное состояние рабочего тела: $p_1=0{,}09$ МПа; $t_1=20$ °С

12.18. Рассчитать полезную работу, совершенную за цикл с под водом теплоты в процессе $v=$const, если известно, что расход топ лива составляет 44 г на 1 кг воздуха, $\varepsilon=6$, теплота сгорания топ лива $Q^p_н=29{,}260$ МДж/кг, $k=1{,}37$.

Ответ: $l=624$ кДж/кг.

12.19. Двигатель работает по циклу с подводом теплоты в про цессе $v=$const. Начальная температура рабочего тела, обладающе го свойствами воздуха, $t_1=20$ °С. Степень сжатия $\varepsilon=4{,}6$.

При сгорании выделяется энергия в количестве 900 кДж/кг Определить термический к. п. д. цикла, учитывая зависимость теп лоемкости от температуры.

Ответ: $\eta^v_t=0{,}405$.

12.20. Для цикла с подводом теплоты в процессе $v=$cons определить среднее индикаторное (цикловое) давление. Начально давление $p_1=0{,}0981$ МПа; $t_1=20$ °С; $\varepsilon=3{,}6$; $\lambda=p_3/p_2=3{,}33$.

Ответ: $p_i=0{,}762$ МПа.

12.21. Мощность четырехтактного двигателя внутреннего сгора ния с подводом теплоты в процессе $p=$const составляет 14,7 кВт Диаметр цилиндра $d=240$ мм, ход поршня $h=340$ мм; частота вра щения $n=200$ об/мин.

Определить среднее индикаторное давление.

Ответ: $p_i = 0{,}573$ МПа.

12.22. Для цикла с подводом теплоты в процессе $p = \text{const}$ определить полезную работу, отнесенную к 1 кг рабочего тела, термический коэффициент полезного действия, если $p_1 = 0{,}098$ МПа; $t_1 = 50$ °С; $\varepsilon = 14$; $k = 1{,}4$; степень предварительного расширения $\rho = 1{,}67$.

Ответ: $l = 380$ кДж/кг; $\eta^p_t = 0{,}71$.

12.23. Известно, что в цикле с подводом теплоты в процессе $p = \text{const}$ при начальных параметрах $p_1 = 0{,}0833$ МПа и $t_1 = 25$ °С подведенная теплота составляет 773 кДж/кг; $\varepsilon = 14$.

Требуется определить термический к. п. д. и полезную работу за цикл, отнесенную к 1 кг рабочего тела. Рабочее тело обладает свойствами воздуха.

Ответ: $\eta^p_t = 0{,}7$; $l = 545$ кДж/кг.

12.24. Для цикла Дизеля, рабочее тело которого обладает свойствами воздуха, заданы температуры, соответствующие следующим точкам цикла $t_1 = 40$°С; $t_2 = 600$°С; $t_4 = 270$°С.

Определить термический к. п. д. и сравнить его с термическим к. п. д. цикла Карно в том же интервале температур.

Ответ: $\eta_t = 0{,}61$; $\eta_{t,k} = 0{,}76$.

12.25. В цикле поршневого двигателя внутреннего сгорания с комбинированным подводом теплоты (рис. 12.2) начальное давление $p_1 = 0{,}085$ МПа и температура $t_1 = 50$°С. Степень сжатия $\varepsilon = 8$; $\lambda = 2{,}0$ и $\rho = 1{,}2$.

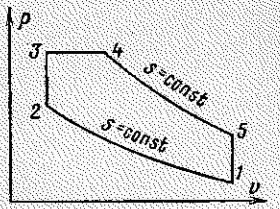


Рис. 12.2. К задаче 12.25.

Определить параметры в характерных для цикла точках, количество подведенного тепла, полезную работу и термический к. п. д. цикла. Рабочее тело обладает свойствами воздуха.

Ответ: параметры характерных точек:

	p, МПа	v, м³/кг	T, К		p, МПа	v, м³/кг	T, К
1	0,005	1,10	323	*4*	3,120	0,167	1776
2	1,560	0,139	740	*5*	0,222	0,110	829
3	3,120	0,139	1479				

$\eta_t = 0{,}560$; $q_1 = 827$ кДж/кг; $l = 463$ кДж/кг.

12.26. Для цикла двигателя внутреннего сгорания с комбинированным подводом теплоты расход топлива составляет 0,035 кг на 1 кг рабочего тела. Начальные параметры: $p_1 = 0{,}0882$ МПа; $t_1 = 50$ °С. Степень сжатия $\varepsilon = 10$. Максимальное давление в цикле 40 МПа.

Определить термический к. п. д. и долю теплоты топлива, подведенной в процессе $p = \text{const}$. Теплота сгорания топлива $Q^p_н = 29{,}26$ МДж/кг. Рабочее тело обладает свойствами воздуха.

Ответ: $\eta_t = 58{,}9\%$; $100\,\dfrac{q_p}{q_1} = 56\%$.

12.27. Определить среднюю температуру выхлопных газов двигателя внутреннего сгорания, работающего по циклу с подводом теплоты при $v = \text{const}$, если параметры рабочего тела на входе в ци-

линдр p_1=0,097 МПа и t=50 °С, а степень сжатия ε=6. В процесс рабочему телу сообщается q_v=920 кДж/кг теплоты. Рабочее тел обладает свойствами воздуха. Теплоемкость считать не зависяще от температуры.

Решение. Цикл изображен в p, v- и T, s-координатах н рис. 12.3. Как известно, процесс *4-1* в цикле *1-2-3-4*, в которо теплота отводится нижнему источнику, является условным. В дей ствительности его следует заменить двумя процессами: *4-b* и *b-*

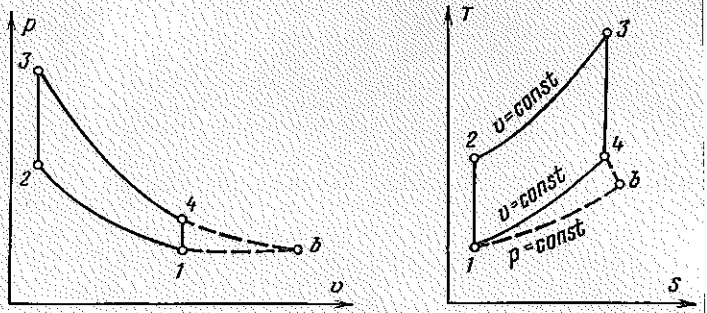


Рис. 12.3. К задаче 12.27.

Первый из них является необратимым процессом истечения отрабо тавших в цилиндре газов через выхлопной клапан в окружающу среду с давлением p_b (этот процесс можно считать необратимы адиабатным); второй процесс — изобарное охлаждение газов о искомой t_b до температуры среды. В курсах технической термоди намики доказывается, что процесс *1-4* термодинамически эквива лентен *4-b* и *b-1*.

Искомую температуру можно найти, записав уравнение перво го закона термодинамики для процесса *4-b*:

$$u_4 - u_b = p_b(v_b - v_4).$$

В правой части этого уравнения записана работа газа проти постоянного давления внешней среды p_b.

Записав левую часть в виде $c_v(T_4 - T_b)$, где $c_v = R/(k-1)$ заметив, что $p_b = p_1$ и $v_4 = v_1$, путем несложных преобразовани можно прийти к следующему выражению:

$$T_b = \frac{T_4}{k}\left[1 + (k-1)\frac{T_1}{T_4}\right].$$

Предоставляем возможность учащимся сделать эти преобразо вания самостоятельно.

Температура T_4 находится путем расчета обратимого цикл *1-2-3-4* обычным порядком. В результате расчета получается T_4= =948 К.

Следовательно,

$$T_b = \frac{948}{1{,}4}\left[1 + (1{,}4-1)\frac{323}{948}\right] = 769 \text{ К}; \quad t_b = 486 \text{ °С}.$$

Как видно, T_b значительно ниже, чем температура T_4 в конц адиабатного расширения газов в цилиндре.

12.28. Вывести уравнение для определения среднего индикаторного давления в цикле с подводом теплоты при p=const.

Ответ: $p_i = \dfrac{p_1 \varepsilon}{(\varepsilon - 1)(k-1)} [k\varepsilon^{k-1}(\rho - 1) - (\rho^k - 1)]$.

Глава тринадцатая

ЦИКЛЫ ГАЗОТУРБИННЫХ УСТАНОВОК И РЕАКТИВНЫХ ДВИГАТЕЛЕЙ

При решении задач этого раздела считать, что рабочее тело обладает свойствами идеального газа.

13.1. Рассчитать термический к. п. д. простейшей газотурбинной установки, работающей по циклу с подводом теплоты при p=const и при следующих степенях повышения давления: 1) $\beta_1=5$; 2) $\beta_2=10$; 3) $\beta_3=20$.

Считать, что рабочее тело обладает свойствами воздуха. Показатель адиабаты принять равным $k=1{,}4$.

Ответ: $\eta_{t,1}=0{,}369$; $\eta_{t,2}=0{,}482$; $\eta_{t,3}=0{,}575$.

13.2. Газотурбинная установка (ГТУ) работает по циклу с подводом теплоты при p=const. Степень повышения давления $\beta=12$.

Рассчитать термический к. п. д. ГТУ для двух случаев: 1) рабочим телом является воздух; 2) рабочим телом является гелий.

Ответ: 1) $\eta_t=0{,}508$; 2) $\eta_t=0{,}630$.

13.3. Компрессор газотурбинной установки сжимает воздух с начальными параметрами $p_1=0{,}1$ МПа и $t_1=5$ °С до давления $p_2=0{,}8$ МПа. Внутренний относительный к. п. д. компрессора равен 0,84.

Определить температуру воздуха на выходе из компрессора и также мощность привода компрессора $N_к$, если известно, что компрессор должен подавать $1\cdot10^5$ кг/ч воздуха.

Ответ: $t_2=274$ °С; $N_к=7{,}5$ МВт.

13.4. В турбину газотурбинной установки входит гелий с параметрами $p_3=1{,}0$ МПа; $t_3=700$ °С. Внутренний относительный к. п. д. турбины равен 0,86, давление за турбиной $p_4=0{,}1$ МПа.

Определить температуру гелия на выходе из турбины. Рассчитать также массовый часовой расход гелия D, если действительная мощность турбины $N_т=40$ МВт.

Ответ: $t=196$ °С; $D=55{,}1\cdot10^3$ кг/ч.

13.5. Начальные параметры воздуха, поступающего в компрессор ГТУ со сжиганием топлива при p=const, $p_1=0{,}1$ МПа; $t_1=20$ °С. Степень повышения давления в компрессоре ГТУ $\beta=6$. Температура газов перед соплами турбины $t_3=700$ °С. Рабочее тело обладает свойствами воздуха, теплоемкость его рассчитывается по молекулярно-кинетической теории. Компрессор засасывает $2\cdot10^5$ кг/ч воздуха.

Определить:

1) Параметры всех точек идеального цикла ГТУ, термический к. п. д. ГТУ, теоретические мощности турбины, компрессора и всей ГТУ.

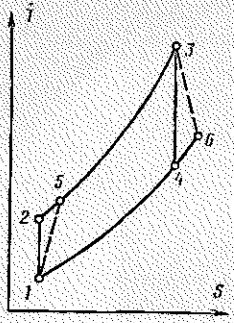


Рис. 13.1. К задаче 13.5.

2) Параметры всех точек действительного цикла (с учетом необратимости процессов расширения и сжатия в турбине и компрессоре), приняв внутренние относительные к. п. д. турбины и компрессора соответственно $\eta^{т}_{oi}=0{,}87$ и $\eta^{к}_{oi}=0{,}85$.

3) Внутренний к. п. д. ГТУ, действительные мощности турбины, компрессора и всей ГТУ.

Представить оба цикла в T, s-диаграмме.

Решение. На рис. 13.1 представлены обратимый (*1-2-3-4-1*) и необратимый (*1-5-3-6-1*) циклы ГТУ в T, s-диаграмме.

Температуры в точках обратимого цикла рассчитываются следующим образом:

$$T_2 = T_1 \left(\frac{p_2}{p_1}\right)^{\frac{k-1}{k}} = 293 \cdot 6^{\frac{1,4-1}{1,4}} = 489 \text{ К}; \quad t_2 = 216^\circ\text{C};$$

$$T_4 = \frac{T_3 T_1}{T_2} = \frac{973 \cdot 293}{489} = 583 \text{ К}; \quad t_4 = 310^\circ\text{C}.$$

Термический к. п. д.

$$\eta_t = 1 - \frac{1}{\beta^{\frac{k-1}{k}}} = 1 - \frac{1}{6^{\frac{1,4-1}{1,4}}} = 0{,}401.$$

Теоретические мощности:

$$N^{т}_0 = D(h_3 - h_4) = Dc_p(t_3 - t_4) = \frac{8{,}314 \cdot 7(700 - 310) \cdot 2 \cdot 10^5}{2 \cdot 28{,}96 \cdot 3600} =$$

$$= 21\,800 \text{ кВт};$$

$$N^{к}_0 = D(h_2 - h_1) = Dc_p(t_2 - t_1) = \frac{8{,}314 \cdot 7(216 - 20)\, 2 \cdot 10^5}{2 \cdot 28{,}96 \cdot 3600} =$$

$$= 10\,900 \text{ кВт};$$

$$N^{ГТУ}_0 = N^{т}_0 - N^{к}_0 = 21\,800 - 10\,900 = 10\,900 \text{ кВт}.$$

Температуры в точках реального цикла рассчитываются следующим образом. С помощью основной формулы для внутреннего относительного к. п. д. компрессора

$$\eta^{к}_{oi} = \frac{h_5 - h_1}{h_5 - h_1} = \frac{t_2 - t_1}{t_5 - t_1}$$

находится температура в конце сжатия t_5:

$$t_5 = \frac{t_2 - t_1}{\eta^{к}_{oi}} + t_1 = \frac{216 - 20}{0{,}85} + 20 = 251^\circ\text{C}.$$

Температура в конце необратимого адиабатного расширения находится аналогично. Записывается формула для внутреннего относительного к. п. д. турбины:

$$\eta^{т}_{oi} = \frac{h_3 - h_6}{h_3 - h_4} = \frac{t_3 - t_6}{t_3 - t_4},$$

отсюда

$$t_6 = t_3 - \eta^{т}_{oi}(t_3 - t_4) = 700 - 0{,}87\,(700 - 310) = 361\ °C.$$

Внутренний к. п. д. ГТУ

$$\eta_i^{гту} = \frac{(h_3 - h_6) - (h_5 - h_1)}{h_3 - h_5} = \frac{(t_3 - t_6) - (t_5 - t_1)}{t_3 - t_5} =$$

$$= \frac{(700 - 361) - (251 - 20)}{700 - 251} = 0{,}242.$$

Действительная мощность турбины

$$N^{т}_{д} = Dc_p(t_3 - t_6) = \frac{8{,}314 \cdot 7\,(700 - 361)\,2 \cdot 10^5}{2 \cdot 28{,}96 \cdot 3600} = 18\,900\ кВт,$$

или

$$N^{т}_{д} = N^{т}_{0}\eta^{т}_{oi} = 21\,800 \cdot 0{,}87 = 18\,900\ кВт.$$

Действительная мощность привода компрессора

$$N^{к}_{д} = D(h_5 - h_1) = Dc_p(t_5 - t_1) = \frac{8{,}314 \cdot 7\,(251 - 20)\,2 \cdot 10^5}{2 \cdot 28{,}96 \cdot 3600} =$$

$$= 12\,900\ кВт,$$

или

$$N^{к}_{д} = N^{к}_{0}/\eta^{к}_{oi} = 10\,900/0{,}85 = 12\,900\ кВт.$$

Действительная мощность газотурбинной установки

$$N^{гту}_{д} = N^{т}_{д} - N^{к}_{д} = 18\,900 - 12\,900 = 6000\ кВт.$$

Приведенный расчет показывает, как сильно влияет необратимость процессов сжатия и расширения газа на к. п. д. и мощность газотурбинной установки.

13.6. Для ГТУ, работающей со сжиганием топлива при p=const, известно (обозначения см. на рис. 13.1): p_1=0,1 МПа, t_1=15 °С, t_3=800 °С, $\eta^{т}_{oi}$=0,88; $\eta^{к}_{oi}$=0,87, производительность компрессора 360 т/ч, степень повышения давления β=7,5.

Определить параметры характерных точек идеального и реального циклов ГТУ, термический и внутренний к. п. д. ГТУ, теоретические и действительные мощности турбины, компрессора и всей ГТУ.

Считать, что рабочим телом является воздух; теплоемкость воздуха рассчитывать по молекулярно-кинетической теории.

Ответ: t_2 = 239 °С; t_4 = 331 °С; η_t = 0,438; $N^{т}_{0}$ = 47,1 МВт; $N^{к}_{0}$ = 22,5 МВт; $N^{гту}_{0}$ = 24,6 МВт; t_5 = 272 °С; t_6 = 387° С; η_i = = 0,295; $N^{т}_{д}$=41,4 МВт; $N^{к}_{д}$ = 25,9 МВт; $N^{гту}_{д}$ = 15,5 МВт.

13.7. Газотурбинная установка, в которой топливо сгорает при p=const, работает при следующих параметрах: t_1=12 °С, p_1=0,09 МПа, степень повышения давления β=7, температура газов перед соплами турбины равна 750 °С. Внутренние относительные к. п. д. турбины и компрессора: $\eta^{т}_{oi}=\eta^{к}_{oi}=0{,}8$.

Вторая установка работает при тех же параметрах, но за счет улучшения проточных частей турбины и компрессора внутренние относительные к. п. д. были повышены до значений $\eta^{т}_{oi}=\eta^{к}_{oi}=0{,}85$.

Рассчитать значения внутренних к. п. д. первой и второй ГТУ, выяснив тем самым влияние качества процессов сжатия и расширения на к. п. д. установки. Принять показатель адиабаты k=1,4.

Определить также термический к. п. д. установки.

Ответ: $\eta_{t,1}=0{,}178$; $\eta_{t,2}=0{,}248$; $\eta_t=0{,}426$.

13.8. Известно, что термический к. п. д. цикла ГТУ с подводом теплоты при p=const не зависит от температуры газа перед турбиной, но внутренний к. п. д. зависит от этой температуры.

Рассчитать значение внутренних к. п. д. ГТУ для двух случаев: 1) t_1=20 °С; β=7; температура газа перед турбиной t_3=600 °С; $\eta_{oi}=\eta^{к}_{oi}=0{,}85$; 2) t_1=20 °С; β=7; t_3=800 °С; $\eta^{т}_{oi}=\eta^{к}_{oi}=0{,}85$.

Принять показатель адиабаты k=1,4, а теплоемкость газов считать постоянной.

Ответ: $\eta_{t,1}=0{,}186$; $\eta_{t,2}=0{,}253$.

13.9. Для ГТУ, в которой сжигается топливо при p=const, известно: начальные параметры воздуха p_1=0,09 МПа, t_1=10°С, степень повышения давления β=6,5, температура газов перед турбиной t_3=800 °С, внутренние относительные к. п. д. турбины $\eta^{т}_{oi}=0{,}88$ и компрессора $\eta^{к}_{oi}=0{,}85$. Производительность компрессора D=300 т/ч.

Определить параметры всех точек действительного цикла, действительные мощности турбины, компрессора и всей ГТУ, внутренний к. п. д. ГТУ. Считать, что рабочее тело обладает свойствами воздуха, учесть зависимость теплоемкости воздуха от температуры. Задачу решить с помощью табл. 13 приложения.

Решение. На рис. 13.1 изображен цикл ГТУ (*1-5-3-6-1*).

В табл. 13 приложения для состояния *1* (t_1=10 °С) находим:

$$\pi_{01}=1{,}1326;\quad h_1=283{,}2\ \text{кДж/кг}.$$

Для состояния *2* приведенное давление

$$\pi_{02}=\frac{p_2}{p_1}\pi_{01}=6{,}5\cdot 1{,}1326=7{,}362.$$

По найденному результату находим в таблицах величины, соответствующие обратимому сжатию (процесс *1-2*):

$$t_2=208{,}5\ °\text{С};\quad h_2=484{,}1\ \text{кДж/кг}.$$

Действительное значение энтальпии после сжатия в компрессоре

$$h_5=\frac{h_2-h_1}{\eta^{к}_{oi}}+h_1=\frac{484{,}1-283{,}2}{0{,}85}+283{,}2=520\ \text{кДж/кг}.$$

Для состояния *3* (t_3=800 °С) из таблиц выписываем необходимые величины:

$$\pi_{03}=151{,}21;\quad h_3=1129{,}9\ \text{кДж/кг}.$$

Находим приведенное давление в точке *4*

$$\pi_{04}=\frac{p_4}{p_в}\pi_{0в}=\frac{151{,}26}{6{,}5}=23{,}26,$$

по этому значению из таблиц получаем:

$$t_4=388\,^\circ\text{C};\quad h_4=671{,}6\ \text{кДж/Кг}.$$

Энтальпию в конце действительного расширения (точка *6*) подсчитываем по формуле

$$h_6=h_3-\eta^т_{oi}(h_3-h_4)=1129{,}8-0{,}88(1129{,}8-671{,}6)=$$
$$=726\ \text{кДж/кг}.$$

Внутренний к. п. д. установки

$$\eta_i^{ГТУ}=\frac{(h_3-h_6)-(h_5-h_1)}{h_3-h_5}=$$
$$=\frac{(1129{,}8-726)-(520-283{,}2)}{1129{,}8-520}=0{,}274.$$

Действительная мощность компрессора

$$N^к_д=D(h_5-h_1)=\frac{300}{3600}(520-283)=19{,}7\ \text{МВт}.$$

Действительная мощность турбины

$$N^т_д=D(h_3-h_6)=\frac{300}{3600}(1130-726)=33{,}6\ \text{МВт}.$$

Действительная мощность ГТУ

$$N^{ГТУ}_д=N^т_д-N^к_д=33{,}6-19{,}7=13{,}9\ \text{МВт}.$$

13.10. Известны следующие данные ГТУ со сгоранием топлива при p=const: начальные параметры воздуха $t_1=20\,^\circ\text{C}$, $p_1=0{,}1$ МПа, степень повышения давления $\beta=8$, температура газов перед турбиной $t_3=780\,^\circ\text{C}$, внутренние относительные к. п. д. турбины $\eta^т_{oi}=0{,}89$ и компрессора $\eta^к_{oi}=0{,}87$, производительность компрессора $D=450$ т/ч.

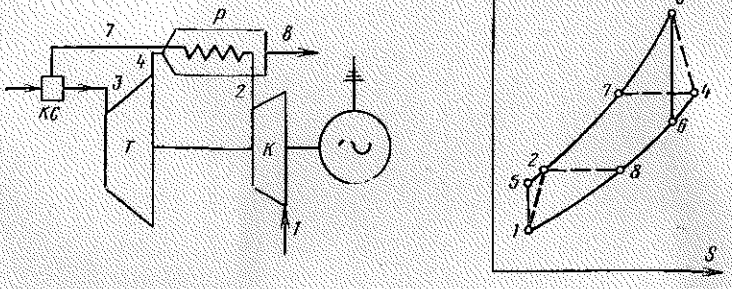


Рис. 13.2. К задаче 13.11.

Определить параметры всех точек действительного цикла, действительные мощности турбины, компрессора и всей ГТУ, внутренний к. п. д. ГТУ. Считать, что рабочее тело обладает свойствами воздуха, учесть зависимость теплоемкости воздуха от температуры. Задачу решить с помощью табл. 13 приложения.

Ответ: $h_1=295{,}3$ кДж/кг; $p_5=0{,}8$ МПа; $h_5=568$ кДж/кг; $t_5=290$ °С; $p_3=0{,}8$ МПа; $h_3=1106{,}8$ кДж/кг; $p_0=0{,}1$ МПа; $h_6=673$ кДж/кг; $t_6=389$ °С (индексы взяты в соответствии с рис. 13.1).

Действительная мощность компрессора $N^к_д=34{,}3$ МВт, действительная мощность турбины $N^т_д=54{,}3$ МВт, действительная мощность ГТУ $N^{ГТУ}_д=20$ МВт.

13.11. На рис. 13.2 представлена схема ГТУ с регенерацией, а также цикл в T, s-диаграмме. Для этой установки известно: $p_1=0{,}1$ МПа, $t_1=15$ °С, $\beta=p_2/p_1=4{,}8$, $t_3=780$ °С. Внутренние относительные к. п. д. турбины и компрессора $\eta^т_{oi}=0{,}85$ и $\eta^к_{oi}=0{,}83$. Регенерация предельная. Рабочее тело обладает свойствами воздуха, теплоемкость которого следует рассчитывать по молекулярно-кинетической теории.

Определить параметры всех точек цикла и внутренний к. п. д. ГТУ. Определить также внутренний к. п. д. ГТУ при условии выключения системы регенерации. Рассчитать термический к. п. д. ГТУ с регенерацией.

Решение. На рис. 13.2 представлен цикл ГТУ с предельной регенерацией (*1-2-7-3-4-8-1*), точки *5* и *6* относятся к обратимому циклу.

Сначала необходимо рассчитать температуры в точках цикла:

$$T_5=T_1\left(\frac{p_2}{p_1}\right)^{\frac{k-1}{k}}=288\cdot 4{,}8^{\frac{1{,}4-1}{1{,}4}}=451\ \text{К, или}\ t_5=178\ °\text{С}.$$

С помощью основной формулы для внутреннего относительного к. п. д. компрессора $\eta^к_{oi}$ определяем температуру в точке *2*:

$$t_2=\frac{t_5-t_1}{\eta^к_{oi}}+t_1=\frac{178-15}{0{,}83}+15=211\ °\text{С}.$$

Температура в точке *6*:

$$T_6=\frac{T_3T_1}{T_5}=\frac{1053\cdot 288}{451}=673\ \text{К, или}\ t_6=400\ °\text{С}.$$

Температура в точке *4* определяется с помощью формулы для внутреннего относительного к. п. д. турбины:

$$t_4=t_3-\eta^т_{oi}(t_3-t_6)=780-0{,}85\,(780-400)=457\ °\text{С}.$$

Термический к. п. д. ГТУ с предельной регенерацией

$$\eta_t=\frac{l_0}{q_{1,0}}=\frac{(t_3-t_6)-(t_5-t_1)}{t_3-t_6}=\frac{(780-400)-(178-15)}{780-400}=0{,}572.$$

Внутренний к. п. д. ГТУ с предельной регенерацией

$$\eta_i^{\text{ГТУ}} = \frac{l_д}{q_{1д}} = \frac{(i_3 - i_4) - (i_2 - i_1)}{i_3 - i_7} = \frac{(780 - 457) - (211 - 15)}{780 - 457} = 0{,}393.$$

Внутренний к. п. д. ГТУ без регенерации

$$\eta_i^{\text{ГТУ}} = \frac{(i_3 - i_4) - (i_2 - i_1)}{i_3 - i_2} = \frac{(780 - 457) - (211 - 15)}{780 - 211} = 0{,}223.$$

13.12. Газотурбинная установка, работающая по циклу с подводом теплоты при p=const, работает с непредельной регенерацией (рис. 13.2). Параметры установки: $\beta = 4{,}8$, $t_1 = 15$ °С, $t_3 = 780$ °С, степень регенерации $\sigma = 0{,}75$, внутренние относительные к. п. д. турбины и компрессора $\eta^*_{oi} = 0{,}85$ и $\eta^к_{oi} = 0{,}83$.

Рассчитать внутренний к. п. д. такой установки. Считать, что рабочее тело обладает свойствами воздуха; показатель адиабаты k принять равным 1,4.

Ответ: $\eta = 0{,}33$.

13.13. Известно, что термический к. п. д. простейшей ГТУ с подводом теплоты при p=const возрастает с ростом степени увеличения давления β.

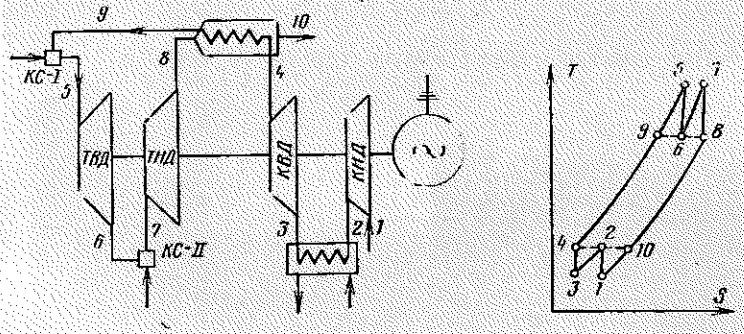


Рис. 13.3. К задаче 13.14.

Как будет изменяться термический к. п. д. с ростом β при неизменной температуре перед турбиной, если ГТУ работает с предельной регенерацией? Задачу решить с помощью T, s-диаграммы.

Ответ: с ростом β термический к. п. д. ГТУ с предельной регенерацией будет уменьшаться.

13.14. Рассчитать теоретический цикл ГТУ с двухступенчатым сжатием и двухступенчатым расширением и с предельной регенерацией. Параметры воздуха на входе в компрессор: $p_1 = 0{,}1$ МПа, $t_1 = 20$ °С, степень повышения давления в обеих ступенях одинакова: $\beta_1 = \beta_2 = 2{,}4$, охлаждение воздуха после первого компрессора производится до $t_3 = 20$ °С. Температура воздуха перед обеими турбинами одинакова и равна 800 °С. Давление воздуха после первой турбины 0,24 МПа. Расход воздуха $250 \cdot 10^3$ кг/ч.

Определить параметры всех точек цикла, термический к. п. д. и теоретическую мощность ГТУ. Теплоемкость воздуха рассчитывать по молекулярно-кинетической теории. Представить цикл ГТУ в T, s-диаграмме.

Решение. На рис. 13.3 в T, s-диаграмме представлен цикл для такой установки.

Рассчитываем температуры в узловых точках цикла:

$$T_2 = T_1 \left(\frac{p_2}{p_1}\right)^{\frac{k-1}{k}} = 293 \cdot 2{,}4^{\frac{1{,}4-1}{1{,}4}} = 376 \text{ К}, \quad \text{или} \quad t_2 = 103 \text{ °С}.$$

Так как степень повышения давления во второй ступени такая же, как и в первой, и по условию $t_1 = t_3$, то температуры в точках *2* и *4* равны. Аналогично этому равны температуры в точках *6* и *8*.

Температура в точке *8*:

$$T_8 = \frac{T_1 T_7}{T_2} = \frac{293 \cdot 1073}{376} = 836 \text{ К}, \quad \text{или} \quad t_8 = 563 \text{ °С}.$$

Так как по условию регенерация предельная, то

$$t_8 = t_3 = t_9 \text{ и } t_2 = t_4 = t_{10}.$$

При выбранном распределении параметров значения работы (и мощности) двух турбин одинаковы, так же как и мощности компрессоров.

Термический к. п. д.

$$\eta_t = \frac{2l^{\text{т}}_0 - 2l^{\text{к}}_0}{q_1} = \frac{2c_p(t_5 - t_6) - 2c_p(t_2 - t_1)}{2c_p(t_5 - t_9)} =$$

$$= \frac{(800 - 563) - (103 - 20)}{800 - 563} = 0{,}650.$$

Термическая мощность двух турбин

$$2N^{\text{т}}_0 = 2Dc_p(t_5 - t_6);$$

в эту формулу расход газа подставляется в килограммах в секунду, а теплоемкость — в килоджоулях на килограмм-кельвин:

$$2N^{\text{т}}_0 = 2 \cdot \frac{250 \cdot 10^3}{3600} \cdot \frac{8{,}314 \cdot 7}{2 \cdot 28{,}96}(800 - 563) = 33{,}1 \text{ МВт}.$$

Теоретическая мощность двух компрессоров

$$2N^{\text{к}}_0 = 2Dc_p(t_2 - t_1) = 2 \cdot \frac{250 \cdot 10^3}{3600} \cdot \frac{8{,}314 \cdot 7}{2 \cdot 28{,}96}(103 - 20) = 11{,}6 \text{ МВт}.$$

Теоретическая мощность ГТУ

$$N_0^{\text{ГТУ}} = 33{,}1 - 11{,}6 = 21{,}5 \text{ МВт}.$$

13.15. Газотурбинная установка работает с двухступенчатым сжатием и двухступенчатым расширением. Степень повышения давления в компрессорах (и понижения в турбинах) одинакова: $\beta_1=\beta_2=2{,}2$. В первый компрессор поступает воздух при $p_1=0{,}1$ МПа и $t_1=20$°С, после первого компрессора он охлаждается также до 20°С. Температура газов перед обеими турбинами одинакова и равна 820°С. Внутренние относительные к. п. д. компрессоров равны 0,83, а турбин — 0,86. Степень регенерации $\sigma=0{,}7$. Расход воздуха 250 т/ч. Определить параметры во всех точках цикла, внутренний к. п. д. ГТУ, действительные мощности компрессоров, турбин и всей ГТУ. Представить цикл в T, s-диаграмме. Принять, что тепловые характеристики воздуха рассчитываются с помощью молекулярно-кинетической теории теплоемкости.

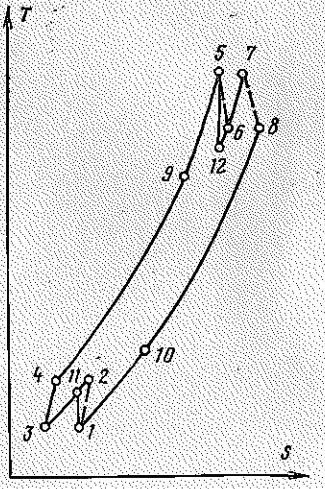


Рис. 13.4. К задаче 13.15.

Решение. На рис. 13.4 представлен цикл такой установки. Точки *11* и *12* относятся к обратимому сжатию и расширению. Рассчитываем температуры в главных точках цикла:

$$T_{11}=T_1\left(\frac{p_{11}}{p_1}\right)^{\frac{k-1}{k}}=293\cdot 2{,}2^{\frac{1{,}4-1}{1{,}4}}=367\ \text{K}\ \text{или}\ t_{11}=94^\circ\text{C}.$$

Для нахождения действительной температуры T_2 после первого компрессора необходимо воспользоваться формулой для относительного внутреннего к. п. д. компрессора, т. е.

$$\eta^{\text{к}}_{oi}=\frac{h_{11}-h_1}{h_2-h_1}=\frac{t_{11}-t_1}{t_2-t_1},$$

откуда

$$t_2=\frac{t_{11}-t_1}{\eta^{\text{к}}_{oi}}+t_1=\frac{94-20}{0{,}82}+20=109^\circ\text{C}.$$

Так как $\beta_1=\beta_2$ и $t_1=t_3$, то $t_4=t_2=109$ °С.

Температура в конце обратимого расширения в турбине

$$T_{12}=\frac{T_1T_6}{T_{11}}=\frac{293\cdot 1093}{367}=873\ \text{K},\quad \text{или}\quad t_{12}=600\ ^\circ\text{C}.$$

Действительная температура после расширения в турбине рассчитывается с помощью значения $\eta^{\text{т}}_{oi}$, т. е.

$t_6=t_5-\eta^{\text{т}}_{oi}(t_5-t_{12})=820-0{,}86(820-600)=650$ °С.

Далее, так как $\beta_1=\beta_2$, а $t_5=t_7$, то $t_8=t_6=630$ °С.

Температуру воздуха, входящего в камеру сгорания (температуру после регенератора), t_9 находим с помощью величины сте-

пени регенерации σ, вычислять которую нужно по формуле

$$\sigma = \frac{t_9 - t_4}{t_8 - t_4},$$

отсюда

$$t_9 = \sigma(t_8 - t_4) + t_4 = 0{,}7(630 - 109) + 109 = 474\ ^\circ\text{C}.$$

Так как предполагается, что тепловые потери в регенераторе отсутствуют, то $t_9 - t_4 = t_8 - t_{10}$. Следовательно, $t_{10} = t_8 - (t_9 - t_4) = 630 - (474 - 109) = 265\ ^\circ\text{C}$.

Внутренний к. п. д. установки

$$\eta_i^{\text{ГТУ}} = \frac{(t_5 - t_6) + (t_7 - t_8) - [(t_2 - t_1) + (t_4 - t_3)]}{(t_5 - t_9) + (t_7 - t_6)} =$$

$$= \frac{2(t_5 - t_6) - 2(t_2 - t_1)}{(t_5 - t_9) + (t_7 - t_6)} = \frac{2(820 - 630) - 2(109 - 20)}{(820 - 474) + (820 - 630)} = 0{,}373.$$

Действительная мощность двух турбин

$$2N^{\text{т}}_{\text{д}} = 2Dc_p(t_5 - t_6) = 2\frac{250}{3600} \cdot \frac{8{,}314 \cdot 7}{2 \cdot 28{,}96}(820 - 630) = 26{,}4\ \text{МВт}.$$

Действительная мощность двух компрессоров

$$2N^{\text{к}}_{\text{д}} = 2Dc_p(t_2 - t_1) = 2\frac{250}{3600} \cdot \frac{8{,}314 \cdot 7}{2 \cdot 28{,}96}(109 - 20) = 12{,}4\ \text{МВт}.$$

Действительная мощность ГТУ

$$N^{\text{ГТУ}}_{\text{д}} = 26{,}4 - 12{,}4 = 14{,}0\ \text{МВт}.$$

13.16. Швейцарской фирмой «Эшер Висс» спроектирована газотурбинная установка, работающая по замкнутой схеме, с нагреванием газа в атомном реакторе. Рабочим телом является гелий при

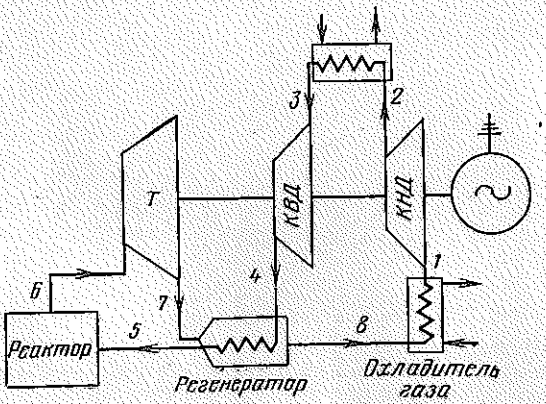


Рис. 13.5. К задаче 13.16.

высоком давлении. В отличие от обычных схем ГТУ в данной установке (рис. 13.5) вместо камеры сгорания установлен атомный реактор, и так как схема замкнутая, то газ не выбрасывается в атмосферу, а поступает в охладитель газа и далее вновь к компрессору.

Параметры гелия по тракту ГТУ следующие:

$p_1=2{,}94$ МПа; $t_1=32$ °С; $p_2=4{,}57$ МПа; $p_3=4{,}53$ МПа; $t_3=32$ °С; $p_4=7{,}02$ МПа; $p_5=6{,}87$ МПа; $t_5=469$ °С; $p_6=6{,}76$ МПа; $t_6=760$ °С; $p_7=3{,}04$ МПа; $p_8=2{,}99$ МПа;

Через ГТУ проходит 100 кг/с гелия.

Внутренние относительные к. п. д. компрессоров равны 88%, внутренний относительный к. п. д. турбины $\eta^{т}_{oi}=88{,}9\%$.

С помощью приведенных данных рассчитать схему ГТУ.

Рассчитать температуры в точках *2*, *4*, *7* и *8*, действительную мощность турбины и двух компрессоров, действительную мощность ГТУ на лопатках, а также электрическую мощность на клеммах генератора, приняв механический к. п. д. $\eta_м=0{,}985$, а к. п. д. генератора $\eta_г=0{,}976$.

Рассчитать электрический к. п. д. ГТУ. Представить цикл ГТУ в *T*, *s*-диаграмме.

Ответ: $t_2=t_4=99$ °С; $t_7=506$ °С; $t_8=136$ °С.

Действительная (на лопатках) мощность турбины $N^{т}_{д}=132$ МВт. Действительная мощность двух компрессоров $2N^{к}_{д}=69{,}6$ МВт. Мощность на клеммах электрического генератора $N_э=(132-69{,}6)0{,}985\cdot0{,}976=60$ МВт; $\eta_э=39{,}8\%$.

13.17. Определить эксергию 1 кг газов, входящих в турбину ГТУ при параметрах $p=1{,}2$ МПа; $t=700$ °С. Параметры среды: $p_0=0{,}11$ МПа, $t_0=15$ °С.

Рассчитать теоретическую работу адиабатного расширения газов в потоке (располагаемую работу турбины) от начальных параметров (p, t) до давления p_0. Сопоставить значения эксергии потока и располагаемой работы и проанализировать полученный результат.

Газ считать идеальным, подчиняющимся свойствам воздуха.

Для расчета воспользоваться таблицами.

Ответ: $ex=557{,}1$ кДж/кг; $l_{расп}=496{,}7$ кДж/кг.

Эксергия больше располагаемой работы потому, что из турбины газ выходит с температурой большей, чем температура среды t_0.

13.18. Самолет с прямоточным воздушно-реактивным двигателем летит со скоростью 1000 км/ч. Температура воздуха $t=-20$ °С. Определить термический к. п. д. цикла, по которому работает двигатель.

Ответ: $\eta_t=0{,}132$.

13.19. Самолет летит со скоростью 900 км/ч при температуре воздуха 10 °С. В дальнейшем скорость самолета снижается до 800 км/ч при температуре воздуха 0 °С.

Определить, насколько изменится термический к. п. д. цикла прямоточного воздушно-реактивного двигателя, стоящего на самолете.

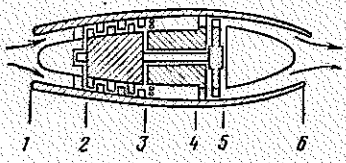
Ответ: термический к. п. д. меняется от 9,9 до 8,2%. Влияние скорости полета сильнее, чем влияние температуры окружающей среды.

13.20. На рис. 13.6 изображены схемы и цикл турбокомпрессорного реактивного двигателя, находящегося на самолете. Само-

лет летит со скоростью 850 км/ч при параметрах воздуха $t=0$ °С, $p=0{,}04$ МПа. Известно, что степень увеличения давления в компрессоре $\beta=p_3/p_2=8$, а температура газов перед соплами турбины $t_4=800$ °С.

Рассчитать параметры во всех характерных точках цикла, а также скорость газа на выходе из реактивного сопла двигателя.

Считать процессы сжатия обратимыми. Рабочее тело обладает свойствами воздуха, тепловые свойства его рассчитываются по молекулярно-кинетической теории.



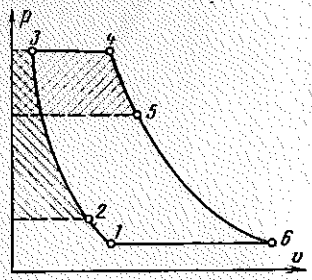


Рис. 13.6. К задаче 13.20.

Ответ: $t_2=27{,}7$ °С; $p_2=0{,}0561$ МПа; $p_3=0{,}449$ МПа; $t_3=271{,}9$ °С; $p_5=0{,}182$ МПа; $t_5=556$ °С; $t_6=265$ °С; $w_{вых}=765$ м/с.

13.21. Пользуясь данными задачи 13.20, рассчитать термический к. п. д. цикла турбокомпрессорного реактивного двигателя, теоретические мощности турбины, компрессора и всего двигателя, приняв расход воздуха, проходящего через двигатель, $D=50$ т/ч.

Ответ: $\eta_t=0{,}50$; $N^{т}_{0}=N^{к}_{0}=3407$ кВт; $N_0^{двиг}=3676$ кВт.

Глава четырнадцатая

ЦИКЛЫ ПАРОТУРБИННЫХ УСТАНОВОК

14.1. Рассчитать цикл Карно, который осуществляется насыщенным водяным паром. Установка работает по схеме рис. 14.1: сухой насыщенный пар при давлении $p_1=2$ МПа поступает в цилиндр паровой машины, где изоэнтропно расширяется до 0,1 МПа, после чего поступает в теплообменник; там влажный пар частично конденсируется до тех пор, пока его энтропия не становится равной энтропии жидкости в состоянии насыщения при $p_1=2$ МПа. Пароводяная смесь изоэнтропно сжимается компрессором до $p_4=p_1$, и кипящая вода подается в котел, где она превращается снова в сухой насыщенный пар.

Определить параметры во всех точках цикла, термический к. п. д. цикла, полезную работу, теплоту q_1, подведенную в цикле, и q_2, отведенную к нижнему источнику.

Ответ: $\eta_t=0{,}345$; $l=648$ кДж/кг; $q=1890$ кДж/кг; $q_2=1242$ кДж/кг.

14.2. В установке, описанной в задаче 14.1, теплообменник T (рис. 14.1) заменен конденсатором, в котором отработанный в цилиндре паровой машины пар полностью конденсируется до состояния 5, после чего конденсат сжимается поставленным взамен компрессора водяным насосом до давления p_1 и подается в котел, где подогревается до температуры насыщения, а затем превращается в сухой насыщенный пар. Иными словами, цикл Карно заменяется на цикл Ренкина.

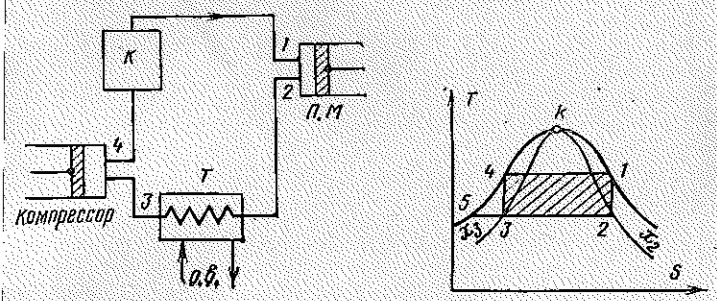


Рис. 14.1. К задаче 14.1.

Каков термический к. п. д. этого цикла; насколько он уменьшился по отношению к $\eta_{t,к}$? Начальное и конечное давления те же, что и в цикле задачи 14.1.

Ответ: $\eta_t = 0{,}303$; $\dfrac{\Delta\eta_t}{\eta_{t,к}} \cdot 100 = 11{,}7\%$.

14.3. Паротурбинная установка работает по циклу Ренкина при следующих параметрах пара: перед турбиной $p_1 = 9$ МПа и $t_1 = 535$ °С, давление в конденсаторе $p_2 = 40$ гПа (рис. 14.2). Определить внешние работы турбины и питательного насоса, а также термический к. п. д. цикла с учетом и без учета работы насоса и относительную разность этих к. п. д.

Ответ: $l_t = 1435$ кДж/кг; $l_н = 9{,}2$ кДж/кг; $\eta_t = 0{,}4265$; без учета работы насоса $\eta_t = 0{,}4280$; $\Delta\eta/\eta_t = 0{,}4\%$. Следует отметить, что в действительности насос потребляет несколько большую работу, так как сжимает воду до давления, превосходящего давление пара в котле.

14.4. Паротурбинная установка работает по циклу Ренкина с начальными параметрами $p_1 = 10$ МПа и $t_1 = 530$ °С. Давление в конденсаторе $p_2 = 40$ гПа.

Определить термический к. п. д. цикла Ренкина и сравнить его с термическим к. п. д. цикла Карно в том же интервале температур.

Ответ: $\eta_{t,р} = 0{,}429$; $\eta_{t,к} = 0{,}624$.

14.5. Определить, какова должна быть температура пара перед входом в турбину, если его давление при этом $p_1 = 10$ МПа, давление в конденсаторе $p_2 = 40$ гПа, а влажность на выходе из турбины не должна превышать 15%. Задачу решать, используя данные таблиц.

Ответ: $t_1 \geqslant 740$ °С.

14.6. При одинаковой начальной температуре $t_1=500\,°C$ по строить кривую зависимости η_t цикла паротурбинной установки о начального давления p_1, приняв его равным 5,0; 10,0; 15,0 20,0 МПа. Давление в конденсаторе одинаково, $p_2=40$ гПа. Учест работу питательного насоса. Представить циклы в T, S-диаграмм

Ответ: p_1, МПа	5	10	15	20
η_t	0,401	0,424	0,436	0,44

14.7. При одинаковом начальном давлении $p_1=10$ МПа по строить кривую зависимости η_t цикла паротурбинной установки о начальной температуры t_1, приняв ее равной 450, 500, 550 и 600 °С

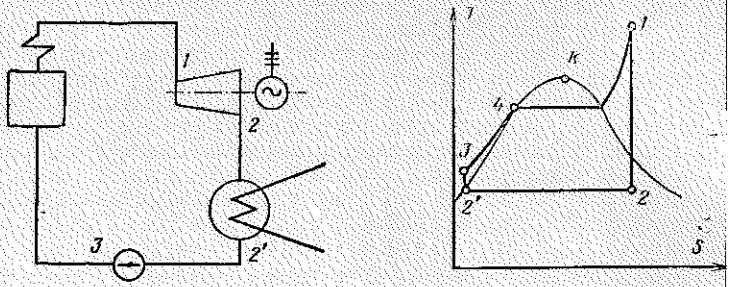


Рис. 14.2. К задаче 14.3.

Давление в конденсаторе одинаково, $p_2=50$ гПа. Учесть работ питательного насоса. Представить циклы в T, S-диаграмме.

Ответ: t_1, °С	450	500	550	600
η_t	0,412	0,419	0,426	0,43

14.8. Паротурбинная установка работает при параметрах пар перед турбиной $p_1=9$ МПа и $t_1=535\,°C$. Построить кривую зависи мости термического к. п. д. цикла от давления в конденсаторе p_2 которое принять равным 20, 40, 60, 80 гПа.

Ответ: p_2, гПа	20	40	60	80
η_t	0,442	0,426	0,417	0,40

14.9. Определить суточную экономию топлива, получающуюс в результате замены турбинной установки, работающей при пара метрах $p_1=3{,}5$ МПа и $t_1=450\,°C$ на установку с начальными пара метрами $p_1=30$ МПа и $t_1=650\,°C$.

Давление в конденсаторах одинаковое, $p_2=40$ гПа, мощност установки $N=50$ МВт, теплота сгорания топлива $Q^p_н=30$ МДж/кг а к. п. д. парогенераторов $\eta_{пг}=0{,}80$ в старой и 0,90 в новой уста новке. Потерями во всех остальных частях (кроме парогенератора) пренебречь.

Ответ: 135 т/сут.

14.10. Определить зависимость термического к. п. д. паротур бинной установки от начальных параметров пара, если при на чальных и конечных давлениях соответственно $p_1=3{,}0$ МПа и $p_2=$ $=40$ гПа, пар перед турбиной: 1) имеет сухость $x=0{,}9$; 2) сухой насыщенный; 3) перегретый до температуры 450 °С.

Ответ: 1) $\eta_t=0{,}347$; 2) $\eta_t=0{,}351$; 3) $\eta_t=0{,}376$.

14.11. Паровая турбина мощностью 25 МВт работает при начальных параметрах $p_1=10{,}0$ МПа и $t=510$ °С. Давление в конденсаторе $p_2=40$ гПа. Теплота сгорания топлива $Q^{\text{р}}_{\text{н}}=30$ МДж/кг.

Определить мощность парогенератора и часовой расход топлива, если $\eta_{\text{пг}}=0{,}85$, а температура питательной воды $t_{\text{п.в}}=90$ °С.

Ответ: $N_{\text{пг}}=54{,}2$ МВт; $B=7656$ кг/ч.

14.12. Определить состояние пара за турбиной и подсчитать внутренний к. п. д. паротурбинной установки, если начальные параметры $p_1=13{,}0$ МПа и $t_1=565$ °С, давление в конденсаторе $p_2=40$ гПа, внутренние относительные к. п. д. турбины и питательного насоса соответственно $\eta^{\text{т}}_{\text{o}i}=0{,}85$ и $\eta^{\text{н}}_{\text{o}i}=0{,}87$.

Решение. Цикл, по которому работает установка, изображен на рис. 14.3.

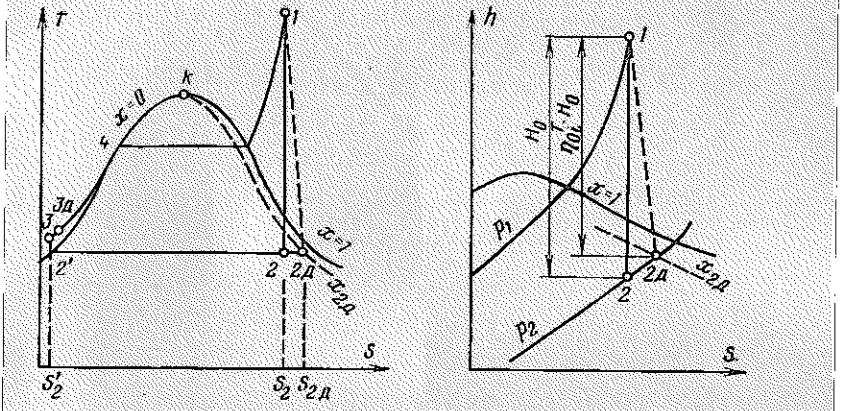


Рис. 14.3. К задаче 14.12.

Сначала определим состояние пара в конце изоэнтропного расширения пара в турбине. Начальную энтальпию и энтропию находим по таблицам [4]: $h_1=3506$ кДж/кг и $s_1=6{,}653$ кДж/(кг·К). Энтальпию пара в точке *2* находим, рассчитывая изоэнтропный процесс *1-2*:

$$x_2=\frac{6{,}653-0{,}4225}{8{,}473-0{,}4225}=0{,}774;$$

$$h_2=h'_2+r_2x_2=121+2433\cdot0{,}774=2004 \text{ кДж/кг}.$$

Таким образом, изоэнтропный теплоперепад

$$H_0=h_1-h_2=3506-2004=1502 \text{ кДж/кг}.$$

По определению

$$\eta^{\text{т}}_{\text{o}i}=\frac{h_1-h_{2\text{д}}}{h_1-h_2}=\frac{h_1-h_{2\text{д}}}{H_0},$$

следовательно,

$$h_{2\text{д}}=h_1-\eta^{\text{т}}_{\text{o}i}H_0=3506-0{,}85\cdot1502=2229 \text{ кДж/кг}.$$

Зная энтальпию, легко найти остальные параметры при p_2=40 гПа. Для этого сначала необходимо найти степень сухости в конце действительного процесса расширения:

$$x_{2д} = \frac{h_{2д} - h'_2}{r_2} = \frac{2229 - 121}{2433} = 0{,}866.$$

Внутренний к. п. д. цикла определяется по формуле

$$\eta_i = \frac{H_0 \eta^{т}_{oi} (h_3 - h_{2t})/\eta^{н}_{oi}}{h_1 - h_{3д}}.$$

Находим энтальпию воды после теоретического и действительного (с учетом потерь) сжатия в насосе. Энтальпия $h_{2t}=h'_2$= =121,4 кДж/кг, энтропия $s_{2t}=s'_2$=0,4225 кДж/(кг·К). Энтальпия в точке *3* определяется в результате изоэнтропного процесса *2-3* (s_{2t}=const). Интерполируя табличные данные [4, табл. III], находим при давлении $p_3=p_1$=13,0 МПа и s_3=0,4225 кДж/(кг·К) энтальпию h_3=134,8 кДж/кг. Разность h_3-h_{2t}=134,8—121,4= =13,4 кДж/кг представляет собой теоретическую работу насоса.

Энтальпия в конце сжатия $h_{3д}$ с учетом потерь равна:

$$h_{3д} = \frac{h_3 - h'_2}{\eta^{н}_{oi}} = 121{,}4 + \frac{134{,}8 - 121{,}4}{0{,}87} = 136{,}8 \text{ КДж/кг}.$$

Таким образом:

$$\eta_i = \frac{1502 \cdot 0{,}85 - (134{,}8 - 121{,}4)/0{,}87}{3506 - 137} = 0{,}374.$$

Определяем термический к. п. д. цикла Ренкина (который не учитывает потери):

$$\eta_t = \frac{h_1 - h_2 - (h_3 - h'_2)}{h_1 - h_3} = \frac{(3506 - 2004) - (134{,}8 - 121{,}4)}{3506 - 135} = 0{,}442.$$

Если при определении внутреннего к. п. д. установки пренебречь работой насоса, то окажется, что

$$\eta_i \approx \eta'_t = \frac{H_0 \eta^{т}_{oi}}{h_1 - h'_2} = \frac{h_1 - h_2}{h_1 - h'_2} \eta^{т}_{oi} = \eta'_t \eta^{т}_{oi} = 0{,}444 \cdot 0{,}85 = 0{,}377.$$

Здесь $\eta'_t=(h_1-h_2)/(h_1-h'_2)$=(3506—2004)/(3506—121)=0,444 есть несколько завышенный термический к. п. д. цикла, не учитывающий работу насоса.

Разница η_t и η'_t в нашем случае составляет 0,53%. Приблизительно такой же будет ошибка и в определении расхода топлива. Тем не менее соотношение

$$\eta_i = \eta_{oi} \eta_t$$

широко применяется в теплотехнических расчетах. Его можно считать вполне удовлетворительным при невысоких параметрах пара перед турбиной, когда работой насоса можно пренебрегать.

14.13. Определить внутренний относительный к. п. д. турбины, если внутренние потери вследствие необратимости процесса расширения пара в турбине 138 кДж/кг.

Состояние пара перед турбиной p_1=10,0 МПа, t_1=500 °С, давление в конденсаторе p_2=40 гПа.

Ответ: $\eta^{т}_{oi}$=0,900.

14.14. Определить параметры пара перед конденсатором, где давление p_2=40 гПа, если параметры пара перед турбиной p_1=9 МПа и t_1=510 °С, а внутренний относительный к. п. д. турбины $\eta^{т}_{oi}$=0,87. Построить процесс в h, s- и T, s-диаграммах. Задачу решать, пользуясь таблицами.

Ответ: $x_{2д}$=0,852; $h_{2д}$=2194 кДж/кг; $s_{2д}$=7,281 кДж/(кг·К); $v_{2д}$=29,66 м³/кг.

14.15. Определить параметры, определяющие состояние пара за турбиной и подсчитать внутренний к. п. д. установки, если p_1=11 МПа, t_1=550 °С, p_2=40 гПа и внутренний относительный к. п. д. турбины $\eta^{т}_{oi}$=0,85. Работу насоса не учитывать. Задачу решать, пользуясь h, s-диаграммой.

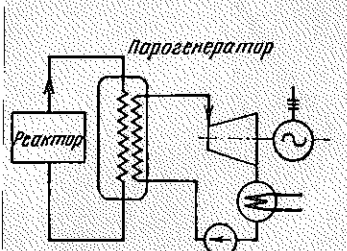


Рис. 14.4. К задаче 14.16.

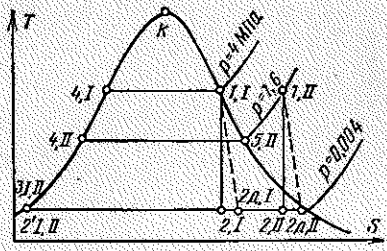


Рис. 14.5. К задаче 14.16.

Ответ: $x_{2д}$=0,871; $h_{2д}$=2239 кДж/кг; η_t=0,371.

14.16. Сравнить внутренние к. п. д. двух паротурбинных установок с атомными реакторами.

Обе установки работают по двухконтурной схеме (рис. 14.4). В первом контуре (атомного реактора) теплоносителем является вода.

В установке, выполненной по первому варианту, вода из первого контура направляется в парогенератор, во втором контуре которого образуется сухой насыщенный пар с давлением p_1=4 МПа. Этот пар и подается в турбину.

В установке по второму варианту в парогенераторе образуется перегретый пар с параметрами p_1=1,6 МПа и t_1=250 °С.

Давление в конденсаторе p_2 одинаково для обеих установок и равно 40 гПа, а внутренний относительный к. п. д. турбин $\eta^{т}_{oi}$=0,80.

Циклы, по которым работают установки, изображены на рис. 14.5.

Ответ: η^{I}_{t}=0,291; η^{II}_{t}=0,260.

14.17. Определить к. п. д. брутто установки (т. е. без учета расхода энергии на собственные нужды), если параметры пара перед турбиной p_1=9 МПа, t_1=535 °С, давление в конденсаторе p_2=40 гПа и если известны следующие к. п. д.: относительный внутренний η_{oi}=0,86, механический $\eta_м$=0,95, электрогенератора $\eta_г$=0,98, трубопроводов (учитывающий потери трубопроводами теплоты в окружающую среду) $\eta_{тп}$=0,94, парогенераторов $\eta_{пг}$=0,92.

Работу насосов не учитывать.

Ответ: $\eta^{бр}_{уст}$ = 29,6%.

14.18. Мощность паротурбинной установки на клеммах электрогенератора $N_э$=50 МВт. Определить удельный расход топлива $b_э$ и удельный расход теплоты $q_э$ на 1 МДж выработанной электроэнергии, а также часовой расход топлива $B_э$, если пар на входе в турбину имеет параметры: p_1=3,5 МПа, t_1=435 °С, давление в конденсаторе p_2=40 гПа.

Известны к. п. д. внутренний относительный η_{oi}=0,79, механический $\eta_м$=0,96, электрогенератора $\eta_г$=0,98 и парогенератора $\eta_{пг}$==0,88. Теплота сгорания топлива $Q^р_в$=15 МДж/кг.

Ответ: $b_э$=0,268 кг/МДж; $B_э$=48 190 кг/ч; $q_э$=4,02 МДж теплоты/МДж энергии.

14.19. Удельный расход пара на выработку электроэнергии в турбогенераторе мощностью $N_э$=25 МВт $d_э$=2 кг/МДж.

Каковы термический к. п. д. цикла η_t, относительный эффективный к. п. д. η_{oe} и часовой расход пара $D_э$, если известно, что к. п. д. электрического генератора $\eta_г$=0,98. Параметры пара перед соплами турбины: p_1=9 МПа и t_1=540 °С. Давление пара на выходе из турбины (противодавление) p_2=0,65 МПа. Температура питательной воды $t_{п.в}$=140 °С.

Работа насоса не учитывается.

Ответ: η_t=0,243; η_{oe}=0,726; $D_э$=180 т/ч.

14.20. В паротурбинной установке, работающей с начальными параметрами p_1=11 МПа и t_1=550 °С, осуществляются два отбора на собственные нужды: при $p_а$=4 МПа отбирается 20 000 кг/ч пара и при $p_б$=2,5 МПа отбирается 10 000 кг/ч. Давление в конденсаторе p_2=40 гПа.

Определить внутреннюю мощность турбины, если ее η_{oi}=0,80, а паропроизводительность парогенератора D=100 т/ч, и найти удельный расход теплоты. Работу питательного насоса не учитывать.

Ответ: $N_i = 25{,}26$ МВт; $q_i = \dfrac{1}{\eta_i} = 3{,}70$ Дж/Дж.

14.21. К соплам паровой турбины поступает пар с параметрами p_1=17 МПа и t_1=550 °С. После изоэнтропного расширения до $t_а$==350 °С он направляется в промежуточный пароперегреватель, где его температура повышается до $t_{пе}$=520 °С. Затем пар расширяется в последующих ступенях турбины до давления в конденсаторе p_2==40 гПа (рис. 14.6).

Определить: 1) термический к. п. д. цикла со вторичным перегревом; 2) насколько уменьшается влажность пара на выходе из турбины и насколько увеличивается термический к. п. д. цикла в результате введения вторичного перегрева; 3) каковы средние интегральные температуры подвода теплоты в циклах с промежуточным перегревом и без него?

Учесть работу насоса.

Ответ: η_t=0,462; относительное уменьшение влажности $[\Delta(1-x)/(1-x)]100$=28%; относительное увеличение термического к. п. д.: $100\,\Delta\eta/\eta$=3,6%; средняя интегральная температура подвода теплоты в цикле со вторичным перегревом $T^{вт}_{ср}$=562 К, то же — в цикле без вторичного перегрева, $T_{ср}$=545 К.

14.22. Отработавший в части высокого давления (ч. в. д.) турбины пар давлением $p_а$=1,5 МПа направляется в промежуточный перегреватель,

До какой температуры нужно перегреть пар в промежуточном пароперегревателе, чтобы при дальнейшем изоэнтропном расширении в ч. н. д. пар при конечном давлении p_2=40 гПа имел бы сухость x=0,90%?

Ответ: до t=536 °С.

14.23. Паротурбинная установка мощностью N=200 МВт работает на паре следующих параметров: начальное давление p_1=13,0 МПа, температура t_1=565 °С. Промежуточный перегрев осуществляется при давлении p_a=2,0 МПа до первоначальной температуры $t_{п.в}$=565 °С. Давление в конденсаторе p_2=40 гПа. Температура питательной воды $t_{п.в}$=160 °С.

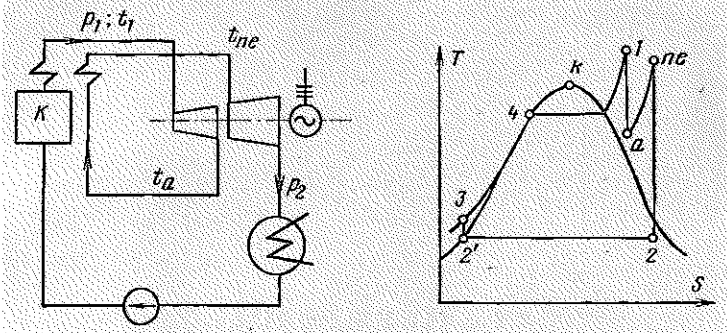


Рис. 14.6. К задаче 14.21.

Определить расход топлива B, т/ч, если теплота сгорания его $Q^р_н$=30 МДж/кг, а к. п. д. парогенератора $\eta_{пг}$=0,91. Прочими потерями пренебречь. Работу насоса учесть.

Ответ: B=49,57 т/ч.

14.24. При проектировании мощной тепловой станции были сделаны расчеты в двух вариантах: 1) на начальные параметры p_1=30,0 МПа и t_1=650 °С с двумя промежуточными перегревами пара до 565 °С при давлениях 6,5 и 1,5 МПа и 2) на параметры p_1=22,0 МПа и t_1=580 °С с одним промежуточным перегревом до 565 °С при давлении 3,5 МПа. Давление в конденсаторе p_2=40 гПа.

Сравнить термические к. п. д. циклов этих установок, не учитывая работу питательных насосов. Представить циклы в T, s-диаграмме.

Ответ: 1) $\eta_{t,1}$=0,501; 2) $\eta_{t,2}$=0,476.

14.25. Определить термический к. п. д. цикла с предельной регенерацией теплоты в паротурбинной установке, в которой пар перед турбиной имеет параметры p_1=3,5 МПа и t_1=435 °С, а давление в конденсаторе p_2=50 гПа.

Вода подогревается до температуры $t_в$=130 °С. Работу насоса не учитывать.

Ответ: $\eta_{t,р}^{пред} = 40{,}8\%$.

14.26. Турбина, в которую поступает пар с параметрами p_1=9,0 МПа и t_1=535 °С, имеет один регенеративный отбор при p^o=

=0,3 МПа в смешивающий подогреватель. Давление за турбиной p_2=40 гПа.

Найти термический к. п. д. регенеративного цикла и сравнить его с термическим к. п. д. цикла с предельной регенерацией теплоты при условии, что в последнем цикле вода подогревается до той же температуры, что и в цикле с одним смешивающим подогревателем [1].

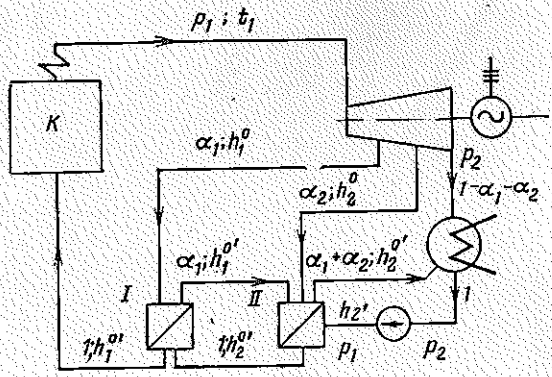


Рис. 14.7. К задаче 14.27.

Ответ: $\eta_{t,\,p} = 0{,}457$; $\eta_{t,\,p}^{пред} = 0{,}471$.

14.27. В паровую турбину (рис. 14.7) поступает пар с параметрами p_1=9,0 МПа и t_1=540 °С. Турбина имеет два регенеративных отбора в подогреватели поверхностного типа с каскадным сбросом конденсата греющего пара. Давления отборов p^o_1=0,5 МПа и p^o_2=0,12 МПа. Давление в конденсаторе p_2=40 гПа.

Определить термический к. п. д. регенеративного цикла и удельный расход пара на 1 МДж и на 1 кВт·ч выработанной энергии. Сравнить эти показатели с такими же показателями для цикла без регенерации. Вычислить величину экономии от введения регенеративного подогрева.

Решение. Согласно схеме рис. 14.7 находим по h, s-диаграмме и таблицам необходимые для расчета значения энтальпий:

h_1=3485, h_2=2043, h^o_1=2730, h^o_2=2487,

$h_1^{o'} = 640$, $h_2^{o'} = 439$ и $h'_2 = 121$ кДж/кг.

Для того чтобы найти значения отборов α_1 и α_2 составляем балансы подогревателей. Баланс первого подогревателя

$$\alpha_1 (h_1^o - h_1^{o'}) = h_1^{o'} - h_2^{o'}.$$

Баланс второго подогревателя

$$\alpha_2 (h_2^o - h_2^{o'}) + \alpha_1 (h_1^{o'} - h_2^{o'}) = h_2^{o'} - h'_2.$$

[1] Во всех задачах на регенеративные циклы считается, что в подогревателях вода нагревается до температуры конденсата греющего пара. Работа насосов не учитывается.

Решая совместно эти уравнения, находим $\alpha_1=0{,}0962$ и $\alpha_2=0{,}1460$.

Термический к. п. д. регенеративного цикла

$$\eta_{t,\,р}=\frac{l_ц}{q_1}=\frac{h_1-h_2-\alpha_1(h^o_1-h_2)-\alpha_2(h^o_2-h_2)}{h_1-h^{o\prime}_1}=\frac{1311}{2845}=0{,}461.$$

Удельный расход пара

$$d=\frac{1}{l_ц}=\frac{10^6}{1311\cdot10^3}=0{,}763\ \text{кг/МДж}=2{,}75\ \text{кг/(кВт}\cdot\text{ч)}.$$

Термический к. п. д. цикла без регенерации (цикла Ренкина)

$$\eta_t=\frac{h_1-h_2}{h_1-h'_2}=\frac{1422}{3364}=0{,}429.$$

Удельный расход пара для этого цикла

$$d=\frac{1}{l_ц}=\frac{10^6}{1442\cdot10^3}=0{,}693\ \text{кг/МДж}=2{,}49\ \text{кг/(кВт}\cdot\text{ч)}.$$

Экономия, полученная в результате введения регенеративного подогрева,

$$\frac{\Delta\eta}{\eta_t}\cdot100=100\cdot\frac{\eta_{t,\,р}-\eta_t}{\eta_t}=7{,}5\%.$$

14.28. В установке, описанной в задаче 14.27, поверхностные подогреватели заменены на смешивающие.

Определить термический к. п. д. регенеративного цикла, экономию за счет введения регенеративного подогрева и часовой расход топлива, если мощность турбины $N=50$ МВт, к. п. д. парогенератора $\eta_{пг}=0{,}90$, теплота сгорания топлива $Q^р_н=28$ МДж/кг, остальные условия те же, что и в задаче 14.27.

Ответ: $\eta_{t,\,р}=0{,}467$; $\frac{\Delta\eta}{\eta_t}\cdot100=8{,}9\%$; $B=15{,}3$ т/ч.

14.29. Теплофикационная турбина с противодавлением работает с входными параметрами пара $p_1=9{,}0$ МПа и $t_1=535$ °С, противодавление $p_2=0{,}3$ МПа. Отработанный пар отправляется на производство и полностью возвращается на ТЭЦ в виде конденсата с энтальпией $h_к=400$ кДж/кг. Внутренний относительный к. п. д. турбины $\eta_{oi}=0{,}85$.

Пренебрегая прочими потерями, определить выработку электрической энергии на единицу отданного потребителю тепла.

Ответ: $\xi=0{,}302$ Дж/Дж.

14.30. На ТЭЦ установлена турбина мощностью $N=12$ МВт, в которой работает пар с начальными параметрами $p_1=3{,}5$ МПа и $t_1=435$ °С. Турбина имеет два отбора. Первый — производственный при $p^o_1=1{,}0$ МПа, расход пара в отбор $D^o_1=50$ т/ч. Второй — теплофикационный при $p^o_2=0{,}12$ МПа; $D^o_2=40$ т/ч. Давление в конденсаторе $p_2=40$ гПа.

Определить часовой расход пара через турбину, если известны к. п. д.: относительный внутренний $\eta_{oi}=0{,}80$; механический $\eta_м=0{,}95$ и электрогенератора $\eta_г=0{,}98$.

Ответ: $D=98{,}9$ т/ч.

14.31. Определить часовой расход топлива для установки с турбиной, описанной в задаче 14.30, если к. п. д. парогенератора $\eta_{пг}$=0,90, теплота сгорания топлива $Q^{р}_{н}$=30 МДж/кг и температура питательной воды $t_{п.в}$=120 °С.

Каков был бы суммарный часовой расход топлива, если бы выработка энергии производилась раздельно: электроэнергии — на конденсационной станции (с теми же параметрами пара, что и на ТЭЦ) и теплоты — в отопительной котельной. Коэффициент полезного действия всех парогенераторов и котлов $\eta_{пг}$=0,90; температура полностью возвращаемого конденсата $t_{к}$=60 °С.

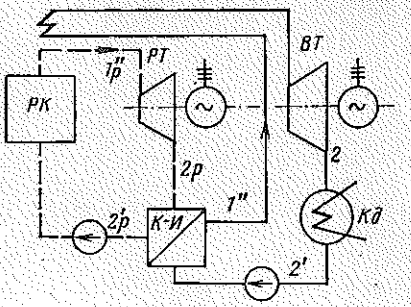


Рис. 14.8. К задаче 14.32.

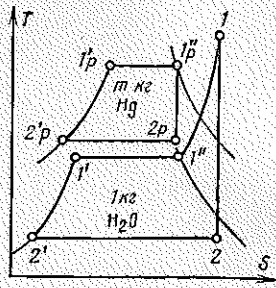


Рис. 14.9. К задаче 14.32.

Ответ: расход топлива на ТЭЦ B=10,25 т/ч; на конденсационной станции $B_{к}$=4,98 т/ч; в отопительной котельной $B_{от}$=8,77 т/ч. Экономия топлива за счет введения теплофикации составляет $B_{к}+B_{от}-B$=3,50 т/ч.

14.32. Бинарная ртутно-водяная установка работает по схеме, показанной на рис. 14.8. Ртутный котел вырабатывает сухой насыщенный пар при температуре $t^{р}_{1}$=500 °С, который направляется в ртутную турбину. Отработанный пар с температурой $t^{р}_{2}$=230 °С идет в конденсатор-испаритель, где отдает теплоту конденсации воде, подаваемой насосом из конденсатора пароводяной турбины. При этом вода превращается также в сухой насыщенный пар, который перегревается в пароперегревателе, установленном в газоходах ртутного котла, и направляется в пароводяную турбину. Параметры водяного пара: p_{1}=2,4 МПа, t_{1}=520 °С; давление в конденсаторе p_{2}=40 гПа.

Определить термический к. п. д. бинарного цикла (рис. 14.9) и его отношение к термическому к. п. д. цикла Карно, осуществляемого в тех же пределах максимальной и минимальной температур.

Ответ: $\eta_{t.бин}$=0,553; $\eta_{t.бин}/\eta_{t.к}$=0,893.

14.33. Парогазовая установка работает по следующей схеме (рис. 14.10): воздух из атмосферы (состояние *1*) сжимается компрессором (состояние *2*) и подается в топочное устройство высоконапорного парогенератора *ВПГ*, где сгорает топливо. Продукты сгорания сначала отдают часть своей теплоты нагретой до температуры кипения воде и водяному пару, циркулирующим в особом контуре, а затем направляются в газовую турбину *ГТ* (состояние *3*),

в которой, изоэнтропно расширяясь, совершают полезную работу. Отработавшие газы (состояние *4*) идут в газовый подогреватель *ГП* и нагревают в нем конденсат водяного пара до температуры кипения (состояние *9*), после чего выбрасываются в атмосферу (состояние *1*). Кипящая вода из подогревателя *ГП* направляется

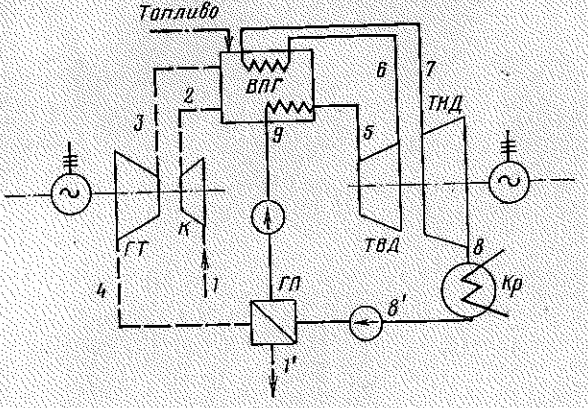


Рис. 14.10. К задаче 14.33.

в парогенератор *ВПГ*, где испаряется и перегревается (состояние *5*). Перегретый пар, отработав в турбине высокого давления *ТВД* (состояние *6*), снова перегревается за счет теплоты топочных газов *ВПГ* (состояние *7*), затем работает в турбине низкого давления *ТНД* (состояние *8*) и конденсируется в конденсаторе *Кр*. Водяной цикл, таким образом, замыкается. Идеальный бинарный цикл этой установки изображен на рис. 14.11.

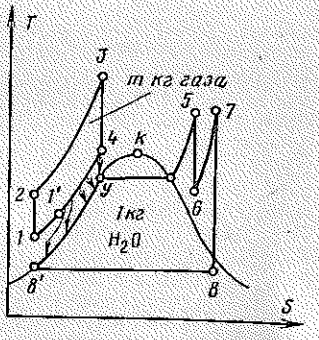


Рис. 14.11. К задаче 14.33.

Рассчитать термический к. п. д. идеального бинарного парогазового цикла, если известны следующие параметры.

Газ: p_4=0,1 МПа; t_1=20°С; t_3==800°С; t'_1=120°С; $\beta=p_2/p_1$=8.

Вода и водяной пар: p_5=1,3 МПа; t_5=565°С; $p_6=p_7$=3,0 МПа; t_7=565°С; p_8=30 гПа.

Найти отношение этого к. п. д. и к. п. д. цикла Карно для максимальной и минимальной температур бинарного цикла.

Газ считать обладающим свойствами воздуха. Темплоемкость газа c_p считать постоянной. Работой водяных насосов пренебречь.

Решение. Прежде всего определяем «недостающие» температуры в точках *2* и *4* газового цикла:

$$T_2 = T_1 \cdot \beta^{\frac{k-1}{k}} = 293 \cdot 8^{\frac{1,4-1}{1,4}} = 531 \text{ К};$$

$$T_4 = T_3 \frac{T_1}{T_2} = 1073 \frac{293}{531} = 592 \text{ К}.$$

Из баланса теплоты в *ГП* определяем кратность газа по отношению к воде, т. е. количество килограммов газа, приходящегося на 1 кг воды. Тепловой баланс записывается в виде:

$$m(h_4 - h'_1) = h_9 - h'_8,$$

откуда

$$m = \frac{h_9 - h'_8}{h_4 - h'_1} = c_p \frac{h_9 - h'_8}{(T_4 - T'_1)} = \frac{1532 - 101}{1{,}005\ (592 - 393)} = 7{,}153.$$

Здесь энтальпии h_9 и h'_8, кДж/кг, определены по таблицам [4] соответственно при $p_5 = 13$ МПа и $p_8 = 30$ гПа.

Термический к. п. д. бинарного цикла

$$\eta_t = \frac{m[(h_3 - h_4) - (h_2 - h_1)] + (h_5 - h_6) + (h_7 - h_8)}{m(h_3 - h_2) + (h_5 - h_9) + (h_7 - h_6)} =$$

$$= \frac{7{,}153\,[1{,}005\,(1073 - 592) - 1{,}005\,(531 - 293)] +}{7{,}153 \cdot 1{,}005\,(1073 - 531) + (3506 - 1532) +} \rightarrow$$

$$\rightarrow \frac{+ (3506 - 3061) + (3604 - 2200)}{+ (3604 - 3061)} = 0{,}561.$$

Энтальпии воды из водяного пара h_5, h_7, h_9 определены по таблицам при заданных параметрах, а h_6, h_8 получены в результате расчета изоэнтропных процессов. Теплоемкость газа

$$c_p = \frac{8{,}314 \cdot 7}{28{,}96 \cdot 2} = 1{,}005 \text{ кДж/(кг·К)}.$$

Коэффициент полезного действия цикла Карно

$$\eta_{t,\text{к}} = 1 - \frac{T_6}{T_3} = 1 - \frac{297}{1093} = 0{,}723.$$

Отношение $\eta_t/\eta_{t,\text{к}} = 0{,}78$.

14.34. Парогазовая установка осуществлена по схеме рис. 14.10 с рабочими телами, имеющими те же параметры в основных точках цикла, что и в задаче 14.33.

Рассчитать внутренний к. п. д. действительного цикла ПГУ (рис. 14.12), если дополнительно известны: внутренние относительные к. п. д. компрессора и газовой турбины $\eta^{\text{к}}_{oi} = 0{,}85$ и $\eta^{\text{т}}_{oi} = 0{,}87$, внутренний относительный к. п. д. пароводяных турбин $\eta^{\text{вт}}_{oi} = 0{,}85$. Известно также, что в газовом подогревателе *ГП* вода нагревается до $t_{10} = 300$ °С, а газ охлаждается до $t_1 = 120$ °С.

Ответ: $\eta_t = 0{,}445$.

14.35. Рассчитать внутреннюю мощность (на лопатках турбин) ПГУ, описанной в задачах 14.33 и 14.34, если известно, что расход водяного пара через турбины $D_{\text{в}} = 40$ т/ч.

Ответ: $N_i = 24{,}7$ МВт.

14.36. В северных районах в холодное время года целесообразна работа бинарных паротурбинных установок, в которых нижний цикл осуществляется насыщенным паром низкокипящего вещества.

Определить термический к. п. д. бинарного цикла вода — фреон-12. Схема установки и цикл изображены на рис. 14.13.

Исходные данные для воды: p_1=16,0 МПа; t_1=540°С; p_2=0,12 МПа; для фреона-12: t^{Φ}_1=95° С; t^{Φ}_2=10° С.

Сравнить полученный $\eta_{t,\text{бин}}$ с термическим к. п. д. простого цикла Ренкина с рабочим веществом — водой, для которого максимальные параметры такие же, как и в бинарном цикле, а давление в конденсаторе p_2=40 гПа.

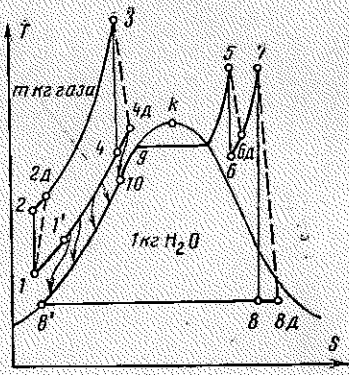


Рис. 14.12. К задаче 14.34.

Дополнительные к табл. 30 приложения данные для фреона-12 таковы:

при температуре насыщения t_s=95 °С энтальпии h' и h'' соответственно равны 522,1 и 599,2 кДж/К, а энтропии s' и s'' составляют 4,5020 и 4,7115 кДж/(кг·К).

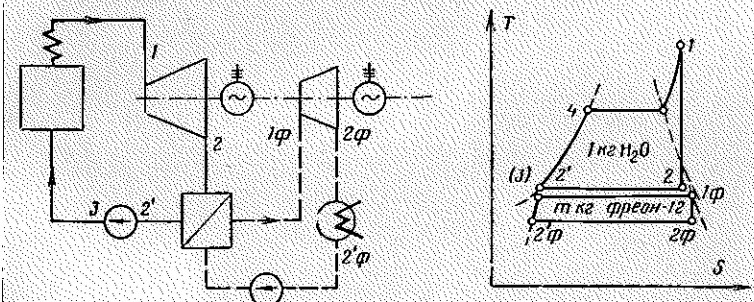


Рис. 14.13. К задаче 14.36.

Ответ: $\eta_{t,\text{бин}}$=0,475; $\eta_{t,\text{р}}$=0,446.

14.37. В паротурбинной установке вода и пар работают, осуществляя необратимый цикл, в котором состояние рабочего тела меняется в следующей последовательности (рис. 14.14): конденсат в состоянии *2'* адиабатно сжимается насосом до состояния *3д* и поступает в паровой котел, в котором нагревается до кипения, испаряется и перегревается. Находясь в состоянии *1''*, пар направляется к турбине, попутно излучая часть своей энергии в окружающую среду и теряя давление из-за сопротивления трению. В состоянии *1'* перед турбиной пар адиабатно дросселируется в регулировочном клапане до давления p_1. Далее пар так же адиабатно

расширяется в турбине до давления $p_2=p_{2д}$ и в состоянии *2д* вх
дит в конденсатор, где и конденсируется при помощи охлаждаю
щей воды. Цикл, таким образом, замыкается точкой *2'*.

Известны следующие параметры: $p''_1=12$ МПа, $t''_1=550$ °С
$p_1=11$ МПа; $t'_1=540$ °С; $p_1=9$ МПа; $p_2=40$ гПа. Коэффициент по
лезного действия: относительный внутренний турбины $\eta^т_{oi}=0{,}8$
насоса $\eta^н_{oi}=0{,}90$, механический $\eta_м=0{,}96$, электрогенератора $\eta_г=$
$=0{,}97$. Теплота сгорания топлива $Q^р_н=30\,000$ кДж/кг. Коэффициен
полезного действия парового котла $\eta_{п.н}=0{,}92$.

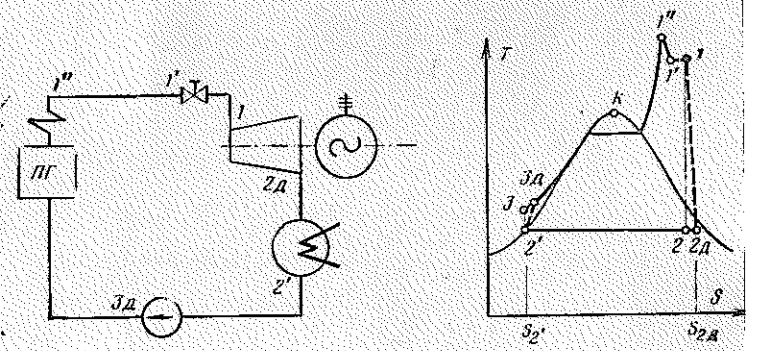


Рис. 14.14. К задаче 14.37.

Составить для этой установки баланс энергии и найти к. п. д
установки на клеммах электрогенератора.

Решение. Составляем таблицу параметров состояния в каждой
характерной точке цикла. Приемы, при помощи которых находятся
эти параметры, были подробно описаны и проработаны в гл. 9 и
в настоящей главе. Поэтому здесь приводятся готовые результаты,
полученные при помощи таблиц [4].

Параметры в характерных точках

	1''	*1'*	*1*	*2*	*2д*	*3'*	*3*	*3д*
p, МПа	12,0	11,0	9,0	0,003	0,003	0,003	12,0	12,0
t, °С	550	540	531,2	24,1	24,1	24,1	24,4	24,7
T, К	823	813	804	297,3	297,3	297,3	297,6	297,8
h, кДж/кг	3478	3463	3463	2095	2224	101	113	114
s, кДж/(кг·К)	6,653	6,671	6,756	6,776	7,499	0,355	0,355	0,35
x	—	—	—	0,779	0,869	0	—	—

Пользуясь этой таблицей, составляем энергетический баланс
относя все его составляющие к 1 кг рабочего тела. Вычисления
ведем в следующей последовательности.

1. Находим теплоту, подведенную в паровом котле:

$$q_1=h''_1-h_{п.в}=h''_1-h_{3д}=3478-114=3364 \text{ кДж/кг}.$$

2. Учитывая к. п. д. парового котла, определяем теплоту, пер
воначально внесенную в установку с топливом:

$$q_{внес}=\frac{BQ^р_н}{D}=\frac{Q^р_н}{И}=\frac{q_2}{\eta_{пг}}=\frac{3364}{0{,}92}=3657 \text{ кДж/кг}.$$

Здесь $И=D/B$ — испарительная способность топлива, кг/кг; B — расход топлива, кг/ч; D — расход воды, кг/ч.

Определяем значение $И$, которым будет удобно пользоваться при дальнейших вычислениях:

$$И = \frac{Q^р_н \eta_{пг}}{q_1} = 8{,}2045 \text{ кг/кг}.$$

3. Потеря энергии при горении топлива

$$q^{топ}_{пот} = q_{внес} - q_1 = \frac{Q^р_н (1 - \eta_{пг})}{И} = 293 \text{ кДж/кг}.$$

4. Потеря теплоты трубопроводами на пути от парового котла до турбины

$$q_{тп} = h''_1 - h_1 = 3478 - 3463 = 15 \text{ кДж/кг}.$$

5. Теплота, отданная охлаждающей воде в конденсаторе,

$$q_2 = h_{2д} - h'_2 = 2224 - 101 = 2123 \text{ кДж/кг}.$$

6. Внутренняя работа турбины

$$l_т = q_1 - q_{тп} - q_2 = 3364 - 15 - 2123 = 1226 \text{ кДж/кг}.$$

7. Потери энергии на трение в подшипниках

$$q_м = l_т (1 - \eta_м) = 1226 (1 - 0{,}96) = 49 \text{ кДж/кг}.$$

8. Работа на муфте электрогенератора (эффективная)

$$l_е = l_т - q_м = \eta_м l_т = 1177 \text{ кДж/кг}.$$

9. Потеря энергии в электрогенераторе

$$q_э = l_е (1 - \eta_г) = 1177 (1 - 0{,}97) = 35 \text{ кДж/кг}.$$

10. Работа на клеммах электрогенератора

$$l_э = l_е - q_э = 1142 \text{ кДж/кг}.$$

Баланс энергии имеет вид:

$$q_{внес} = l_э + q^{топ}_{пот} + q_{тп} + q_2 + q_м + q_э.$$

Подсчитываем к. п. д. установки (брутто) на клеммах электрогенератора:

$$\eta^{бр}_{уст} = \frac{И l_э}{Q^р_н} \cdot 100 = \frac{8{,}2045 \cdot 1142}{30\,000} \cdot 100 = 31{,}2\%.$$

Представляем учащимся возможность самим проверить этот результат, вычисляя предварительно внутренний к. п. д. цикла.

14.38. Составить эксергетический баланс для установки, описанной в задаче 14.37, определив изменения эксергии в каждом из характерных узлов. Подсчитать эксергетические к. п. д. тех же узлов и установки в целом.

В качестве параметров окружающей среды принять параметры воды: $T_0 = 290$ К и $p_0 = 1000$ гПа. Воспользоваться таблицей параметров к задаче 14.37.

Решение. В гл. 7 была предложена задача 7.44 на определение эксергетического к. п. д. паротурбинной установки, который вычислялся как отношение работы, полученной в цикле, к подведенной пер-

воначальной эксергии. Эта эксергия определялась путем вычитания из количества теплоты, выделяющейся при сгорании топлива, не превращаемой в работу части этой теплоты, которая согласно второму закону термодинамики безвозвратно передается нижнему источнику.

Может быть и другая трактовка этого вопроса. За внесенную первоначально эксергию можно принять химическую энергию топлива (полагая, что это полностью организованная энергия) и считать, что передача части внесенной энергии нижнему источнику есть эксергетическая потеря, которая происходит в самой установке; возникает она при переходе химической энергии топлива в теплоту, т. е. при сгорании топлива, а нижнему источнику (охлаждающей воде) передается в конденсаторе.

Такая трактовка предложена в [18]. В этом случае эксергетический баланс должен, так же как и энергетический, сводиться к внесенной с топливом теплоте сгорания $Q^{р}_{н}$ или в пересчете на 1 кг рабочего тела — к величине $Q^{р}_{н}/И$ ($И$ — испарительная способность топлива; о ней см. задачу 14.36).

Решим задачу, пользуясь этим методом.

Увеличение эксергии рабочего тела происходит в насосе и в паровом котле.

Прирост эксергии в насосе равен приросту эксергии рабочего тела:

$$ex_{вд} - ex_{в'} = h_{вд} - h_{в'} - T_0 (s_{вд} - s_{в'}) =$$

$$= 114 - 101 - 290 (0{,}358 - 0{,}355) = 12 \text{ кДж/кг}.$$

Прирост эксергии в парогенераторе представляет собой первоначально внесенную эксергию за вычетом потерь, которые складываются: во-первых, из потерь, учитываемых к. п. д. парового котла и равных

$$П'_{п.к} = \frac{Q^{р}_{н}}{И}(1 - \eta_{пг}) = \frac{30\,000}{8{,}2045}(1 - 0{,}92) = 293 \text{ кДж/кг};$$

во-вторых — из потерь эксергии при окислении топлива $П''_{пг}$; в-третьих — из потерь $П'''_{п.к}$, которые возникают по причине внешней необратимости процесса теплообмена между продуктами сгорания топлива и рабочим телом.

Суммарные потери $П''_{п.к}+П'''_{п.к}$ не зависят от средней температуры продуктов сгорания (объяснение этого положения см. в [18]), а зависят только от средней интегральной температуры $T_{ср.подв}$ рабочего тела в процессе подвода к нему теплоты:

$$П'' + П''' = \frac{Q^{р}_{н}\eta_{пг}}{И}\left[\frac{T_0 (s''_1 - s_{вд})}{h''_1 - h_{вд}}\right].$$

Эта формула вытекает из общего выражения для эксергии теплоты

$$ex_q = q\left(1 - \frac{T_0}{T_{ср.подв}}\right) = q - \frac{qT_0}{T_{ср.подв}},$$

где $1 - T_0/T_{ср.подв}$ — к. п. д. цикла Карно, который может быть осуществлен между температурами $T_{ср.подв}$ и T_0, а величина $qT_0/T_{ср.подв}$ представляет собой не превратимую в работу часть

теплоты q. Понятно, что последнее выражение соответствует $П''_{п.к}+П'''_{п.к}$, потому что $(h''_1-h_{зд})/(s''_1-s_{зд})=T_{ср.подв}$.

Так как $Q^р_н\eta_{п.к}/И=h''_1-h_{зд}$, формула для подсчета $П''_{п.к}+П'''_{п.к}$ упрощается:

$$П''_{п.к}+П'''_{п.к}=T_0(s''_1-s_{зд}).$$

Производим подсчет:

$$П''_{п.к}+П'''_{п.к}=290\,(6{,}653-0{,}358)=1826 \text{ кДж/кг}.$$

Искомое увеличение эксергии в паровом котле

$$\Delta(ex)_{пг}=\frac{Q^р_н}{И}-П'_{пг}-(П'''_{пг}+П''_{пг})=\frac{Q^р_н}{И}-\frac{Q^р_н}{И}(1-\eta_{пг})-$$

$$-T_0(s''_1-s_{зд})=\frac{Q^р_н}{И}\eta_{пг}-T_0(s''-s_{зд})=h''_1-h_{зд}-$$

$$-T_0(s''_1-s_{зд})=3478-114-290\,(6{,}653-0{,}358)=1538 \text{ кДж/кг},$$

или, иначе,

$$\Delta(ex)_{пг}=\frac{30\,000}{8{,}2045}-293-1826=1538 \text{ кДж/кг}.$$

Уменьшение эксергии происходит в трубопроводе на пути от парового котла до турбины; в регулировочном клапане при дросселировании пара, в проточной части турбины, в конденсаторе, за счет трения в подшипниках и, наконец, при передаче превращенных в теплоту потерь в электрогенераторе в окружающую среду.

Уменьшение эксергии в трубопроводе

$$ex_{1''}-ex_1=h_{1''}-h_{1'}-T_0(s_{1''}-s_{1'})=3478-3463-$$

$$-290\,(6{,}653-6{,}671)=20 \text{ кДж/кг}.$$

То же при дросселировании:

$$ex_{1'}-ex_1=h_{1'}-h_1-T_0(s_{1'}-s_1)=$$

$$=3463-3463-290\,(6{,}671-6{,}756)=25 \text{ кДж/кг}.$$

То же в проточной части турбины:

$$ex_1-ex_{2д}=h_1-h_{2д}-T_0(s_1-s_{2д})=3463-2224-290\,(6{,}756-7{,}499)=$$

$$=1455 \text{ кДж/кг}.$$

То же в конденсаторе:

$$ex_{2д}-ex_{2'}=h_{2д}-h_{2'}-T_0(s_{2д}-s_{2'})=$$

$$=2224-101-290\,(7{,}499-0{,}355)=51 \text{ кДж/кг}.$$

Теперь сводим эксергетический баланс для тех узлов установки, в которых происходит изменение состояния рабочего тела.

Увеличение эксергии, кДж/кг		Уменьшение эксергии, кДж/кг	
В насосе	12	В трубопроводе	20
В парогенераторе	1538	В регулировочном клапане	25
		В проточной части турбины	1455
		В конденсаторе	51
Итого:	1550		1551

Невязка баланса составляет всего 0,06%.

Уменьшения эксергии за счет трения в подшипниках и передачи превращенных в тепло электрических потерь в окружающую среду не имеют отношения к рабочему телу. Если допустить, что теплота трения и теплота, эквивалентная потерям в электрогенераторе, полностью передается окружающей среде, то потери эксергии в этих узлах окажутся равными потерям энергии, которые были вычислены в задаче 14.37:

$$\Delta ex_м = q_м = 49 \text{ кДж/кг};$$

$$\Delta ex_э = q_э = 35 \text{ кДж/кг}.$$

Вычисляем эксергетические к. п. д. узлов.

Эксергетический к. п. д. парового котла

$$\eta_{ex}^{пг} = \frac{(ex_1 - ex_{зд})\,И}{Q^р_н} = \frac{1538 \cdot 8,2045}{30\,000} = 0,421.$$

То же трубопровода:

$$\eta_{ex}^{тп} = \frac{ex_1}{ex_2} = \frac{h_1' - h_0 - T_0(s_1' - s_0)}{h_1'' - h_0 - T_0(s_1'' - s_0)} =$$

$$= \frac{3463 - 71 - 290\,(6,671 - 0,253)}{3478 - 71 - 290\,(6,653 - 0,253)} = 0,987.$$

Здесь $h_0 = 71,3$ кДж/кг и $s_0 = 0,253$ кДж/(кг·К) — параметры воды при 17 °С и 0,1 МПа.

Эксергетический к. п. д. регулировочного клапана:

$$\eta_{ex}^{дросс} = \frac{ex_1}{ex_1'} = \frac{h_1 - h_0 - T_0(s_1 - s_0)}{h'_1 - h_0 - T_0(s_1' - s_0)} =$$

$$= \frac{3463 - 71 - 290\,(6,756 - 0,253)}{3463 - 71 - 290\,(6,771 - 0,253)} = 0,978.$$

То же турбины:

$$\eta^т_{ex} = \frac{h_{2д} - h_1}{ex_{2д} - ex_1} = \frac{2224 - 3463}{-1455} = 0,851.$$

То же конденсатора:

$$\eta^к_{ex} = 0.$$

То же питательного насоса:

$$\eta^н_{ex} = \frac{ex_{зд} - ex_{2'}}{h_{зд} - h_{2'}} = \frac{12}{13} = 0,923.$$

Эксергетические к. п. д. процессов отвода в окружающую среду теплоты трения и теплоты, выделившейся в генераторе, равны:

$$\eta^м_{ex} = \eta^г_{ex} = 0.$$

Наконец, подсчитываем эксергетический к. п. д. (брутто) всей установки. Он совпадает с электрическим к. п. д. установки (см. задачу 14.37):

$$\eta_{ex}^{уст} = \frac{l_э, И}{Q^р_н} = \frac{1142 \cdot 8,2045}{30\,000} = 0,312.$$

14.39. Определить эксергетические потери в каждом из узлов установки, описанной в задаче 14.37. Найти для этих узлов и для всей установки коэффициенты эксергетических потерь, а также эффективный к. п. д. установки.

Использовать результаты решений задач 14.37 и 14.38.

Решение. Расчет ведем по методике [18]. Потери эксергии в паровом котле были подсчитаны в задаче (14.38). В расчете на 1 кг рабочего тела они равны:

$$П_{п.к}=П'_{п.к}+(П''_{п.к}+П'''_{п.к})=293+1826=2119 \text{ кДж/кг}.$$

Коэффициент эксергетических потерь

$$\zeta_{п.к}=\frac{П_{п.к}И}{Q^р_н}=0{,}5794.$$

Потери эксергии в трубопроводе и соответствующий коэффициент эксергетических потерь

$$П_{тр}=ex_2-ex_1=20 \text{ кДж/кг};$$

$$\zeta_{тр}=\frac{П_{тп}И}{Q^р_н}=\frac{20\cdot 8{,}2045}{30\,000}=0{,}0055.$$

То же в регулировочном клапане:

$$П_{дросс}=T_0(s_1-s_{1'})=290(6{,}756-6{,}671)=25 \text{ кДж/кг};$$

$$\zeta_{дросс}=\frac{П_{тп}И}{Q^р_н}=0{,}0068.$$

То же в турбине:

$$П_т=T_0(s_{2д}-s_1)=290(7{,}499-6{,}756)=215 \text{ кДж/кг};$$

$$\zeta_т=\frac{П_тИ}{Q^р_н}=0{,}0592.$$

То же в конденсаторе:

$$П_{конд}=i_{2д}-i_{2'}-T_0(s_{2д}-s_{2'})=51 \text{ кДж/кг};$$

$$\zeta_{конд}=\frac{П_{конд}И}{Q^р_н}=0{,}0139.$$

То же в питательном насосе:

$$П_н=T_0(s_{3д}-s_{2'})=290(0{,}358-0{,}355)=1 \text{ кДж/кг};$$

$$\zeta_н=\frac{П_нИ}{Q^р_н}=0{,}0003.$$

Эксергетические потери в подшипниках

$$П_м=l_i-l_e=1226-1177=49 \text{ кДж/кг};$$

$$\zeta_м=\frac{П_мИ}{Q^р_н}=0{,}0134.$$

Потери в электрогенераторе

$$П_э=l_e-l_э=1177-1142=35 \text{ кДж/кг};$$

$$\zeta_э=\frac{П_эИ}{Q^р_н}=0{,}0096.$$

Коэффициент эксергетических потерь для всей установки рав сумме таких же коэффициентов для отдельных узлов:

$$\Omega_{уст} = \sum_{j=1}^{n} \Omega_j = 0{,}6881.$$

В заключение определяем эффективный к. п. д. всей установк

$$\eta_{эфф} = 1 - \Omega_{уст} = 1 - 0{,}6881 = 0{,}3119.$$

Как видно, он оказался равным электрическому к. п. д. (бру то) для всей установки (см. задачу 14.37).

Оценить эффективность работы установки и ее отдельных часте на основании результатов решений задач 14.37—14.39 следует сами учащимся.

Глава пятнадцатая

ЦИКЛЫ ХОЛОДИЛЬНЫХ МАШИН

15.1. Воздушная холодильная машина должна обеспечить темп ратуру в охлаждаемом помещении $t_{охл} = 5\,°C$ при температур окружающей среды $t_0 = 20\,°C$.

Холодопроизводительность машины 840 МДж/ч. Давление воз духа на выходе из компрессора $p_2 = 0{,}5$ МПа, давление в холодил ной камере $p_1 = 0{,}1$ МПа.

Определить мощность двигателя для привода машины, расхо воздуха, холодильный коэффициент и количество теплоты, переда ваемое окружающей среде. Подсчитать холодильный коэффициен машины, работающей по циклу Карно в том же интервале темпера тур. Представить цикл в T, s-диаграмме.

Ответ: $N = 138$ кВт; $m = 10\,074$ кг/ч; $\varepsilon = 1{,}7$; $\varepsilon_К = 10{,}72$; $Q = 1336$ МДж/ч.

15.2. Определить мощность двигателя холодильной машины, есл температура охлаждаемого помещения $t_{охл} = -10\,°C$, температур окружающей среды $t_0 = 25\,°C$ при холодопроизводительност 600 МДж/ч. Максимальное давление воздуха на выходе из компрес сора $p_2 = 0{,}5$ МПа, давление в холодильной камере $p_1 = 0{,}1$ МПа Представить цикл в T, s-диаграмме.

Ответ: $N = 102$ кВт.

15.3. Воздушная холодильная машина производит лед при тем пературе $-3\,°C$ из воды с температурой $10\,°C$. Всасываемый в ком прессор воздух имеет температуру $t_1 = -10\,°C$, давление $p_1 = 0{,}098$ МПа и сжимается до давления $p_2 = 0{,}4$ МПа. Затем воздух поступает в холодильник и там охлаждается до $t_3 = 20\,°C$. Расход воздуха равен 1000 м³/ч при нормальных условиях. Определить хо лодильный коэффициент ε, мощность, потребную для привода ком прессора, и количество полученного в час льда.

Решение. Определяем температуру воздуха T_2 после сжатия в компрессоре и T_4 после расширения в цилиндре детандера (рас ширительного цилиндра):

$$T_2 = T_1 \left(\frac{p_2}{p_1}\right)^{\frac{k-1}{k}} = 263 \left(\frac{0{,}4}{0{,}0981}\right)^{\frac{1{,}4-1}{1{,}4}} = 393\ К;$$

$$T_4 = T_3 \frac{T_1}{T_2} = 293 \frac{263}{393} = 196\ К,$$

Для того чтобы 1 кг воды с температурой 10 °С превратить в лед с температурой —3 °С, необходимо отнять от нее, во-первых, теплоту $q_1=c_p(t_2-t_1)=4{,}187(10-0)=41{,}87$ кДж/кг, идущую на охлаждение воды от 10 до 0 °С; во-вторых, теплоту плавления льда $q_2=330{,}7$ кДж/кг; в-третьих, теплоту $q_3=c_л(t_1-t_2)=2{,}09[0-(-3)]=6{,}27$ кДж/кг, отнимаемую для того, чтобы понизить температуру льда от 0 до —3 °С ($c_л$ — теплоемкость льда).

Общее количество теплоты, которое необходимо отнять у воды,

$$q_в=q_1+q_2+q_3=41{,}87+330{,}70+6{,}27=378{,}74 \text{ кДж/кг}.$$

Холодопроизводительность воздуха

$$Q_0=V_в c'_p(T_1-T_4)=1{,}298(263-196)=86{,}966 \text{ МДж/ч},$$

где c'_p — объемная теплоемкость воздуха.

Количество полученного в холодильной установке льда

$$m=\frac{Q_0}{q_в}=\frac{86{,}966\cdot 10^3}{378{,}74}=229{,}46 \text{ кг/ч}.$$

Холодильный коэффициент

$$\varepsilon=\frac{T_1}{T_2-T_1}=\frac{263}{393-263}=2{,}02.$$

Работа

$$L=\frac{Q_0}{\varepsilon}=\frac{86{,}966}{2{,}02}=43{,}0 \text{ МДж/ч}.$$

Искомая мощность

$$N=\frac{L}{3600}=\frac{43\,000}{3600}=11{,}95 \text{ кВт}.$$

15.4. Воздушная холодильная машина производит 198 кг/ч льда при —6 °С из воды, температура которой 12 °С. Воздух в компрессоре сжимается от давления $p_1=0{,}0981$ МПа до $p_2=0{,}5$ МПа.

Определить часовой расход воздуха и потребную для данной машины мощность:

Ответ: $m_{\text{возд}}=1123$ кг/ч; $N=12{,}87$ кВт.

15.5. Воздушная холодильная установка имеет холодопроизводительность 840 МДж/ч. Параметры воздуха на выходе из холодильной машины: $p_1=0{,}1$ МПа и $t_1=-3$ °С. После сжатия воздух имеет давление 0,4 МПа. Температура окружающей среды 20 °С.

Определить температуру воздуха после расширения, мощность компрессора и детандера, холодильный коэффициент. Определить холодильный коэффициент обратного цикла Карно в том же интервале температур.

Ответ: $T_4=197$ К; $N_к=372$ кВт; $N_д=273{,}2$ кВт; $\varepsilon=2{,}3$; $\varepsilon_К=11{,}7$.

15.6. Паровая компрессорная холодильная установка, схема которой представлена на рис. 15.1, в качестве рабочего тела использует двуокись углерода. Компрессор K всасывает насыщенный пар и изоэнтропно сжимает его, превращая в сухой насыщенный пар при давлении, соответствующем температуре конденсации $t_2=20$ °С. Из компрессора двуокись углерода поступает в конденсатор B, где при постоянном давлении превращается в жидкость, после чего расширяется в расширительном цилиндре до давления, соответствующего

температуре испарения $t_1=-10\,^\circ C$. При этой же температуре двуокись углерода поступает в охлаждаемое помещение, где, забирая теплоту от охлаждаемых тел, испаряется, образуя влажный пар со степенью сухости x_1.

Определить удельную холодопроизводительность холодильной установки, теплоту, отданную в конденсаторе, работу, затраченную в цикле, и холодильный коэффициент.

Решение. Удельная холодопроизводительность установки, т. е. количество теплоты, поглощаемое 1 кг двуокиси углерода в охлаждаемом помещении,

$$q_0=h_1-h_2=r(x_1-x_4).$$

По табл. 28 приложения находим при $t_1=-10\,^\circ C$ значение $r=(h''-h')=733{,}6-472{,}2=261{,}4$ кДж/кг.

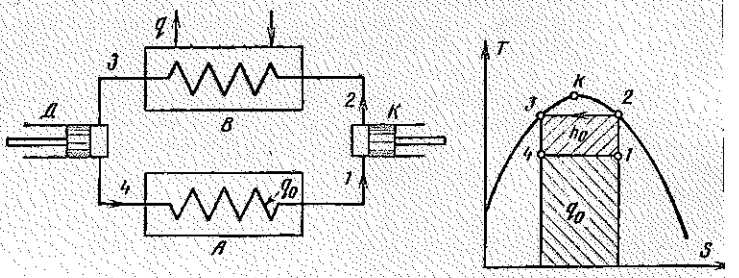


Рис. 15.1. К задаче 15.6.

Значения x_1 и x_4 определяем при помощи таблиц по формуле вида

$$s_2=s_1=s'_1+(s''-s'_1)x_1.$$

Из табл. 28 находим $s'_1=3{,}010$ кДж/(кг·К); $s''_1=4{,}003$ кДж/(кг·К); $s''_2=3{,}800$ кДж/(кг·К), следовательно,

$$x_1=\frac{3{,}800-3{,}010}{4{,}003-3{,}01}=0{,}796.$$

Степень сухости в точке *4*

$$x_4=\frac{s'_3-s'_1}{s''_4-s'_4}.$$

Значение энтропии в состоянии *4* такое же, как и в состоянии *3* (его находим из таблиц при $t_3=20\,^\circ C$; $s''_3=3{,}278$ кДж/(кг·К); значения энтропий s'_4 и s''_4 соответственно равны s'_1 и s''_1.

Таким образом,

$$x_4=\frac{3{,}278-3{,}010}{4{,}003-3{,}010}=0{,}270.$$

Определяем теплоту, отведенную от рабочего тела в конденсаторе:

$$q=h_2-h_3=703{,}6-550{,}4=153{,}2 \text{ кДж/кг}.$$

Удельная холодопроизводительность

$$q_0 = r_{t_s}(x_1 - x_4) = 261{,}4\,(0{,}796 - 0{,}270) = 137{,}5 \text{ кДж/кг}.$$

Работа, затраченная в цикле,

$$l = q - q_0 = 153{,}2 - 137{,}5 = 15{,}7 \text{ кДж/кг}.$$

Холодильный коэффициент

$$\varepsilon = \frac{q_0}{l} = \frac{137{,}5}{15{,}7} = 8{,}76.$$

15.7. Компрессор K холодильной установки (рис. 15.2) всасывает пар фреона-12 при $t_1 = -15$ °С и степени сухости $x_1 = 0{,}972$ и изотропно сжимает его до давления, при котором степень сухости $x_2 = 1$.

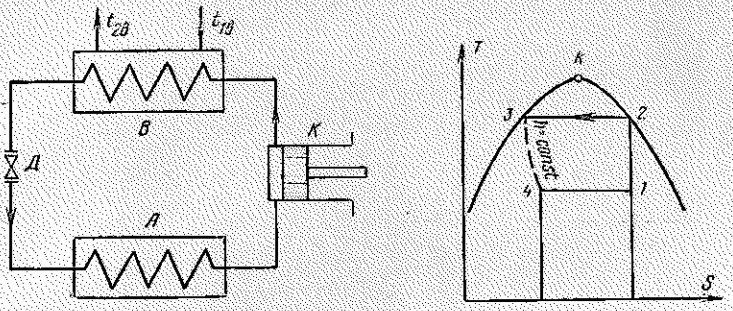


Рис. 15.2. К задаче 15.7.

Из компрессора фреон-12 поступает в конденсатор B, где охлаждается водой с температурой на входе $t_{1в} = 12$ °С, а на выходе $t_{2в} = 20$ °С.

В дроссельном вентиле $Д$ жидкий фреон-12 дросселируется до состояния влажного насыщенного пара, после чего направляется в испаритель A, из которого выходит со степенью сухости x_1. Теплота, необходимая для испарения фреона-12, подводится из охлаждаемой камеры.

Определить теоретическую мощность двигателя холодильной установки, часовой расход фреона-12 и охлаждающей воды, если холодопроизводительность установки $Q_0 = 200$ МДж/ч.

Использовать табл. 30 приложения.

Ответ: $N = 12{,}2$ кВт; $m_ф = 1762$ кг/ч; $m_в = 7270$ кг/ч.

15.8. Компрессор аммиачной холодильной установки имеет теоретическую мощность 40 кВт. Из компрессора сухой насыщенный пар аммиака при температуре $t_2 = 25$ °С направляется в конденсатор, после которого жидкость в дроссельном вентиле расширяется. Температура испарения аммиака в охлаждаемой среде $t_1 = -10$ °С.

Определить холодопроизводительность установки.

Использовать табл. 29 приложения.

Ответ: $Q_0 = 940{,}7$ МДж/ч.

15.9. Холодильная установка, использующая в качестве холодильного агента фреон-12, работает с дроссельным вентилем. В компрессор подается насыщенный пар фреона-12 и сжимается до такого давления, при котором температура насыщения $t_s = 30$ °С и энтальпия

h_2=592,4 кДж/кг[1]. В конденсаторе пар изобарно охлаждается и затем конденсируется.

После дросселирования пар отбирает теплоту из охлаждаемой камеры при t=—17 °С.

Холодопроизводительность установки Q_0=500 МДж/ч.

Определить холодильный коэффициент цикла и теоретическую мощность двигателя компрессора.

Ответ: ε=4,37; $N_{теор}$=31,8 кВт.

15.10. В паровых компрессорных холодильных установках замена расширительного цилиндра дроссельным вентилем приводит к снижению холодопроизводительности. Частично эта потеря может быть уменьшена путем переохлаждения жидкости до температуры меньшей, чем температура конденсации (рис. 15.3). Как показано на рисунке, конденсат переохлаждается до температуры t'_4, которая ниже, чем температура конденсации t_4.

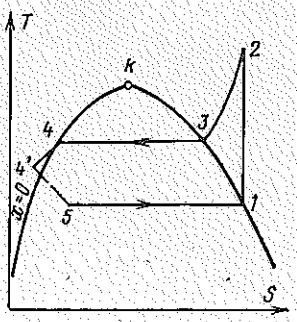


Рис. 15.3. К задаче 15.10.

Определить холодильный коэффициент цикла, по которому работает холодильная машина на фреоне-12, и теоретическую мощность двигателя компрессора, если известно: холодопроизводительность установки Q_0=600 МДж/ч; начальное состояние фреона определено параметрами t_1=—15°С и x_1=1; температура конденсации t_3=30°С; температура перед дроссельным вентилем t'_4=25°С.

Решение. Начальная энтальпия сухого насыщенного пара фреона-12 при температуре насыщения t_1=—15 °С равна:

$$h_1=h''_1=566{,}4 \text{ кДж/кг (табл. 30 приложения).}$$

Изоэнтропный процесс сжатия фреона в компрессоре изображается линией *1-2*, причем энтальпия точки *2* по таблицам перегретого пара при давлении p_2=0,743 МПа, соответствующая температуре насыщения фреона t_3=30 °С и энтропии $s_2=s''_1$=4,761 кДж/кг, равна: h_2=587,5 кДж/кг. Процесс конденсации изображается линией *3-4*, изобарный процесс переохлаждения — линией *4-4'*, процесс дросселирования условно показывается линией *4'-5*.

Принимая, что энтальпия переохлажденной жидкости равна энтальпии насыщенной жидкости при температуре t_4'=25 °С, из таблиц находим $h'_4=h_5$=442,8 кДж/кг.

Определяем удельную холодопроизводительность:

$$q_0=h_1-h_5=566{,}4-442{,}8=123{,}6 \text{ кДж/кг.}$$

Часовой расход фреона-12

$$m=\frac{Q_0}{q_0}=\frac{600\,000}{123{,}6}=4854 \text{ кг/ч.}$$

[1] Энтальпию h_2 можно рассчитать при помощи таблиц перегретого пара фреона-12.

Теоретическая величина работы цикла

$$l = h_2 - h_1 = 587{,}5 - 566{,}4 = 21{,}1 \text{ кДж/кг}.$$

Теоретическая мощность приводного двигателя компрессора

$$N_0 = \frac{ml}{3600} = \frac{4854 \cdot 21{,}1}{3600} = 28{,}4 \text{ кВт}.$$

Холодильный коэффициент

$$\varepsilon = \frac{q_0}{l} = \frac{123{,}6}{21{,}1} = 5{,}86.$$

15.11. Сравнить холодопроизводительность, холодильный коэффициент и теоретическую мощность двигателя холодильной установки, работающей без переохлаждения, с теми же параметрами установки, в которой производится переохлаждение конденсата.

Компрессор всасывает сухой насыщенный пар фреона-12 при температуре -10°С и сжимает его изоэнтропно до давления 0,6 МПа. Пройдя через конденсатор и переохладитель, пар превращается в жидкость с температурой 10°С. Холодопроизводительность $Q_0 = 600$ МДж/ч. При помощи таблиц перегретого пара фреона-12 найдена энтальпия перегретого пара $h_2 = 587{,}3$ кДж/кг.

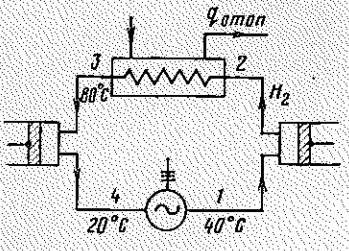


Рис. 15.4. К задаче 15.13.

Ответ: без переохлаждения $q_0 = 128{,}9$ кДж/кг; $\varepsilon = 6{,}99$; $N = 23{,}9$ кВт; с переохлаждением: $q_0 = 140{,}7$ кДж/кг; $\varepsilon = 7{,}63$; $N = 21{,}8$ кВт.

15.12. В аммиачной холодильной установке влажный пар аммиака при $t_1 = -5$ °С и $x_1 = 0{,}95$ изоэнтропно сжимается до тех пор, пока не становится сухим насыщенным. После этого он поступает в конденсатор, где превращается в жидкость, а затем переохлаждается до $t_3 = 10$ °С. После дросселирования пар подсушивается, отбирая из охлаждаемого объекта теплоту, наконец, снова поступает в компрессор.

Холодопроизводительность установки $Q_0 = 800$ МДж/ч.

Определить холодильный коэффициент и сравнить его с холодильным коэффициентом цикла Карно для того же интервала температур.

Ответ: $\varepsilon = 13{,}6$; $\varepsilon_К = 17{,}9$.

15.13. Современные электрогенераторы работают с применением водородного охлаждения. Циркулирующий в системе охлаждения водород может быть использован как рабочее вещество в схеме теплового насоса (рис. 15.4).

Каков отопительный коэффициент $\mu = q_{отоп}/l$ этой установки, если давление водорода в системе охлаждения генератора постоянно: $p_1 = p_4 = 0{,}097$ МПа, а температуры в точках *1*, *3* и *4* указаны на схеме.

Каково давление водорода p_2, поступающего в теплообменник.

Теплоемкость c_p водорода считать не зависящей от температуры.

Ответ: $\mu=6{,}0$; $p_2=0{,}186$ МПа.

15.14. Для отопления зданий может быть использована холодильная установка, в которой нижним источником теплоты служит окружающая среда. Этот принцип положен в основу работы теплового насоса. В результате его работы теплота передается источнику теплоты с более высокой температурой, чем окружающая среда.

Сколько можно получить теплоты в час для отопления здания при помощи теплового насоса, если температура охлаждающей среды $t_0=-5$ °С, температура нагревательных устройств $t_н=25$ °С. Мощность двигателя компрессора $N=15$ кВт. Принять, что установка работает по циклу, изображенному на рис. 15.1.

Холодильный агент — аммиак.

Ответ: $Q=527\,000$ кДж/ч.

Глава шестнадцатая

ЭЛЕМЕНТЫ ТЕРМОДИНАМИКИ ХИМИЧЕСКИХ ПРОЦЕССОВ

16.1. В газогенераторе большая часть углерода топлива сгорает не полностью с образованием окиси углерода и выделением некоторого количества теплоты согласно реакции

$$C+\frac{1}{2}O_2=CO+Q_p.$$

В чистом виде провести эту реакцию, а следовательно, и найти значение Q_p практически невозможно.

Определить тепловой эффект этой реакции $(Q_p)_{298}$ при стандартных условиях ($p=0{,}101325$ МПа, $t=25$ °С), если при этих же условиях известны тепловые эффекты реакций полного сгорания углерода и окиси углерода:

$$C+O_2=CO_2+393\,777 \text{ кДж/кмоль};$$

$$CO+\frac{1}{2}O_2=CO_2+283\,178 \text{ кДж/кмоль}.$$

Ответ: $(Q_p)_{298}=\Delta H^{\circ *}_{298}=-110\,599$ кДж/кмоль.

Знак минус показывает, что в результате реакции теплота выделяется и отводится в окружающую среду.

16.2. Определить стандартную теплоту образования $(\Delta H^{\circ}_{298})^{обр}_{CH_4}$ одного киломоля метана, если известны следующие стандартные теплоты:

а) сгорания метана

$$(\Delta H^{\circ}_{298})^{сгор}_{CH_4}=-890\,943 \text{ кДж/кмоль};$$

---

* В задачах этого раздела энтальпии, отнесенные к 1 кмолю, обозначаются символом H, т. е. так, как это принято в химической термодинамике.

б) образования жидкой H_2O

$$(\Delta H^0_{298})^{обр}_{H_2O\ (ж)} = -286{,}030\ кДж/кмоль;$$

в) образования газообразной углекислоты

$$(\Delta H^0_{298})^{обр}_{CO_2\ (г)} = -393\,777\ кДж/кмоль.$$

Решение. Согласно следствию из закона Гесса тепловой эффект реакции равен алгебраической сумме теплот образования реагентов из простых веществ, т. е. сумма теплот образования продуктов реакции за вычетом суммы теплот образования исходных веществ.

Запишем уравнение реакции сгорания метана:

$$CH_4 + 2O_2 = CO_2\ (г) + 2H_2O\ (ж) - 890\,943\ кДж/кмоль\ *.$$

Следовательно, по закону Гесса

$$-890\,943 = (\Delta H^0_{298})^{обр}_{CO_2\ (г)} + 2\,(\Delta H^0_{298})^{обр}_{H_2O\ (ж)} - (\Delta H^0_{298})^{обр}_{CH_4} - 2\,(\Delta H^0_{298})^{обр}_{O_2}.$$

Подставив заданные величины и учитывая, что теплота образования O_2 равна нулю, так как O_2 есть простое вещество, получаем:

$$-890\,943 = -393\,777 + 2\,(-286\,030) - (\Delta H^0_{298})^{обр}_{CH_4} - 0;$$

$$(\Delta H^0_{298})^{обр}_{CH_4} = 890\,943 - 393\,777 - 572\,060 = -74\,894\ кДж/кмоль.$$

16.3. Определить теплоту реакции сгорания Q_p этилена

$$C_2H_4 + 3O_2 = 2CO_2\ (г) + 2H_2O\ (ж),$$

если заданы теплоты образования реагентов:

$$\Delta H_{C_2H_4} = 52{,}327; \quad \Delta H_{CO_2} = -393{,}777; \quad \Delta H_{H_2O} = -286{,}030\ МДж/кмоль.$$

Ответ: $Q_p = -1411{,}941$ МДж/кмоль C_2H_4.

16.4. Определить теплоту парообразования воды r, кДж/кг, если известны стандартные теплоты образования воды и пара, равные соответственно —286,030 и —241,989 МДж/кмоль.

Сравнить с табличными (по таблицам водяного пара) значениями при 1) $t_s = 25$ °С и 2) $p_s = 0{,}101325$ МПа.

Ответ: $r = 44{,}041$ МДж/кмоль $= 2{,}444$ МДж/кг. По таблицам водяного пара: 1) $r = 2{,}442$ МДж/кг; 2) $r = 2{,}257$ МДж/кг. В первом случае расхождение невелико и соответствует погрешностям величин, используемых в расчете. Во втором случае расхождение большое и объясняется в основном тем, что теплоты образования зависят от температуры (при $p = 0{,}101325$ МПа, $t_s = 100$ °С).

16.5. Как различаются между собой теплоты реакций Q_v и Q_p для реакции $C + O_2 = CO_2$?

Ответ: $Q_v = Q_p$, так как в результате реакции число молей газообразных веществ не изменяется.

---

* О знаке минус — см. в ответе предыдущей задачи.

16.6. Определить разницу между Q_p и Q_v для реакции $2C+O_2 \rightleftharpoons 2CO$, если она протекает при $t=0$ °С. Считать, что O_2 и CO находятся в идеально-газовом состоянии. Объемом твердого углерода пренебречь.

Можно ли пренебречь этой разницей, если точность определения теплоты сгорания С составляет ± 120 кДж/кмоль?

Ответ: $Q_p - Q_v = 2271$ кДж/моль. Пренебречь этой разностью нельзя, так как значение ее превышает точность определения теплоты сгорания С.

16.7. Определить тепловой эффект реакции

$$H_2 + \frac{1}{2} O_2 = H_2O + |Q_p|$$

при $t=1000$ °С, если известно, что при $t=0$° С $|Q_p| = 286{,}424$ МДж/кмоль.

Теплоемкость μc_p считать зависящей от температуры и пользоваться таблицами.

Ответ: $|Q_p| = 292{,}645$ МДж/кмоль H_2O.

16.8. Вывести формулу для расчета степени диссоциации газа через константу равновесия для реакции диссоциации, происходящей по схеме $X_2 \rightleftharpoons 2X_1$ (диссоциация по такой схеме происходит, например, в парах щелочных металлов). При выводе формулы считать, что одноатомный и двухатомный газы являются идеальными.

Ответ: $$\alpha = \frac{1}{\sqrt{1 + \frac{4p}{K_p}}}.$$

16.9. Для реакции $K_2 \rightleftharpoons 2K_1$, происходящей в парах калия, известна константа равновесия при 1100 °С: $K_p = 7{,}4786$ МПа.

Найти степень диссоциации паров калия при этой температуре при давлениях 0,3 и 0,7 МПа.

Ответ: для 0,3 МПа $\alpha = 0{,}928$; для 0,7 МПа $\alpha = 0{,}853$.

16.10. Для реакции диссоциации паров натрия $Na_2 \rightleftharpoons 2Na_1$ при определенных параметрах известна степень диссоциации $\alpha = 0{,}83$.

Чему равно отношение парциальных давлений одно- и двухатомного паров натрия?

Решение. Отношение парциальных давлений равно отношению мольных долей r_1 и r_2. Мольные доли находятся следующим образом. При диссоциации α молей Na_2 двухатомного пара остается $1-\alpha$ молей, а при диссоциации одноатомного — 2α. Всего молей в равновесном состоянии получается $(1-\alpha)+2\alpha = 1+\alpha$. Значит мольные доли равны:

$$r_1 = \frac{2\alpha}{1+\alpha}; \qquad r_2 = \frac{1-\alpha}{1+\alpha}.$$

Отношение мольных долей

$$\frac{r_1}{r_2} = \frac{2\alpha}{1-\alpha} = \frac{2 \cdot 0{,}83}{1-0{,}83} = 9{,}78,$$

т. е. при степени диссоциации, равной 0,83, парциальное давление одноатомных паров почти в 10 раз больше, чем двухатомных.

16.11. Вывести уравнение состояния для диссоциирующего идеального газа. Диссоциация идет по схеме $X_2 \rightleftarrows 2X_1$.

Решение. Реакция: $X_2 \rightleftarrows 2X_1$.

Число молей: $1-\alpha$; 2α.

Всего молей в состоянии равновесия: $(1-\alpha)+2\alpha=1+\alpha$.

Мольные доли

$$r_1 = \frac{2\alpha}{1+\alpha}; \qquad r_2 = \frac{1-\alpha}{1+\alpha}.$$

Масса моля смеси

$$\mu_{см} = \Sigma r_i \mu_i = \frac{2\alpha}{1+\alpha}\mu_1 + \frac{1-\alpha}{1+\alpha}2\mu_1$$

(здесь вместо μ_2 подставлено $\mu_2=2\mu_1$).

Получаем:

$$\mu_{см} = \frac{2\mu_1}{1+\alpha} = \frac{\mu_2}{1+\alpha}.$$

Уравнение состояния (для 1 кг)

$$pv = \frac{8314}{\mu_{см}}T \quad \text{или} \quad pv = \frac{8314T}{\mu_2}(1+\alpha).$$

Степень диссоциации можно выразить через константу равновесия (см. задачу 16.8).

16.12. Известно, что энтальпия обычного идеального газа от давления не зависит.

Зависит ли энтальпия диссоциирующего идеального газа от давления?

Ответ: зависит; это можно доказать, взяв производную $(\partial h/\partial p)_T = [v - T(\partial v/\partial T)_p]$ с помощью уравнения состояния диссоциирующего идеального газа (задача 16.11).

16.13. Рассчитать константу равновесия K_p в стандартном состоянии при температуре 1000 °С для реакции диссоциации, проходящей в парах калия ($K_2 \rightleftarrows 2K_1$), если известны энтальпия и энтропия одно- и двухатомных паров, а также теплота диссоциации (стандартные состояния).

Энтальпия при 1000 °С: $(H^0 - H^0_0)_1 = 26\,464$ кДж/кмоль; $(H^0 - H^0_0)_2 = 48\,758$ кДж/кмоль.

Энтропии при 1000 °С: $S^0_1 = 190{,}41$ кДж/(кмоль·К); $S^0_2 = 305{,}90$ кДж/(кмоль·К).

Теплота диссоциации при 0 К: $D^0_0 = 49\,580$ кДж/кмоль K_2.

Решение. Константа равновесия рассчитывается с помощью известной формулы

$$\ln K_p = -\frac{\Delta\Phi^0}{\mu RT},$$

где $\Delta\Phi^0$ — изменение стандартных изобарно-изотермических потенциалов для рассчитываемой реакции. Эта формула может быть преобразована:

$$\ln K_p = -\frac{2(\Phi^0 - H^0_0)_1 + D^0_0 - (\Phi^0 - H^0_0)_2}{\mu RT} =$$

$$= \frac{2(H^0 - H^0_0)_1 - 2TS^0_1 + D^0_0 - (H^0 - H^0_0)_2 - TS^0_2}{\mu RT}.$$

Следовательно,

$$\ln K_p = -\frac{2 \cdot 26\,464 - 2 \cdot 1273 \cdot 190{,}41 + 49\,580 - 48\,758 + 1273 \cdot 305{,}90}{8{,}314 \cdot 1273} =$$

$$= 3{,}9327.$$

Отсюда $K_p = 51{,}04$ атм $= 5{,}172$ МПа.

16.14. Известно, что при температуре абсолютного нуля теплоты сублимации калия равны: $(\Delta H^0_0)_1 = 90\,833$ кДж/кмоль K_1 и $(\Delta H^0_0)_2 = 132\,086$ кДж/кмоль K_2. Первое число относится к такому процессу испарения, когда в результате получается пар в виде одноатомных молекул калия; второе число — то же для двухатомных молекул.

Определить теплоту диссоциации калия при $T = 0$ К.

Ответ:

$D^0_0 = 2(\Delta H^0_0)_1 - (\Delta H^0_0)_2 = 90\,833 \cdot 2 - 132\,086 = 49\,580$ кДж/кмоль K_2.

16.15. Вывести формулу для расчета теплоемкости c_p диссоцирующих идеальных газов. Диссоциация идет по схеме

$$X_2 \rightleftarrows 2X_1.$$

Рассчитать теплоемкость c_p паров калия при $p = 0{,}1$ МПа и $t = 800$ °С. Известно, что при $t = 800$ °С мольные теплоемкости μc_p для одноатомных и двухатомных паров калия и энтальпии соответственно равны: $\mu c^0_{p,1} = 20{,}786$ кДж/(кмоль·К); $\mu c^0_{p,2} = 39{,}708$ кДж/(кмоль·К); $(H^0 - H^0_0)_1 = 22\,307$ кДж/кмоль; $(H^0 - H^0_0)_2 = 40\,796$ кДж/кмоль; степень диссоциации при этих параметрах $\alpha = 0{,}915$, а теплоты сублимации при 0 К даны в предыдущей задаче.

Решение. Для вывода формулы теплоемкости необходимо написать выражение для энтальпии диссоциирующего газа. Используя обозначения для удельных энтальпий, обычно применяемые в технической термодинамике, получаем для энтальпии 1 кг смеси паров K_1 и K_2:

$$h = g_1 h_1 + g_2 h_2,$$

где h_1, кДж/кг, и h_2, кДж/кг, — массовые энтальпии K_1 и K_2, отсчитанные от одного энергетического уровня; g_1 и g_2 — массовые доли. Их можно найти через мольные (объемные) доли:

$$g_1 = \frac{r_1 \mu_1}{r_1 \mu_1 + r_2 \mu_2} = \frac{\frac{2\alpha}{1+\alpha}\mu_1}{\frac{2\alpha}{1+\alpha}\mu_1 + \frac{1-\alpha}{1+\alpha}\mu_2} = \alpha,$$

так как $\mu_2 = 2\mu_1$.

Таким образом, получаем:

$$h = \alpha h_1 + (1-\alpha) h_2.$$

Теплоемкость c_p получается дифференцированием

$$c_p = \left(\frac{\partial h}{\partial T}\right)_p = \alpha \left(\frac{\partial h_1}{\partial T}\right)_p + h_1 \left(\frac{\partial \alpha}{\partial T}\right)_p + (1-\alpha)\left(\frac{\partial h_2}{\partial T}\right)_p - h_2 \left(\frac{\partial \alpha}{\partial T}\right)_p$$

или

$$c_p = \alpha c_{p1} + (1-\alpha)\, c_{p2} + (h_1 - h_2)\left(\frac{\partial \alpha}{\partial T}\right)_p. \qquad (1)$$

В формуле (1) c_{p1} и c_{p2} — массовые теплоемкости паров одно- и двухатомного калия; $(h_1 - h_2)$ — тепловой эффект реакции диссоциации, рассчитанный на 1 кг смеси.

Формула (1) имеет следующий физический смысл: первые два члена формулы дают аддитивные части теплоемкости смеси. Третий член связан с тем, что в процессе подвода теплоты изменяется состав смеси, $(\partial\alpha/\partial T)_p \neq 0$, вследствие чего увеличивается количество одноатомных молекул и значительное количество теплоты идет на реакцию диссоциации.

Для расчета можно заменить величины, входящие в формулу (1), стандартными:

$$c_{p1} = \frac{\mu c^0_{p1}}{\mu_1}, \text{ кДж/(кг·К)};$$

$$c_{p2} = \frac{\mu c^0_{p2}}{\mu_2}, \text{ кДж/(кг·К)};$$

$$h_1 = \frac{(H^0 - H^0_0)_1 + (\Delta H^0_0)_1}{\mu_1}, \text{ кДж/кг};$$

$$h_2 = \frac{(H^0 - H^0_0)_2 + (\Delta H^0_0)_2}{\mu_2}, \text{ кДж/кг}.$$

Энтальпии здесь отсчитаны от одного энергетического уровня. Учитывая, что $\mu_1 = \mu_2/2$, получаем для теплового эффекта реакции диссоциации:

$$\frac{\Delta H^0}{\mu_2} = h_1 - h_2 = \frac{1}{\mu_2}\,[2\,(H^0 - H^0_0)_1 + 2\,(\Delta H^0_0)_1 - (H_0 - H^0_0)_2 - (\Delta H_0{}^0)_2], \qquad (2)$$

где ΔH^0 — тепловой эффект реакции диссоциации, кДж/кмоль K_2.

Производную $(\partial\alpha/\partial T)_p$ находим из формулы

$$\alpha = 1 \Big/ \sqrt{1 + \frac{4p}{K_p}};$$

$$\left(\frac{\partial \alpha}{\partial T}\right)_p = \frac{\partial}{\partial T}\left[\frac{1}{\sqrt{1 + \frac{4p}{K_p}}}\right] =$$

$$= \frac{4p}{2\left(1 + \frac{4p}{K_p}\right)^{3/2} K^2_p}\left(\frac{\partial K_p}{\partial T}\right)_p = \frac{\alpha\,(1-\alpha^2)}{2}\left(\frac{\partial \ln K_p}{\partial T}\right)_p.$$

Используя известное выражение зависимости константы равновесия от температуры

$$\left(\frac{\partial \ln K_p}{\partial T}\right)_p = \frac{\Delta H^0}{\mu R T^2},$$

получаем:

$$\left(\frac{\partial \alpha}{\partial T}\right)_p = \frac{\alpha(1-\alpha^2)}{2} \frac{\Delta H^0}{\mu R T^2}.$$

Подставляя в формулу (1) полученные величины, находим:

$$c_p = \frac{2\mu c^0_{p1}}{\mu_2}\alpha + \frac{\mu c^0_{p2}}{\mu_2}(1-\alpha) + \frac{\alpha(1-\alpha^2)}{2} \frac{\Delta H^0}{\mu R T^2} \frac{\Delta H^0}{\mu_2},$$

или, окончательно,

$$c_p = \frac{1}{\mu_2}\left[2\alpha\mu c^0_{p1} + (1-\alpha)\mu c^0_{p2} + \frac{\alpha(1-\alpha^2)}{2\mu R}\left(\frac{\Delta H^0}{T}\right)^2\right].$$

Теперь произведем расчет теплоемкости c_p для требуемых параметров. Предварительно вычислим:

$$\Delta H^0 = 2[(H^0 - H^0_0)_1 + (\Delta H^0_0)_1] - [(H^0 - H^0_0)_2 + (\Delta H^0_0)_2] =$$

$$= 2(22\,307 + 90\,833) - (40\,796 + 132\,086) = 53\,398 \text{ кДж/кмоль} \cdot K_2.$$

Величина

$$\left(\frac{\Delta H^0}{T}\right)^2 = \left(\frac{53\,398}{1073{,}15}\right)^2 = 2476.$$

Теплоемкость

$$c_p = \frac{1}{78{,}2}\left[2 \cdot 0{,}915 \cdot 20{,}786 + 0{,}085 \cdot 39{,}708 + \right.$$

$$\left. + \frac{0{,}915(1 - 0{,}915^2)}{2 \cdot 8{,}314} \cdot 2476\right] =$$

$$= \frac{1}{78{,}2}(38{,}04 + 3{,}37 + 22{,}18) = 0{,}8132 \text{ кДж/(кг} \cdot \text{К)}.$$

Делая расчет, мы замечаем, что третий член в формуле для теплоемкости имеет существенное значение.

16.16. Найти парциальные давления N_2O_4 и NO_2 химически реагирующей смеси газов (реакции диссоциации $N_2O_4 \rightleftarrows 2NO_2$) при температуре 25 °С и давлениях:

а) общее давление $p = 0{,}101325$ МПа;

б) общее давление $p = 0{,}0101325$ МПа.

Дано: $\Delta\Phi^0_{298,\,NO_2} = +51874$ кДж/кмоль; $\Delta\Phi^0_{298,\,N_2O_4} = +98352$ кДж/кмоль.

Ответ: для $p = 0{,}101325$ МПа $p_{NO_2} = 0{,}028875$ МПа; $p_{N_2O_4} = 0{,}072447$ МПа; для $p = 0{,}0101325$ МПа $p_{NO_2} = 0{,}0064848$ МПа; $p_{N_2O_4} = 0{,}0036477$ МПа.

16.17. Термодинамическая модель диссоцирующего идеального газа может быть применена для описания процесса ассоциация газовых молекул в реальном газе.

Так, например, можно рассматривать ассоциацию молекул водяного пара, происходящую по уравнению

$$(H_2O)_2 \rightleftarrows 2H_2O$$

(разумеется, для вычислений безразлично, какой процесс рассматривать: процесс ассоциации или процесс диссоциации).

При таком рассмотрении процесс ассоциации молекул H_2O можно оценивать как проявление сил взаимодействия между молекулами, т. е. как проявление реальности газа.

В связи с этим формулируется задача: найти вид второго вириального коэффициента для такого газа, который подчиняется уравнению состояния диссоциирующего идеального газа, т. е.

$$pv = \frac{8314T}{\mu_2}(1+\alpha)$$

(см. задачу 16.11).

Решение. Уравнение состояния в вириальной форме записываем в виде ряда по давлению

$$z = \frac{pv}{RT} = 1 + B'p + C'p^2 + \ldots, \qquad (1)$$

следовательно, уравнение состояния диссоциирующего идеального газа будет

$$pv = \frac{8314T}{\mu_2}(1+\alpha), \qquad (2)$$

где выражение

$$\alpha = \frac{1}{\sqrt{1+\frac{4p}{K_p}}} \qquad (3)$$

надо привести к виду (1).

Для этого используется следующее разложение:

$$\frac{1}{\sqrt{1+x}} = 1 - \frac{1}{2}x + \frac{1\cdot 3}{2\cdot 4}x^2 - \frac{1\cdot 3\cdot 5}{2\cdot 4\cdot 6}x^3 + \ldots$$

Этот ряд сходится при $|x|<1$.

Учитывая все это, записываем уравнение так:

$$pv = \frac{8314T}{\mu_2}(1+\alpha) = \frac{8314T}{\mu_2}\left(1+\frac{1}{\sqrt{1+\frac{4p}{K_p}}}\right) =$$

$$= \frac{8314T}{\mu_2}\left[1+1-\frac{1}{2}\,\frac{4p}{K_p}+\frac{1\cdot 3}{2\cdot 4}\left(\frac{4p}{K_p}\right)^2-\ldots\right].$$

Учитывая, что $\mu_2=2\mu_1$, получаем:

$$pv=\frac{8314T}{2\mu_1}\left[2-\frac{1}{2}\frac{4p}{K_p}+\frac{1\cdot3}{2\cdot4}\left(\frac{4p}{K_p}\right)^2-\ldots\right].$$

или

$$\frac{pv}{RT}=1-\frac{p}{K_p}+3\left(\frac{p}{K_p}\right)^2-\ldots \qquad (4)$$

Сравнивая (4) с (1), видим, что

$$B'=-\frac{1}{K_p}.$$

16.18. Найти давление насыщения для водяного пара при температуре $t=25\,^\circ C$, исходя из известных потенциалов образования H_2O.

Дано: $\Delta\Phi^0_{298(г)}=-228\,750$ кДж/кмоль; $\Delta\Phi^0_{298(ж)}=-237\,350$ кДж/кмоль.

Ответ: $p_s=0{,}003166$ МПа.

Таблица 1

Международная система единиц (СИ) (СТ СЭВ 1052-78)

Величина	Единица измерения	Сокращенное обозначение единиц
	Основные единицы	
Длина	метр	м
Масса	килограмм	кг
Время	секунда	с
Сила электрического тока	ампер	А
Термодинамическая температура	кельвин	К
Количество вещества	моль	моль
Сила света	кандела	кд
	Некоторые производные единицы	
Площадь	квадратный метр	$м^2$
Объем, вместимость	кубический метр	$м^3$
Скорость	метр в секунду	м/с
Ускорение	метр на секунду в квадрате	$м/с^2$
Сила, вес	ньютон	Н; $(кг \cdot м/с^2)$
Давление	ньютон на квадратный метр	$Н/м^2$
Плотность	килограмм на кубический метр	$кг/м^3$
Удельный объем	кубический метр на килограмм	$м^3/кг$
Энергия, работа, количество теплоты, энтальпия	джоуль	Дж; (Н·м)
Мощность, поток энергии	ватт	Вт
Энтропия	джоуль на кельвин	Дж/К
Удельная массовая теплоемкость	джоуль на килограмм-кельвин	Дж/(кг·К)
Теплота фазового превращения	джоуль на килограмм	Дж/кг

Таблица 2

Некоторые внесистемные единицы

Величина	Единица измерения	Сокращенное обозначение единиц
Время	час, сутки	ч, сут
Работа, энергия	киловатт-час	кВт·ч
Масса вещества в килограммах, численно равная его молекулярной массе	киломоль	кмоль
Давление	миллиметр водяного столба	мм вод. ст.
	миллиметр ртутного столба	мм рт. ст.
	бар	бар

Таблица 3

Множители и приставки для образования десятичных кратных и дольных единиц и их наименований (СТ СЭВ 1052-78)

Множитель	Приставка	Обозначение	Множитель	Приставка	Обозначение
10^{12}	тера	Т	10^{-1}	деци	д
10^{9}	гига	Г	10^{-2}	санти	с
10^{6}	мега	М	10^{-3}	милли	м
10^{3}	кило	к	10^{-6}	микро	мк
10^{2}	гекто	г	10^{-9}	нано	н
10	дека	да	10^{-12}	пико	п

Таблица 4

Перевод некоторых величин, измеренных в единицах системы МКГСС или во внесистемных единицах, в единицы международной системы СИ

Масса . . . . . 1 т. е. м. = 1 кгс·с²/м = 9,80665 кг
Сила . . . . . 1 кгс = 9,80665 н
Плотность . . . . . 1 т. е. м/м³ = 1 кгс·с²/м⁴ = 9,80665 кг/м³
Давление . . . . . 1 кгс/м² = 9,80665 Н/м²
Работа . . . . . 1 кгс·м = 1/426,94 ккал = 9,80665 Дж
Теплота, энтальпия, внутренняя энергия, потенциалы . . . . . 1 ккал = 1/859,845 кВт·ч = 4,1868·10³ Дж
Энергия . . . . . 1 Вт·ч = 3 600 Дж

Таблица 5

Молекулярные массы, плотности и объемы киломолей при нормальных условиях, критические температуры и критические давления некоторых газов

Газ	Химическое обозначение	Молекулярная масса	Плотность ρ_0, кг/м³	Объем киломоля μv_0, м³/кмоль	Критическая температура $t_{кр}$, °С	Критическое давление $p_{кр}$, МПа	Критический объем $v_{кр}$, м³/кг	Источник
Воздух	—	28,97	1,2928	22,40	—140,6	3,769	0,003196	[20]
Гелий	He^4	4,0026	0,1785	22,42	—267,95	0,226	0,014343	[20]
Аргон	Ar	39,944	1,7839	22,39	—122,50	4,858	0,001876	[13]
Водород	H_2	2,0159	0,08987	22,43	—239,9	1,2568	0,032258	[21]
Азот	N_2	28,0134	1,2505	22,40	—146,9	3,396	0,003835	[20]
Кислород	O_2	31,9968	1,42895	22,39	—118,38	5,087	0,0024600	[20]
Хлор	Cl_2	70,904	3,22	22,02	144	7,711	0,001715	[18]
Окись углерода	CO	28,009	1,2500	22,40	—140	3,496	0,003322	[18]
Двуокись углерода	CO_2	44,0079	1,9768	22,26	31,05	7,383	0,002137	[13]
Сернистый газ	SO_2	64,0658	2,9263	21,89	157,5	8,147	0,001904	[19]
Аммиак	NH_3	17,0306	0,7714	22,08	132,4	11,298	0,0042553	[19]
Водяной пар	H_2O	18,014	(0,804)	(22,4)	374,12	22,115	0,003147	[22]

Таблица 6

Соотношения между единицами измерения давления

Наименование единиц	Ньютон на квадратный метр, Па	Бар, бар	Килограмм—сила на квадратный метр, кгс/м²	Физическая атмосфера, атм	Миллиметр водяного столба[1], мм вод. ст.	Миллиметр ртутного столба[2], мм рт. ст.	Английский фунт на квадратный дюйм
1 н/м², Па	1	$1 \cdot 10^{-5}$	1,101972	$0{,}98692 \cdot 10^{-5}$	0,101972	$750{,}06 \cdot 10^{-6}$	$14{,}5038 \cdot 10^{-5}$
1 бар	10^5	1	10197,2	0,98692	10197,2	750,06	14,5038
1 кгс/м²	9,80665	$9{,}80665 \cdot 10^{-5}$	1	$0{,}96784 \cdot 10^{-4}$	1	$735{,}55 \cdot 10^{-4}$	$14{,}2233 \cdot 10^{-4}$
1 атм (физ.)	$1{,}01325 \cdot 10^5$	1,01325	$1{,}03323 \cdot 10^4$	1	$1{,}03323 \cdot 10^4$	760	14,6959
10^4 мм вод. ст.	$0{,}980665 \cdot 10^5$	0,980665	10^4	0,96784	10^4	735,55	14,2233
10^3 мм рт. ст.	$1{,}33322 \cdot 10^5$	1,33322	$1{,}35951 \cdot 10^4$	$1{,}31579 \cdot 10^4$	$1{,}35951 \cdot 10^4$	10^3	19,3368
10 *lb/sq·in*	$0{,}68948 \cdot 10^5$	0,68948	$0{,}70307 \cdot 10^4$	0,68046	$0{,}70307 \cdot 10^4$	517,15	10

[1] При $t = 4$°С и нормальном ускорении свободного падения $g_н = 9{,}80665$ м/с².
[2] При $t = 0$°С и $g_н = 9{,}80665$ м/с².

Таблица 7

Соотношение между единицами измерения энергии

Единицы измерения	Килоджоули, кДж	Килокалории, ккал	Киловатт-часы, кВт·ч	Килограммометры, кгс·м	Лошадиные сило-часы, л. с·ч
10 кДж	10,0000	2,38846	0,002778	1019,72	0,0037767
10 ккал	41,868	10	0,011630	4269,4	0,015813
1 кВт·ч	3600	859,845	1	367 098	1,35962
100 кгс·м	0,980665	0,23423	0,00027239	100	0,00037037
1 л. с·ч	2647,80	632,41	0,73550	270 000	1

Таблица 8

Таблица значений $C = \mu R \left(\frac{\theta}{T}\right)^2 \frac{e^{\theta/T}}{(e^{\theta/T}-1)^2}$, $\frac{\text{кДж}}{\text{кмоль}\cdot\text{К}}$

$\frac{\theta}{T}$	C	$\frac{\theta}{T}$	C	$\frac{\theta}{T}$	C	$\frac{\theta}{T}$	C
0	8,314	1,10	7,528	2,30	5,451	4,80	1,604
0,10	8,302	1,15	7,461	2,40	5,259	5,00	1,419
0,15	8,294	1,20	7,390	2,50	5,066	5,20	1,256
0,20	8,286	1,25	7,314	2,60	4,873	5,40	1,097
0,25	8,273	1,30	7,239	2,70	4,685	5,60	0,971
0,30	8,265	1,35	7,164	2,80	4,497	5,80	0,854
0,35	8,235	1,40	7,084	2,90	4,312	6,00	0,745
0,40	8,206	1,45	7,004	3,00	4,128	6,40	0,569
0,45	8,173	1,50	6,946	3,10	3,948	6,80	0,431
0,50	8,143	1,55	6,837	3,20	3,772	7,20	0,322
0,55	8,114	1,60	6,749	3,30	3,601	7,60	0,239
0,60	8,072	1,65	6,665	3,40	3,433	8,00	0,179
0,65	8,030	1,70	6,573	3,50	3,270	8,40	0,134
0,70	7,988	1,75	6,485	3,60	3,115	8,80	0,096
0,75	7,938	1,80	6,393	3,70	2,960	9,20	0,071
0,80	7,888	1,85	6,301	3,80	2,814	9,60	0,050
0,85	7,834	1,90	6,209	3,90	2,667	10,00	0,038
0,90	7,779	1,95	6,117	4,00	2,529	11,00	0,017
0,95	7,720	2,00	6,025	4,20	2,269	12,00	0,0071
1,00	7,658	2,10	5,932	4,40	2,026	13,00	0,0029
1,05	7,595	2,20	5,644	4,60	1,804		

Таблица 9

Теплоемкости газов по С. Л. Ривкину

Воздух
$\mu = 28,970$

Азот N_2
$\mu = 28,013$

t	c_p	c_v	$k = \frac{c_p}{c_v}$	t	c_p	c_v	$k = \frac{c_p}{c_v}$
°C	кДж/(кг·К)			°C	кДж/(кг·К)		
—50	1,0019	0,7147	1,402	—50	1,0387	0,7419	1,400
—25	1,0023	0,7151	1,401	—25	1,0387	0,7419	1,400
0	1,0032	0,7159	1,401	0	1,0387	0,7419	1,400
25	1,0040	0,7168	1,400	25	1,0392	0,7423	1,400
50	1,0057	0,7184	1,399	50	1,0400	0,7432	1,399
75	1,0073	0,7201	1,398	75	1,0408	0,7440	1,399
100	1,0098	0,7226	1,397	100	1,0421	0,7444	1,399
125	1,0128	0,7256	1,395	125	1,0438	0,7465	1,398
150	1,0157	0,7285	1,394	150	1,0459	0,7490	1,396
175	1,0199	0,7327	1,392	175	1,0484	0,7515	1,395
200	1,0241	0,7369	1,389	200	1,0517	0,7549	1,393
250	1,0337	0,7465	1,384	250	1,0597	0,7628	1,389

Продолжение табл.

t	c_p	c_v	$k=\frac{c_p}{c_v}$	t	c_p	c_v	$k=\frac{c_p}{c_v}$
°C	кДж/(кг·К)			°C	кДж/(кг·К)		
300	1,0446	0,7574	1,379	300	1,0693	0,7725	1,384
350	1,0563	0,7691	1,373	350	1,0798	0,7829	1,379
400	1,0680	0,7808	1,368	400	1,0911	0,7942	1,374
450	1,0798	0,7926	1,362	450	1,1036	0,8068	1,368
500	1,0919	0,8047	1,357	500	1,1158	0,8189	1,362
550	1,1036	0,8164	1,352	550	1,1279	0,8311	1,357
600	1,1149	0,8277	1,347	600	1,1396	0,8428	1,352
650	1,1258	0,8399	1,342	650	1,1510	0,8541	1,348
700	1,1355	0,8487	1,338	700	1,1618	0,8633	1,344
750	1,1455	0,8583	1,334	750	1,1723	0,8754	1,339
800	1,1547	0,8675	1,331	800	1,1824	0,8855	1,335
850	1,1631	0,8759	1,1327	850	1,1916	0,8947	1,332
900	1,1706	0,8834	1,325	900	1,1999	0,9031	1,329
950	1,1777	0,8905	1,322	950	1,2079	0,9110	1,326
1000	1,1844	0,8972	1,320	1000	1,2154	0,9186	1,323
1050	1,1911	0,9039	1,317	1050	1,2225	0,9257	1,320
1100	1,1970	0,9028	1,315	1100	1,2292	0,9324	1,318
1150	1,2024	0,9152	1,314	1150	1,2355	0,9387	1,316
1200	1,2079	0,9207	1,312	1200	1,2414	0,9445	1,314
1250	1,2129	0,9257	1,310	1250	1,2468	0,9500	1,312
1300	1,2179	0,9307	1,308	1300	1,2518	0,9550	1,311
1350	1,2225	0,9353	1,307	1350	1,2569	0,9600	1,309
1400	1,2267	0,9395	1,305	1400	1,2615	0,9646	1,308
1450	1,2309	0,9437	1,304	1450	1,2657	0,9688	1,307
1500	1,2347	0,9475	1,303	1500	1,2694	0,9726	1,306

Таблица 10

Теплоемкости газов по С. Л. Ривкину

Кислород O_2 $\mu = 31,996$

Двуокись углерода CO_2 $\mu = 44,0079$

t	c_p	c_v	$k=\frac{c_p}{c_v}$	t	c_p	c_v	$k=\frac{c_p}{c_v}$
°C	кДж/(кг·К)			°C	кДж/(кг·К)		
—50	0,9102	0,6502	1,400	—50	0,7612	0,5723	1,330
—25	0,9115	0,6515	1,399	—25	0,7896	0,6008	1,314
0	0,9136	0,6536	1,398	0	0,8173	0,6284	1,301
25	0,9169	0,6569	1,395	25	0,8436	0,6548	1,288
50	0,9215	0,6615	1,393	50	0,8688	0,6799	1,278
75	0,9265	0,6665	1,390	75	0,8926	0,7038	1,268
100	0,9328	0,6728	1,386	100	0,9156	0,7268	1,260
125	0,9399	0,6799	1,382	125	0,9374	0,7486	1,252
150	0,9473	0,6873	1,378	150	0,9575	0,7687	1,243

Продолжение табл. 10

t	c_p	c_v	$k=\frac{c_p}{c_v}$	t	c_p	c_v	$k=\frac{c_p}{c_v}$
°C	кДж/(кг·К)			°C	кДж/(кг·К)		
175	0,9550	0,6950	1,374	175	0,9764	0,7875	1,240
200	0,9630	0,7030	1,370	200	0,9948	0,8060	1,235
250	0,9780	0,7189	1,361	250	1,0291	0,8403	1,225
300	0,9948	0,7348	1,354	300	1,0601	0,8713	1,217
350	1,0098	0,7498	1,346	350	1,0881	0,8993	1,210
400	1,0237	0,7637	1,340	400	1,1137	0,9249	1,204
450	1,0362	0,7762	1,335	450	1,1371	0,9483	1,199
500	1,0480	0,7880	1,330	500	1,1585	0,9697	1,194
550	1,0588	0,7988	1,325	550	1,1782	0,9893	1,191
600	1,0689	0,8089	1,321	600	1,1962	1,0073	1,188
650	1,0781	0,8181	1,318	650	1,2125	1,0237	1,184
700	1,0860	0,8260	1,314	700	1,2276	1,0387	1,182
750	1,0932	0,8332	1,312	750	1,2414	1,0526	1,180
800	1,0999	0,8399	1,309	800	1,2544	1,0655	1,177
850	1,1062	0,8462	1,307	850	1,2661	1,0773	1,175
900	1,1120	0,8520	1,304	900	1,2766	1,0877	1,174
950	1,1174	0,8574	1,303	950	1,2866	1,0978	1,172
1000	1,1225	0,8625	1,303	1000	1,2598	1,1070	1,171
1050	1,1271	0,8671	1,300	1050	1,3046	1,1158	1,169
1100	1,1317	0,8717	1,298	1100	1,3126	1,1237	1,168
1150	1,1359	0,8759	1,296	1150	1,3197	1,1308	1,167
1200	1,1401	0,8801	1,295	1200	1,3264	1,1376	1,166
1250	1,1438	0,8838	1,294	1250	1,3331	1,1442	1,165
1300	1,1476	0,8876	1,293	1300	1,3389	1,1501	1,164
1350	1,1514	0,8914	1,291	1350	1,3444	1,1556	1,164
1400	1,1551	0,8951	1,290	1400	1,3494	1,1606	1,163
1450	1,1589	0,8989	1,289	1450	1,3544	1,1656	1,162
1500	1,1627	0,9027	1,288	1500	1,3590	1,1702	1,161

Таблица 11

Теплоемкости газов по С. Л. Ривкину

Водород H_2

$\mu = 2{,}0159$

t	c_p	c_v	$k=\frac{c_p}{c_v}$	t	c_p	c_v	$k=\frac{c_p}{c_v}$
°C	кДж/(кг·К)			°C	кДж/(кг·К)		
—50	13,808	9,684	1,425	650	14,855	10,371	1,384
—25	14,030	9,606	1,416	700	14,938	10,814	1,381
0	14,189	10,065	1,410	750	15,026	10,902	1,378

t	c_p	c_v	$k=\frac{c_p}{c_v}$	t	c_p	c_v	$k=\frac{c_p}{c_v}$
°С	кДж/(кг·К)			°С	кДж/(кг·К)		
25	14,298	10,174	1,405	800	15,118	10,994	1,375
50	14,365	10,241	1,403	850	15,219	11,095	1,372
75	14,407	10,283	1,401	900	15,320	11,196	1,369
100	14,436	10,312	1,400	950	15,420	11,296	1,365
125	14,457	10,333	1,399	1000	15,525	11,401	1,362
150	14,474	10,350	1,398	1050	15,629	11,505	1,358
175	14,486	10,362	1,398	1100	15,734	11,610	1,355
200	14,499	10,375	1,398	1150	15,843	11,719	1,352
250	14,516	10,392	1,397	1200	15,952	11,828	1,349
300	14,532	10,408	1,396	1250	16,060	11,936	1,346
350	14,553	10,429	1,395	1300	16,165	12,041	1,342
400	14,578	10,454	1,394	1350	16,274	12,150	1,339
450	14,616	10,492	1,393	1400	16,374	12,250	1,337
500	14,658	10,534	1,392	1450	16,479	12,355	1,334
550	14,712	10,588	1,390	1500	16,580	12,456	1,331
600	14,779	10,665	1,387				

Таблица 12

Теплоемкости газов по С. Л. Ривкину

Водяной пар H_2O
$\mu = 18,014$

Окись углерода CO
$\mu = 28,009$

t	c_p	c_v	$k=\frac{c_p}{c_v}$	t	c_p	c_v	$k=\frac{c_p}{c_v}$
°С	кДж/(кг·К)			°С	кДж/(кг·К)		
0	1,8606	1,3992	1,330	—50	1,0387	0,7419	1,400
25	1,8648	1,4034	1,330	—25	1,0392	0,7423	1,400
50	1,8711	1,4097	1,327	0	1,0392	0,7423	1,400
75	1,8794	1,4181	1,326	25	1,0400	0,7432	1,399
100	1,8899	1,4285	1,323	50	1,0408	0,7440	1,399
125	1,9012	1,4398	1,321	75	1,0425	0,7457	1,398
150	1,9129	1,4515	1,318	100	1,0442	0,7473	1,397
175	1,9255	1,4641	1,315	125	1,0467	0,7498	1,396
200	1,9393	1,4779	1,312	150	1,0505	0,7536	1,394
250	1,9690	1,5076	1,306	175	1,0542	0,7574	1,392
300	2,0000	1,5386	1,300	200	1,0584	0,7616	1,390
350	2,0323	1,5709	1,294	250	1,0689	0,7720	1,384
400	2,0649	1,6035	1,287	300	1,0802	0,7834	1,379
450	2,0984	1,6370	1,281	350	1,0932	0,7963	1,373
500	2,1328	1,6714	1,276	400	1,1062	0,8093	1,367
550	2,1675	1,7061	1,271	450	1,1191	0,8223	1,361
600	2,2027	1,7413	1,265	500	1,1321	0,8353	1,355
650	2,2378	1,7764	1,260	550	1,1451	0,8482	1,350

Продолжение табл. 12

t	c_p	c_v	$k = \frac{c_p}{c_v}$	t	c_p	c_v	$k = \frac{c_p}{c_v}$
°C	кДж/(кг·К)			°C	кДж/(кг·К)		
700	2,2734	1,8120	1,255	600	1,1572	0,8604	1,345
750	2,3090	1,8476	1,250	650	1,1685	0,8717	1,341
800	2,3442	1,8828	1,245	700	1,1794	0,8826	1,336
850	2,3789	1,9175	1,241	750	1,1895	0,8926	1,332
900	2,4133	1,9519	1,236	800	1,1991	0,9022	1,329
950	2,4468	1,9854	1,232	850	1,2079	0,9110	1,326
1000	2,4794	2,0180	1,229	900	1,2163	0,9194	1,323
1050	2,5112	2,0498	1,225	950	1,2238	0,9270	1,320
1100	2,5418	2,0804	1,222	1000	1,2309	0,9341	1,318
1150	2,5715	2,1101	1,219	1050	1,2372	0,9404	1,316
1200	2,6000	2,1386	1,216	1100	1,2435	0,9466	1,314
1250	2,6276	2,1662	1,213	1150	1,2493	0,9525	1,312
1300	2,6540	2,1926	1,211	1200	1,2548	0,9579	1,310
1350	2,6791	2,2177	1,208	1250	1,2598	0,9630	1,308
1400	2,7038	2,2424	1,206	1300	1,2644	0,9676	1,307
1450	2,7269	2,2655	1,204	1350	1,2686	0,9718	1,305
1500	2,7495	2,2881	1,202	1400	1,2728	0,9759	1,304
				1450	1,2766	0,9797	1,303
				1500	1,2803	0,9835	1,302

Таблица 13

Термодинамические функции воздуха по С. Л. Ривкину

t	T	h	u	π_0	Θ_0	s^0
°C	К	кДж/кг				кДж/(кг·К)
—50	223,15	223,1	159,1	0,49301	13 249	6,4055
—40	233,15	233,1	166,2	0,57455	11 878	6,4494
—30	243,15	243,1	173,4	0,66528	10 698	6,4915
—20	253,15	253,2	180,5	0,76584	9676	6,5319
—10	263,15	263,2	187,6	0,87681	8785	6,5707
0	273,15	273,2	194,8	0,9985	8005	6,6081
10	283,15	283,2	202,0	1,1326	7318	6,6442
20	293,15	293,3	209,1	1,2788	6710	6,6790
30	303,15	303,3	216,3	1,4380	6171	6,7126
40	313,15	313,4	223,5	1,6109	5690	6,7453
50	323,15	323,5	230,7	1,7984	5260	6,7769
60	333,15	333,5	237,8	2,0011	4873	6,8075
70	343,15	343,6	245,0	2,2198	4525	6,8373
80	353,15	353,6	252,8	2,4553	4210	6,8662
90	363,15	363,7	259,4	2,7083	3925	6,8943
100	373,15	373,8	266,7	2,9798	3666	6,9218
110	383,15	383,9	273,9	3,2705	3429	6,9485
120	393,15	394,0	281,2	3,5813	3213	6,9745

t	T	h	u	π_0	θ_0	s^0
°C	K	кДж/кг				кДж/(кг·К)
130	403,15	404,1	288,4	3,9132	3016	7,0000
140	413,15	414,3	295,7	4,2670	2834	7,0248
150	423,15	424,4	303,0	4,6436	2667	7,0491
160	433,15	434,6	310,3	5,0442	2514	7,0728
170	443,15	444,8	317,6	5,4704	2371	7,0961
180	453,15	455,0	324,9	5,9217	2240	7,1189
190	463,15	465,2	332,3	6,4000	2118	7,1412
200	473,15	475,4	339,6	6,9064	2005	7,1630
210	483,15	485,7	347,0	7,4421	1900,3	7,1845
220	493,15	495,9	354,4	8,0082	1802,5	7,2055
230	503,15	506,2	361,8	8,6056	1711,4	7,2262
240	513,15	516,5	369,3	9,2358	1626,3	7,2465
250	523,15	526,9	376,7	9,9001	1546,8	7,2664
260	533,15	537,2	384,2	10,600	1472,2	7,2860
270	543,15	547,6	391,7	11,336	1402,5	7,3052
280	553,15	558,0	399,2	12,110	1337,0	7,3242
290	563,15	568,4	406,7	12,923	1275,5	7,3428
300	573,15	578,8	414,3	13,778	1217,6	7,3612
310	583,15	589,3	421,9	14,674	1163,2	7,3793
320	593,15	599,8	429,5	15,614	1111,9	7,3971
330	603,15	610,3	437,1	16,599	1063,6	7,4147
340	613,15	620,8	444,8	17,631	1017,9	7,4320
350	623,15	631,3	452,5	18,712	974,8	7,4491
360	633,15	641,9	460,2	19,842	934,0	7,4659
370	643,15	652,5	467,9	21,024	895,4	7,4825
380	653,15	663,1	475,7	22,259	858,9	7,4989
390	663,15	673,8	483,4	23,549	824,3	7,5151
400	673,15	684,5	491,2	24,896	791,4	7,5310
410	683,15	695,1	499,1	26,301	760,3	7,5468
420	693,15	705,8	506,9	27,768	730,6	7,5624
430	703,15	716,6	514,8	29,297	702,5	7,5778
440	713,5	727,3	522,7	30,890	675,8	7,5930
450	723,15	738,1	530,6	32,549	650,3	7,6080
460	733,15	748,9	538,5	34,278	626,0	7,6228
470	743,15	759,8	546,5	36,077	602,9	7,6375
480	753,15	770,7	554,5	37,948	581,0	7,6520
490	763,15	781,5	562,5	39,895	559,9	7,6664
500	773,15	792,4	570,5	41,919	539,9	7,6806
510	783,15	803,4	578,6	44,021	520,7	7,6946
520	793,15	814,3	586,7	46,205	502,4	7,7085
530	803,15	825,3	594,8	48,475	485,0	7,7223
540	813,15	836,3	602,9	50,830	468,2	7,7359
550	823,15	847,3	611,1	53,275	452,3	7,7494
560	833,15	858,4	619,3	55,810	437,0	7,7627
570	843,15	869,5	627,5	58,438	422,3	7,7759

t	T	h	u	π_0	θ_0	s^0
°C	K	кДж/кг				кДж/(кг·К)
580	853,15	880,6	635,7	61,163	408,3	7,7890
590	863,15	891,7	643,9	63,988	394,8	7,8020
600	873,15	902,8	652,2	66,913	382,0	7,8148
610	883,15	914,0	660,5	64,942	369,6	7,8275
620	893,15	925,1	668,8	73,077	357,7	7,8401
630	903,15	936,3	677,1	76,323	346,4	7,8525
640	913,15	947,5	685,5	79,682	335,4	7,8649
650	923,15	958,8	693,9	83,155	325,0	7,8772
660	933,15	970,1	702,2	86,746	314,9	7,8893
670	943,15	981,3	710,7	90,459	305,18	7,9013
680	953,15	992,6	719,1	94,295	295,87	7,9133
690	963,15	1004,0	727,5	98,259	286,91	7,9251
700	973,15	1015,3	736,0	102,35	278,30	7,9368
710	983,15	1026,7	744,5	106,58	270,00	7,9484
720	993,15	1038,1	753,0	110,95	262,01	7,9599
730	1003,15	1049,5	761,6	115,45	254,31	7,9714
740	1013,15	1060,9	770,1	120,10	246,92	7,9827
750	1023,15	1072,4	778,7	124,90	239,77	7,9939
760	1033,15	1083,8	787,3	129,85	232,89	8,0051
770	1043,15	1095,3	795,9	134,95	226,26	8,0161
780	1053,15	1106,8	804,5	140,21	219,86	8,0271
790	1063,15	1118,3	813,2	145,63	213,68	8,038
800	1073,15	1129,8	821,9	151,21	207,73	8,0488
810	1083,15	1141,4	830,5	156,97	201,98	8,0595
820	1093,15	1153,0	839,2	162,89	196,43	8,0701
830	1103,15	1164,6	848,0	168,99	191,07	8,0807
840	1113,15	1176,2	856,7	175,27	185,90	8,0912
850	1123,15	1187,8	865,4	181,74	180,89	8,1015
860	1133,15	1199,4	874,2	188,38	176,07	8,1119
870	1143,15	1211,4	883,0	195,23	171,39	8,1221
880	1153,15	1222,8	891,8	202,27	166,87	8,1323
890	1163,15	1234,4	900,6	209,50	162,51	8,1424
900	1173,15	1246,2	909,5	216,95	158,29	8,1524
910	1183,15	1257,8	918,3	224,59	154,20	8,1623
920	1193,15	1269,6	927,1	232,45	150,24	8,1722
930	1203,15	1281,3	936,0	240,53	146,41	8,1820
940	1213,15	1293,1	944,9	248,82	142,71	8,1917
950	1223,15	1304,9	953,8	257,34	139,12	8,2014
960	1233,15	1316,6	962,7	266,09	135,65	8,2110
970	1243,15	1328,4	971,7	275,08	132,28	8,2205
980	1253,15	1340,2	980,6	284,30	129,02	8,2300
990	1263,15	1352,1	989,5	293,76	125,86	8,2394
1000	1273,15	1363,9	998,5	303,48	122,79	8,2487
1010	1283,15	1375,8	1007,5	313,44	119,82	8,2580
1020	1293,15	1387,6	1016,5	323,66	116,95	8,2672
1030	1303,15	1399,5	1025,5	334,15	114,15	8,2763

Продолжение табл.

t	T	h	u	z_0	Θ_0	s^0
°C	K	кДж/кг				кДж/(кг·
1040	1313,15	1411,4	1034,5	344,90	111,41	8,2855
1050	1323,15	1423,3	1043,6	355,93	108,81	8,2945
1060	1333,15	1435,2	1052,6	367,23	106,26	8,3035
1070	1343,15	1447,2	1061,7	378,82	103,78	8,3125
1080	1353,15	1459,1	1070,7	390,69	101,38	8,3212
1090	1363,15	1471,1	1079,8	402,87	99,04	8,3300
1100	1373,15	1483,0	1088,9	415,33	96,77	8,3388
1110	1383,15	1495,0	1098,0	428,10	94,57	8,3475
1120	1393,15	1507,0	1107,1	441,17	92,43	8,3561
1130	1403,15	1519,0	1116,3	454,56	90,35	8,3647
1140	1413,15	1531,0	1125,4	468,27	88,33	8,3732
1150	1423,15	1543,0	1134,6	482,31	86,37	8,3817
1160	1433,15	1555,1	1143,7	496,68	84,46	8,3901
1170	1443,15	1567,1	1152,9	511,38	82,60	8,3985
1180	1453,15	1579,1	1162,1	526,42	80,80	8,4068
1190	1463,15	1591,2	1171,3	541,82	79,04	8,4151
1200	1473,15	1603,3	1180,5	557,58	77,33	8,4233
1210	1483,15	1615,3	1189,7	573,68	75,67	8,4315
1220	1493,15	1627,4	1198,9	590,17	74,05	8,4396
1230	1503,15	1639,5	1208,1	607,01	72,48	8,4477
1240	1513,15	1651,7	1217,4	624,24	70,95	8,4557
1250	1523,15	1663,8	1226,6	641,86	69,46	8,4637
1260	1533,15	1675,9	1235,9	659,86	68,01	8,4717
1270	1543,15	1688,1	1245,2	678,27	66,59	8,4795
1280	1553,15	1700,2	1254,5	697,08	65,22	8,4874
1290	1563,15	1712,4	1263,8	716,31	63,87	8,4952
1300	1573,15	1724,6	1273,1	735,24	62,57	8,5030
1310	1583,15	1736,8	1282,4	756,01	61,29	8,5107
1320	1593,15	1748,9	1291,7	776,51	60,05	8,5183
1330	1603,15	1761,1	1301,0	797,44	58,84	8,5260
1340	1613,15	1773,4	1310,4	818,82	57,66	8,5336
1350	1623,15	1785,6	1319,7	840,65	56,62	8,5412
1360	1633,15	1797,8	1329,1	862,95	55,39	8,5486
1370	1643,15	1810,0	1338,5	885,70	54,30	8,5561
1380	1653,15	1822,3	1347,8	908,93	53,24	8,5635
1390	1663,15	1834,6	1357,2	932,64	52,20	8,5709
1400	1673,15	1846,8	1336,6	956,84	51,18	8,5783
1410	1683,15	1859,1	1376,0	981,54	50,192	8,5856
1420	1693,15	1871,4	1385,4	1006,70	49,228	8,5929
1430	1703,15	1883,6	1394,8	1032,4	48,286	8,6001
1440	1713,15	1895,9	1404,3	1058,7	47,367	8,6073
1450	1723,15	1908,2	1413,7	1085,4	46,468	8,6145
1460	1733,15	1920,6	1423,2	1112,7	45,591	8,6216
1470	1743,15	1932,9	1432,6	1140,5	44,736	8,6287

Продолжение табл. 13

t	T	h	u	π_0	θ_0	s^0
°C	K	кДж/кг				кДж/(кг·К)
1480	1753,15	1945,2	1442,1	1168,9	43,898	8,6357
1490	1763,15	1957,5	1451,5	1197,8	43,085	8,6428
1500	1773,15	1969,9	1461,0	1227,3	42,288	8,6497

Таблица 14

Термодинамические функции азота по С. Л. Ривкину

t	T	h	u	π_0	θ_0	s^0
°C	K	кДж/кг				кДж/(кг·К)
—50	223,15	231,3	165,1	0,36489	18 511	6,5343
—40	233,15	241,7	172,5	0,42549	16 586	6,5799
—30	243,15	252,1	179,9	0,49284	14 933	6,6235
—20	253,15	262,5	187,4	0,56754	13 501	6,6654
—10	263,15	272,9	194,8	0,64996	12 255	6,7056
0	273,15	283,3	202,2	0,74060	11 164	6,7443
10	283,15	293,7	209,6	0,83994	10 204	6,7817
20	293,15	304,0	217,0	0,94848	9355	6,8178
30	303,15	314,5	224,5	1,0667	8602	6,8527
40	313,15	324,9	231,9	1,1951	7931	6,8864
50	323,15	335,2	239,4	1,3343	7331	6,9191
60	333,15	345,7	246,8	1,4847	6792	6,9508
70	343,15	356,0	254,2	1,6468	6307	6,9815
80	353,15	366,5	261,6	1,8214	5869	7,0114
90	363,15	376,9	269,1	2,0089	5472	7,0405
100	373,15	387,3	276,4	2,2098	5111	7,0688
110	383,15	397,7	284,0	2,4249	4782	7,0964
120	393,15	408,1	291,4	2,6547	4482	7,1232
130	403,15	418,6	298,9	2,8998	4208	7,1494
140	413,15	429,0	306,4	3,1609	3956	7,1750
150	423,15	439,5	313,9	3,4387	3725	7,2000
160	433,15	449,9	321,4	3,7338	3511	7,2244
170	443,15	460,4	328,9	4,0469	3314	7,2484
180	453,15	470,9	336,4	4,3788	3133	7,2718
190	463,15	481,4	343,9	4,7303	2964	7,2947
200	473,15	491,9	351,5	5,1020	2807	7,3171
210	483,15	502,4	359,0	5,4947	2661	7,3391
220	493,15	513,0	366,6	5,9093	2526	7,3607
230	503,15	523,5	374,2	6,3465	2400	7,3819
240	513,15	534,1	381,8	6,8073	2282	7,4027
250	523,15	544,7	389,4	7,2925	2171	7,4231
260	533,15	555,3	397,0	7,8030	2069	7,4432
270	543,15	565,9	404,7	8,3397	1971,3	7,4629
280	553,15	576,5	412,4	8,9035	1880,4	7,4824
290	563,15	587,2	420,1	9,4954	1795,1	7,5014

t	T	h	u	τ_0	θ_0	s_0
°C	К	кДж/кг				кДж/(кг·К)
300	573,15	597,9	427,8	10,1170	1714,8	7,5202
310	583,15	608,6	435,5	10,768	1639,2	7,5388
320	593,15	619,3	443,3	11,449	1568,1	7,5570
330	603,15	630,0	451,0	12,164	1500,8	7,5750
340	613,15	640,8	458,8	12,912	1437,3	7,5927
350	623,15	651,6	466,7	13,694	1377,3	7,6101
360	633,15	662,4	474,5	14,511	1320,6	7,6273
370	643,15	673,2	482,4	15,365	1267,1	7,6443
380	653,15	684,1	490,2	16,257	1216,0	7,6610
390	663,15	695,0	498,1	17,188	1167,8	7,6776
400	673,15	705,9	506,1	18,159	1122,0	7,6939
410	683,15	716,8	514,1	19,172	1078,5	7,7100
420	693,15	727,7	522,0	20,228	1037,2	7,7259
430	703,15	738,7	530,0	21,328	997,9	7,7416
440	713,15	749,7	538,0	22,474	960,4	7,7571
450	723,15	760,7	546,1	23,666	924,9	7,7725
460	733,15	771,8	554,2	24,908	890,9	7,7877
470	743,15	782,8	562,3	26,199	858,6	7,8026
480	753,15	793,9	570,4	27,541	827,7	7,8175
490	763,15	805,0	578,6	28,937	798,2	7,8322
500	773,15	816,2	586,7	30,387	770,1	7,8466
510	783,15	827,3	594,9	31,892	743,3	7,8610
520	793,15	838,6	603,2	33,456	717,6	7,8752
530	803,15	849,8	611,4	35,079	693,0	7,8893
540	813,15	861,0	619,7	36,793	669,5	7,9032
550	823,15	872,3	628,0	38,508	647,0	7,9169
560	833,15	883,6	636,3	40,319	625,4	7,9306
570	843,15	894,9	644,7	42,195	604,8	7,9441
580	853,15	906,2	653,1	44,139	585,0	7,9575
590	863,15	917,6	661,4	46,152	566,1	7,9707
600	873,15	929,0	669,8	48,237	547,9	7,9838
610	883,15	940,4	678,3	50,396	530,4	7,9968
620	893,15	951,8	686,8	52,629	513,7	8,0097
630	903,15	963,3	695,2	54,939	497,6	8,0224
640	913,15	974,7	703,7	57,329	482,1	8,0350
650	923,15	986,2	712,3	59,799	467,2	8,0476
660	933,15	997,8	720,8	62,354	453,0	8,0600
670	943,15	1009,3	729,4	64,993	439,2	8,0723
680	953,15	1020,9	738,0	67,719	426,0	8,0845
690	963,15	1032,5	746,6	70,535	413,3	8,0966
700	973,15	1044,0	755,2	73,444	401,1	8,1086
710	983,15	1055,7	763,9	76,446	389,3	8,1205
720	993,15	1067,3	772,6	79,543	377,9	8,1322
730	1003,15	1079,0	781,3	82,740	367,0	8,1439
740	1013,15	1090,7	790,0	86,037	356,4	8,1555

t	T	h	u	z_0	Θ_0	s^0
°C	K	кДж/кг				кДж/(кг·К)
750	1023,15	1102,4	798,7	89,438	346,2	8,1670
760	1033,15	1114,1	807,5	92,945	336,4	8,1784
770	1043,15	1125,9	816,3	96,559	327,0	8,1897
780	1053,15	1137,7	825,1	100,280	317,9	8,2010
790	1063,15	1149,5	834,0	104,12	309,0	8,2122
800	1073,15	1161,3	842,8	108,07	300,5	8,2232
810	1083,15	1173,1	851,7	112,15	292,32	8,2342
820	1093,15	1185,0	860,6	116,34	284,40	8,2451
830	1103,15	1196,8	869,5	120,65	276,74	8,2559
840	1113,15	1208,7	878,4	125,10	269,32	8,2666
850	1123,15	1220,7	887,3	129,67	262,16	8,2773
860	1133,15	1232,6	869,3	134,37	255,25	8,2878
870	1143,15	1244,5	905,3	139,21	248,55	8,2984
880	1153,15	1256,5	914,3	144,18	242,08	8,3088
890	1163,15	1268,5	923,3	149,30	235,80	8,3191
900	1173,15	1280,4	932,3	154,56	229,74	8,3294
910	1183,15	1292,5	941,4	159,66	223,87	8,3396
920	1193,15	1304,5	950,4	165,51	218,19	8,3497
930	1203,15	1316,5	959,5	171,21	212,70	8,3597
940	1213,15	1328,6	968,6	177,07	207,37	8,3697
950	1223,15	1340,7	977,7	183,09	202,20	8,3797
960	1233,15	1352,8	986,8	189,26	197,21	8,3895
970	1243,15	1364,9	995,9	195,60	192,36	8,3993
980	1253,15	1377,0	1005,1	202,11	187,67	8,4090
990	1263,15	1389,1	1014,3	208,79	183,11	8,4186
1000	1273,15	1401,3	1023,5	215,64	178,70	8,4282
1010	1283,15	1413,5	1032,7	222,66	174,42	8,4377
1020	1293,15	1425,6	1041,8	229,87	170,27	8,4472
1030	1303,15	1437,8	1051,1	237,26	166,24	8,4566
1040	1313,15	1450,0	1060,3	244,84	162,33	8,4659
1050	1323,15	1462,2	1069,6	252,61	158,54	8,4752
1060	1333,15	1474,5	1078,8	260,57	154,86	8,4844
1070	1343,15	1486,7	1088,1	268,73	151,28	8,4935
1080	1353,15	1499,0	1097,4	277,10	147,80	8,5026
1090	1363,15	1511,3	1106,7	285,66	144,43	8,5117
1100	1373,15	1523,6	1116,0	294,44	141,15	8,5206
1110	1383,15	1535,8	1125,4	303,43	137,97	8,5296
1120	1393,15	1548,1	1134,7	312,63	134,88	8,5384
1130	1403,15	1560,5	1144,1	322,06	131,87	8,5473
1140	1413,15	1572,8	1153,4	331,70	128,95	8,5560
1150	1423,15	1585,2	1162,8	341,58	126,10	8,5647
1160	1433,15	1597,5	1172,2	351,69	123,34	8,5734
1170	1443,15	1609,9	1181,6	362,04	120,65	8,5820
1180	1453,15	1622,3	1191,0	372,62	118,04	8,5905
1190	1463,15	1634,7	1200,5	383,45	115,49	8,5990

Продолжение табл. 14

t	T	h	u	π_0	θ_0	s^0
°С	К	кДж/кг				кДж/(кг·К)
1200	1473,15	1647,1	1209,9	394,53	113,02	8,6075
1210	1483,15	1659,5	1219,4	405,84	110,61	8,6159
1220	1493,15	1671,9	1228,8	417,43	108,26	8,6243
1230	1503,15	1684,4	1238,3	429,27	105,98	8,6325
1240	1513,15	1696,8	1247,7	441,38	103,76	8,6408
1250	1523,15	1709,3	1257,2	453,76	101,60	8,6490
1260	1533,15	1721,8	1266,8	466,41	99,49	8,6572
1270	1543,15	1734,3	1276,3	479,34	97,44	8,6653
1280	1553,15	1746,7	1285,8	492,56	95,44	8,6734
1290	1563,15	1759,2	1295,3	506,06	93,49	8,6814
1300	1573,15	1771,8	1304,9	519,85	91,59	8,6894
1310	1583,15	1784,3	1314,4	533,93	89,74	8,6973
1320	1593,15	1796,8	1324,0	548,32	87,94	8,7052
1330	1603,15	1809,4	1333,6	563,02	86,18	8,7130
1340	1613,15	1821,9	1343,2	578,02	84,47	8,7209
1350	1623,15	1834,5	1352,8	593,34	82,80	8,7286
1360	1633,15	1847,0	1362,4	608,99	81,17	8,7363
1370	1643,15	1859,6	1372,0	624,95	79,58	8,7440
1380	1653,15	1872,2	1381,6	641,25	78,03	8,7517
1390	1663,15	1884,8	1391,2	657,87	76,52	8,7592
1400	1673,15	1897,4	1400,9	674,84	75,04	8,7668
1410	1683,15	1910,1	1410,5	692,16	73,60	8,7743
1420	1693,15	1922,7	1420,2	709,82	72,20	8,7818
1430	1703,15	1935,3	1429,8	727,84	70,82	8,7892
1440	1713,15	1948,0	1439,5	746,22	69,49	8,7966
1450	1723,15	1960,6	1449,2	764,96	68,18	8,8040
1460	1733,15	1973,2	1459,9	784,08	66,90	8,8113
1470	1743,15	1985,9	1468,6	803,57	65,66	8,8186
1480	1753,15	1998,6	1478,3	823,44	64,44	8,8259
1490	1763,15	2011,3	1488,0	843,71	63,25	8,8330
1500	1773,15	2023,9	1497,7	864,36	62,09	8,8403

Таблица 15

Термодинамические функции кислорода по С. Л. Ривкину

t	T	h	u	π_0	θ_0	s^0
°С	К	кДж/кг				кДж/(кг·К)
—50	223,15	202,1	144,2	1,8581	3182	6,1437
—40	233,15	211,3	150,7	2,1665	2852	6,1836
—30	243,15	220,4	157,2	2,5102	2567	6,2218
—20	253,15	229,5	163,7	2,8914	2320	6,2586

Продолжение табл. 15

t	T	h	u	π_0	θ_0	s^0
°C	К	кДж/кг				кДж/(кг·К)
—10	263,15	238,6	170,2	3,3127	2105	6,2939
0	273,15	247,7	176,8	3,7767	1916,5	6,3280
10	283,15	256,9	183,3	4,2861	1750,6	6,3608
20	293,15	266,0	189,9	4,8437	1603,8	6,3926
30	303,15	275,2	196,4	5,4527	1473,2	6,4234
40	313,15	284,4	203,0	6,1158	1356,8	6,4532
50	323,15	293,6	209,6	6,8361	1252,6	6,4822
60	333,15	302,8	216,2	7,6172	1159,0	6,5103
70	343,15	312,0	222,9	8,4624	1074,5	6,5376
80	353,15	321,3	229,6	9,3752	998,2	6,5642
90	363,15	330,6	263,3	10,359	929,0	6,5901
100	373,15	339,9	243,0	11,419	865,9	6,6155
110	383,15	349,3	249,7	12,558	808,5	6,6402
120	393,15	358,6	256,5	13,782	755,9	6,6643
130	403,15	368,1	263,3	15,093	707,8	6,6879
140	413,15	377,5	270,1	16,496	663,7	6,7110
150	423,15	386,9	277,0	17,996	623,1	6,7336
160	433,15	396,4	283,9	19,598	585,7	6,7558
170	443,15	405,9	290,8	21,307	551,1	6,7775
180	453,15	415,15	297,8	23,128	519,2	6,7988
190	463,15	425,1	304,7	25,066	489,6	6,8197
200	473,15	434,7	311,7	27,128	462,2	6,8403
210	483,15	444,3	318,8	29,317	436,7	6,8604
220	493,15	454,0	325,9	31,641	413,0	6,8803
230	503,15	463,7	333,0	34,107	390,9	6,8998
240	513,15	473,4	340,1	36,718	370,3	6,9189
250	523,15	483,2	347,3	39,483	351,1	6,9378
260	533,15	493,0	354,5	42,408	333,1	6,9564
270	543,15	502,9	361,7	45,499	316,3	6,9746
280	553,15	512,8	369,0	48,765	300,7	6,9927
290	563,15	522,6	376,3	52,210	285,8	7,0104
300	573,15	532,6	383,6	55,844	272,0	7,0279
310	583,15	542,5	391,0	59,675	259,0	7,0451
320	593,15	552,5	398,4	64,708	246,7	7,0621
330	603,15	562,5	405,8	67,954	235,2	7,0789
340	613,15	572,6	413,3	72,418	224,4	7,0954
350	623,15	582,7	420,8	77,110	214,1	7,1117
360	633,15	592,8	428,3	82,040	204,5	7,1278
370	643,15	602,9	435,8	87,215	195,41	7,1437

Продолжение табл. 15

t	T	h	u	π_0	θ_0	s^0
°C	K	кДж/кг				кДж/(кг·К)
380	653,15	613,1	443,4	92,645	186,81	7,1594
390	663,15	623,3	451,0	98,339	178,69	7,1749
400	673,15	633,5	458,7	104,30	171,02	7,1902
410	683,15	643,8	466,3	110,55	163,75	7,2053
420	693,15	654,1	474,0	117,09	156,87	7,2203
430	703,15	664,4	481,7	123,94	150,33	7,2350
440	713,15	674,7	489,4	131,09	144,16	7,2496
450	723,15	685,1	497,2	138,57	138,28	7,2640
460	733,15	695,4	505,0	146,39	132,71	7,2782
470	743,15	705,8	512,8	154,55	127,41	7,2924
480	753,15	716,3	520,6	163,06	122,39	7,3063
490	763,15	726,7	528,4	171,94	117,61	7,3201
500	773,15	737,2	563,3	181,20	113,06	7,3337
510	783,15	747,7	544,2	190,86	108,73	7,3472
520	793,15	758,2	552,1	200,92	104,60	7,3605
530	803,15	768,7	560,1	211,39	100,68	7,3737
540	813,15	779,3	568,0	222,29	96,93	7,3868
550	823,15	789,9	576,0	238,63	93,36	7,3997
560	833,15	800,5	584,0	245,43	89,95	7,4125
570	843,15	811,1	592,0	257,69	86,70	7,4252
580	853,15	821,7	600,0	270,44	83,59	7,4378
590	863,15	832,4	608,1	283,68	80,63	7,4502
600	873,15	843,0	616,2	297,44	77,79	7,4625
610	883,15	853,8	624,3	311,72	75,07	7,4746
620	893,15	864,5	632,4	326,53	72,48	7,4867
630	903,15	875,2	640,5	341,90	70,00	7,4987
640	913,15	886,0	648,7	357,84	67,62	7,5105
650	923,15	896,7	656,9	374,37	65,34	7,5222
660	933,15	907,5	665,1	391,50	63,16	7,5338
670	943,15	918,3	673,3	409,25	61,07	7,5454
680	953,15	929,2	681,5	427,62	59,06	7,5568
690	963,15	940,0	689,7	446,64	57,14	7,5681
700	973,15	950,9	698,0	466,33	55,30	7,5793
710	983,15	961,7	706,3	486,70	53,53	7,5904
720	993,15	972,6	714,6	507,78	51,83	7,6014
730	1003,15	983,5	722,8	529,58	50,19	7,6123
740	1013,15	994,4	731,2	552,11	48,63	7,6232
750	1023,15	1005,3	739,5	575,38	47,12	7,6339
760	1033,15	1016,3	747,8	559,44	45,67	7,6445

t	T	h	u	π_0	θ_0	s^0
°C	K	кДж/кг				кДж/(кг·К)
77	1043,15	1027,2	756,2	624,28	44,28	7,6551
78	1053,15	1038,2	764,5	649,94	42,94	7,6656
790	1063,15	1049,2	772,9	676,41	41,65	7,6760
800	1073,15	1060,2	781,3	703,75	40,41	7,6862
810	1083,15	1071,2	789,8	731,95	39,21	7,6964
820	1093,15	1082,2	798,2	761,03	38,06	7,7066
830	1103,15	1093,2	806,6	791,03	36,95	7,7166
840	1113,15	1104,3	815,0	821,95	35,89	7,7266
850	1123,15	1115,3	823,5	853,83	34,86	7,7364
860	1133,15	1126,4	832,0	886,67	33,86	7,7462
870	1143,15	1137,5	840,5	920,53	32,91	7,7560
880	1153,15	1148,6	849,0	955,38	31,98	7,7657
890	1163,15	1159,6	857,4	991,29	31,09	7,7753
900	1173,15	1170,8	865,9	1028,3	30,23	7,7848
910	1183,15	1181,9	874,5	1066,3	29,40	7,7942
920	1193,15	1193,0	883,0	1105,5	28,60	7,8036
930	1203,15	1204,2	891,6	1145,8	27,83	7,8129
940	1213,15	1215,3	900,1	1187,2	27,08	7,8221
950	1223,15	1226,5	908,7	1229,8	26,36	7,8313
960	1233,15	1237,7	917,3	1273,7	25,66	7,8404
970	1243,15	1248,9	925,9	1318,8	24,98	7,8494
980	1253,15	1260,0	934,4	1365,1	24,33	7,8584
990	1263,15	1271,3	943,1	1412,7	23,69	7,8673
1000	1273,15	1282,5	951,7	1461,6	23,08	7,8761
1010	1283,15	1293,7	960,3	1511,9	22,49	7,8849
1020	1293,15	1304,9	968,8	1563,5	21,92	7,8937
1030	1303,15	1316,2	977,6	1616,6	21,36	7,9023
1040	1313,15	1327,5	986,3	1671,0	20,82	7,9109
1050	1232,15	1338,7	994,9	1726,9	20,30	7,9195
1060	1333,15	1350,0	1003,6	1784,2	19,799	7,9280
1070	1343,15	1361,3	1012,3	1843,1	19,310	7,9364
1080	1353,15	1372,6	1021,0	1903,5	18,837	7,9448
1090	1363,15	1383,9	1029,7	1965,4	18,378	7,9531
1100	1373,15	1395,2	1038,4	2029	17,933	7,9614
1100	1383,15	1406,5	1047,1	2094	17,501	7,9696
1120	1393,15	1417,9	1055,9	2161	17,083	7,9777

Продолжение табл. 15

t	T	h	u	π_0	θ_0	s^0
°C	K	кДж/кг				кДж/(кг·К)
1130	1403,15	1429,2	1064,6	2230	16,677	7,9858
1140	1413,15	1440,5	1073,4	2300	16,283	7,9939
1150	1423,15	1451,9	1082,1	2372	15,900	8,0019
1160	1433,15	1463,2	1090,9	2445	15,530	8,0098
1170	1443,15	1474,6	1099,7	2521	15,170	8,0178
1180	1453,15	1486,0	1108,4	2598	14,820	8,0256
1190	1463,15	1497,4	1117,2	2678	14,480	8,0334
1200	1473,15	1508,7	1126,0	2759	14,150	8,0412
1210	1483,15	1520,2	1134,8	2842	13,829	8,0489
1220	1493,15	1531,6	1143,6	2927	13,517	8,0566
1230	1503,15	1543,0	1152,4	3014	13,214	8,0642
1240	1513,15	1554,4	1161,3	3103	12,920	8,0718
1250	1523,15	1565,9	1170,1	3195	12,634	8,0793
1260	1533,15	1577,3	1179,0	3288	12,355	8,0868
1270	1543,15	1588,8	1187,8	3384	12,084	8,0942
1280	1553,15	1600,2	1196,7	3482	11,821	8,1016
1290	1563,15	1611,7	1205,5	3582	11,565	8,1090
1300	1573,15	1623,2	1214,4	3684	11,316	8,1163
1310	1583,15	1634,6	1223,3	3789	11,073	8,1236
1320	1593,15	1646,2	1232,2	3896	10,837	8,1308
1330	1603,15	1657,6	1241,1	4005	10,607	8,1380
1340	1613,15	1669,1	1250,0	4117	10,383	8,1452
1350	1623,15	1680,7	1258,9	4231	10,166	8,1523
1360	1633,15	1692,2	1267,8	4348	9,953	8,1593
1370	1643,15	1703,7	1276,8	4467	9,747	8,1664
1380	1653,15	1715,2	1285,7	4589	9,545	8,1734
1390	1663,15	1726,8	1294,7	4714	9,349	8,1804
1400	1673,15	1738,4	1303,6	4841	9,158	8,1873
1410	1683,15	1749,9	1312,6	4971	8,972	8,1942
1420	1693,15	1761,5	1321,6	5104	8,790	8,2010
1430	1703,15	1773,1	1330,6	5240	8,613	8,2079
1440	1713,15	1784,7	1339,5	5378	8,440	8,2147
1450	1723,15	1796,3	1348,5	5520	8,272	8,2214
1460	1733,15	1807,9	1357,5	5664	8,108	8,2281
1470	1743,15	1819,4	1366,5	5812	7,948	8,2348
1480	1753,15	1831,0	1375,5	5962	7,792	8,2414
1490	1763,15	1842,7	1384,6	6116	7,639	8,2480
1500	1773,15	1854,3	1393,6	6273	7,490	8,2546

Таблица 16

Термодинамические функции двуокиси углерода по С. Л. Ривкину

t	T	h	u	π_0	θ_0	s
°C	K	кДж/кг				кДж/(кг·К)
—50	223,15	152,7	110,5	0,042268	101 728	4,6224
—40	233,15	160,3	116,3	0,050494	88 967	4,6560
—30	243,15	168,1	122,1	0,060025	78 050	4,6886
—20	253,15	176,0	128,2	0,071030	68 670	4,7204
—10	263,15	184,0	134,3	0,083701	60 576	4,7515
0	273,15	192,1	140,5	0,098247	53 569	4,7817
10	283,15	200,3	146,8	0,11489	47 486	4,8113
20	293,15	208,6	153,3	0,13390	42 183	4,8402
30	303,15	217,1	159,8	0,15553	37 555	4,8685
40	313,15	225,6	166,5	0,18012	33 498	4,8963
50	323,15	234,3	173,2	0,2080	29 936	4,9234
60	333,15	243,0	180,1	0,2395	26 803	4,9501
70	343,15	251,8	187,0	0,2750	24 041	4,9762
80	353,15	260,8	194,1	0,3150	21 599	5,0018
90	363,15	269,8	201,2	0,3600	19 347	5,0270
100	373,15	278,9	108,4	0,4104	17 518	5,0518
110	383,15	288,1	215,7	0,4669	15 812	5,0762
120	393,15	297,4	223,2	0,5300	14 294	5,1002
130	403,15	306,8	230,7	0,6003	12 939	5,1238
140	413,15	316,3	238,2	0,6787	11 729	5,1468
150	423,15	325,8	245,8	0,7658	10 647	5,1697
160	433,15	335,4	253,6	0,8624	9677	5,1921
170	443,15	345,1	261,4	1,9695	8807	5,2142
180	453,15	354,9	269,3	1,0881	8024	5,2360
190	463,15	364,7	277,2	1,2191	7320	5,2575
200	473,15	374,6	285,2	1,3637	6685	5,2787
210	483,15	384,6	293,3	1,5231	6112	5,2996
220	493,15	394,7	301,5	1,6985	5594	5,3202
230	503,15	404,8	309,7	1,8914	5126	5,3405
240	513,15	415,0	318,0	2,103	4701	5,3605
250	523,15	425,3	326,4	2,336	4316	5,3803
260	533,15	435,6	334,9	2,590	3966	5,3999
270	543,15	445,9	343,3	2,869	3648	5,4192
280	553,15	456,4	351,9	3,173	3358	5,4382
290	563,15	466,9	360,5	3,506	3095	5,4571
300	573,15	477,5	369,2	3,869	2854	5,4757
310	583,15	488,1	377,9	4,265	2635	5,4941
320	593,15	498,8	386,7	4,695	2434	5,5123
330	603,15	509,6	395,6	5,164	2250	5,5302
340	613,15	520,4	404,5	5,673	2082	5,5480
350	623,15	531,2	413,5	6,226	1928,5	5,5656
360	633,15	542,1	422,5	8,826	1787,3	5,5829

Продолжение табл. 16

t	T	h	u	π_0	Θ_0	s^0
°C	K	кДж/кг				кДж/(кг·К)
370	643,15	553,1	431,6	7,476	1657,7	5,6001
380	653,15	564,1	440,7	8,179	1538,6	5,6171
390	663,15	575,2	449,9	8,941	1429,1	5,6339
400	673,15	586,3	459,1	9,764	1328,3	5,6506
410	683,15	597,5	468,4	10,653	1235,6	5,6670
420	693,15	608,7	477,8	11,613	1150,0	5,6833
430	703,15	619,9	487,1	12,648	1071,1	5,6994
440	713,15	631,2	496,5	13,763	998,4	5,7154
450	723,15	642,6	506,0	14,965	931,0	5,7312
460	733,15	654,0	515,5	16,258	868,9	5,7469
470	743,15	665,4	525,1	17,647	811,4	5,7624
480	753,15	676,9	534,7	19,142	758,1	5,7777
490	763,15	688,5	544,3	20,75	708,8	5,7929
500	773,15	700,0	554,0	22,48	663,0	5,8080
510	783,15	711,6	563,7	24,31	620,6	5,8229
520	793,15	723,3	573,5	26,29	581,3	5,8377
530	803,15	735,0	583,2	28,41	544,7	5,8524
540	813,15	746,7	593,1	30,68	510,7	5,8669
550	823,15	758,5	602,9	33,11	479,1	5,8812
560	833,15	770,3	612,9	35,70	449,7	5,8955
570	843,15	782,1	622,8	38,47	422,3	5,9096
580	853,15	794,0	632,8	41,43	396,8	5,9237
590	863,15	805,9	642,8	44,59	373,0	5,9375
600	873,15	817,8	652,9	47,96	350,8	5,9513
610	883,15	829,8	663,0	51,55	380,1	5,9649
620	893,15	841,8	673,1	55,38	310,7	5,9785
630	903,15	853,9	683,3	59,45	292,7	5,9919
640	913,15	866,0	693,5	63,79	275,8	6,0052
650	923,15	878,1	703,7	68,41	260,0	6,0184
660	933,15	890,2	713,9	73,31	245,2	6,0315
670	943,15	902,4	724,2	78,53	231,4	6,0444
680	953,15	914,6	734,5	84,06	218,5	6,0573
690	963,15	926,9	744,9	89,94	206,3	6,0701
700	973,15	939,1	755,3	96,18	194,95	6,0828
710	983,15	951,4	765,7	102,80	184,27	6,0953
720	993,15	963,8	776,1	109,81	174,26	6,1078
730	1003,15	976,1	786,6	117,24	164,86	6,1201
740	1013,15	988,5	797,0	125,12	156,02	6,1324
750	1023,15	1000,9	807,6	133,45	147,72	6,1446
760	1033,15	1013,3	818,1	142,27	139,92	6,1567
770	1043,15	1025,8	828,7	151,60	132,58	6,1687
780	1053,15	1038,2	839,2	161,46	125,67	6,1806
790	1063,15	1050,8	849,9	171,89	119,17	6,1924
800	1073,15	1063,3	860,6	182,90	113,05	6,2042
810	1083,15	1075,8	871,2	194,53	107,28	6,2158

t	T	h	u	ε_0	θ_0	s^0
°C	K	кДж/кг				кДж/(кг·К)
820	1093,15	1088,4	881,9	206,8	101,84	6,2274
830	1103,15	1101,0	892,6	219,8	96,71	6,2389
840	1113,15	1113,6	903,3	233,4	91,88	6,2503
850	1123,15	1126,3	914,1	247,6	87,31	6,2616
860	1133,15	1139,0	924,9	263,0	83,01	6,2728
870	1143,15	1151,7	935,7	279,0	78,94	6,2840
880	1153,15	1164,4	946,6	295,9	75,10	6,2950
890	1163,15	1177,1	957,4	313,6	71,46	6,3060
900	1173,15	1189,9	968,2	332,3	68,03	6,3170
910	1183,15	1202,7	979,1	351,9	64,78	6,3278
920	1193,15	1215,5	990,1	372,5	61,71	6,3386
930	1203,15	1228,3	1001,0	394,2	58,80	6,3492
940	1213,15	1241,1	1011,9	417,1	56,05	6,3599
950	1223,15	1254,0	1022,9	441,0	53,44	6,3704
960	1233,15	1266,8	1033,9	466,9	50,97	6,3809
970	1243,15	1279,7	1044,9	492,6	48,62	6,3913
980	1253,15	1292,6	1055,9	520,3	46,40	6,4017
990	1263,15	1305,6	1067,0	549,4	44,30	6,4120
1000	1273,15	1318,5	1078,0	579,0	42,30	6,4222
1010	1283,15	1331,5	1089,1	611,9	40,40	6,4323
1020	1293,15	1344,5	1100,2	645,4	38,60	6,4424
1030	1303,15	1357,5	1111,3	680,6	36,89	6,4524
1040	1313,15	1370,5	1122,4	717,4	35,27	6,4624
1050	1325,15	1383,5	1133,6	755,9	33,72	6,4722
1060	1333,15	1396,6	1144,7	796,3	32,26	6,4821
1070	1343,15	1409,7	1155,9	838,5	30,86	6,4918
1080	1353,15	1422,7	1167,1	882,7	29,54	6,5016
1090	1363,15	1435,8	1178,3	929,0	28,27	6,5112
1100	1373,15	1449,0	1189,5	977,3	27,07	6,5208
1110	1383,15	1462,1	1200,8	1027,9	25,93	6,5303
1120	1393,15	1475,2	1212,0	1080,7	24,84	6,5398
1130	1403,15	1488,4	1223,3	1136,0	23,80	6,5492
1140	1413,15	1501,6	1234,6	1193,6	22,81	6,5585
1150	1423,15	1514,7	1245,9	1253,9	21,87	6,5678
1160	1433,15	1528,0	1257,2	1316,7	20,97	6,5771
1170	1443,15	1541,2	1268,5	1382,4	20,11	6,5863
1180	1453,15	1554,4	1279,9	1450,9	19,297	6,5954
1190	1463,15	1567,7	1291,3	1522,3	18,519	6,6045
1200	1473,15	1580,9	1302,6	1596,9	17,774	6,6135
1210	1483,15	1594,2	1314,0	1674,6	17,064	6,6225
1220	1493,15	1607,5	1325,4	1755,7	16,386	6,6314
1230	1503,15	1620,8	1336,8	1840,1	15,739	6,6403
1240	1513,15	1634,1	1348,2	1928,2	15,120	6,6491

Продолжение табл. 16

t	T	h	u	π_0	θ_0	s^0
°C	К	кДж/кг				кДж/(кг·К)
1250	1523,15	1647,4	1359,7	2020	14,530	6,6579
1260	1533,15	1660,7	1371,1	2115	13,964	6,6666
1270	1543,15	1674,1	1382,6	2215	13,424	6,6753
1280	1553,15	1687,4	1394,0	2318	12,908	6,6840
1290	1563,15	1700,8	1405,5	2426	12,414	6,6926
1300	1573,15	1714,2	1417,0	2538	11,942	6,7011
1310	1583,15	1727,6	1428,5	2655	11,489	6,7095
1320	1593,15	1741,0	1440,0	2776	11,057	6,7180
1330	1603,15	1754,4	1451,6	2902	10,642	6,7264
1340	1613,15	1767,9	1463,1	3034	10,245	6,7348
1350	1623,15	1781,3	1474,7	3170	9,865	6,7430
1360	1633,15	1794,8	1486,2	3312	9,501	6,7513
1370	1643,15	1808,2	1497,8	3459	9,153	6,7595
1380	1653,15	1821,7	1509,4	3612	8,818	6,7677
1390	1663,15	1835,2	1521,0	3771	8,498	6,7759
1400	1673,15	1848,7	1532,6	3936	8,190	6,7840
1410	1683,15	1862,2	1544,2	4107	7,896	6,7920
1420	1693,15	1875,7	1555,9	4285	7,613	6,8000
1430	1703,15	1779,3	1567,5	4470	7,342	6,8080
1440	1713,15	1902,8	1579,1	4661	7,082	6,8159
1450	1723,15	1916,3	1590,8	4860	6,832	6,8238
1460	1733,15	1929,9	1602,4	5066	6,592	8,8321
1470	1743,15	1943,5	1614,1	5280	6,363	6,8398
1480	1753,15	1957,0	1625,8	5502	6,142	6,8476
1490	1763,15	1970,6	1637,5	5732	5,930	6,8553
1500	1773,15	1984,2	1649,2	5971	5,726	6,8630

Таблица 17

Термодинамические функции водорода по С. Л. Ривкину

t	T	h	u	π_0	θ_0	s^0
°C	К	кДж/кг				кДж/(кг·К)
—50	223,15	3143	2223	2,4622	38 124	60,694
—40	233,15	3282	2320	2,8529	34 377	61,302
—30	243,15	3421	2418	3,2884	31 104	61,888
—20	253,15	3561	2518	3,7715	28 324	62,453
—10	263,15	3702	2617	4,3056	25 709	62,999
0	273,15	3844	2718	4,8938	23 479	63,527
10	283,15	3986	2819	5,5393	21 502	64,038
20	293,15	4129	2920	6,2454	19 744	64,533
30	303,15	4272	3021	7,0154	18 178	65,013
40	313,15	4415	3123	7,8527	16 774	65,478
50	323,15	4559	3226	8,7603	15 517	65,929
60	333,15	4702	3328	9,7419	14 385	66,367

Продолжение табл. 17

t	T	h	u	π_θ	θ_a	s^o
°C	K	кДж/кг				кДж/(кг·К)
70	343,15	4846	3431	10,801	13 364	66,792
80	353,15	4990	3534	11,491	12 441	67,206
90	363,15	5134	3637	13,165	11 603	67,609
100	373,15	5279	3740	14,478	10 841	68,001
110	383,15	5423	3843	15,883	10 148	68,383
120	393,15	5568	3946	17,382	9513,8	68,755
130	403,15	5712	4049	18,982	8933,4	69,118
140	413,15	5857	4153	20,69	8401,2	69,472
150	423,15	6001	4256	22,50	7911,9	69,818
160	433,15	6146	4360	24,42	7461,5	70,157
170	443,15	6291	4464	26,46	7046,0	70,487
180	453,15	6436	4567	28,61	6661,7	70,810
190	463,15	6581	4671	30,89	6306,0	71,127
200	473,15	6726	4774	33,30	5976,1	71,436
210	483,15	6871	4878	35,84	5669,8	71,740
220	493,15	7016	4982	38,52	5385,1	72,036
230	503,15	7161	5086	41,34	5119,5	72,328
240	513,15	7306	5190	44,30	4872,1	72,613
250	523,15	7451	5293	47,42	4641,0	72,893
260	533,15	7596	5397	50,68	4424,7	73,168
270	543,15	7741	5501	54,11	4222,3	73,438
280	553,15	7887	5605	57,70	4032,4	73,703
290	563,15	8032	5710	61,46	3854,3	73,963
300	573,15	8177	5813	65,39	3686,9	74,219
310	583,15	8323	5918	69,50	3529,4	74,470
320	593,15	8468	6021	73,80	3381,1	74,718
330	603,15	8614	6126	78,27	3241,3	74,960
340	613,15	8759	6230	82,95	3109,4	75,199
350	623,15	8904	6334	87,82	2984,8	75,435
360	633,15	9050	6438	92,89	2867,0	75,667
370	643,15	9195	6543	98,18	2755,6	75,895
380	653,15	9341	6647	103,68	2650,0	76,120
390	663,15	9487	6752	109,39	2550,0	76,341
400	673,15	9633	6856	115,33	2455,2	76,559
410	683,15	9778	6961	121,50	2365,1	76,774
420	693,15	9424	7066	127,91	2279,4	76,986
430	703,15	10 070	7170	134,57	2198,0	77,195
440	713,15	10 216	7275	141,47	2120,4	77,401
450	723,15	10 362	7380	148,62	2046,6	77,605
460	733,15	10 508	7485	156,04	1976,4	77,806
470	743,15	10 655	7590	163,72	1909,4	78,004
480	753,15	10 801	7695	171,67	1845,4	78,199
490	763,15	10 948	7800	179,90	1784,4	78,393
500	773,15	11 094	7906	188,42	1726,1	78,583
510	783,15	11 241	8011	197,22	1670,3	78,772

Продолжение табл.

t	T	h	u	π_0	θ_0	δ_0
°C	К	кДж/кг				кДж/(кг
520	793,15	11 388	8117	206,33	1617,0	78,95
530	803,15	11 534	8222	215,74	1565,9	79,14
540	813,15	11 681	8328	225,47	1517,0	79,32
550	823,15	11 829	8433	235,51	1470,2	79,50
560	833,15	11 976	8539	245,89	1425,3	79,68
570	843,15	12 123	8646	256,59	1382,2	79,85
580	853,15	12 270	8752	267,64	1340,8	80,03
590	863,15	12 418	8858	279,04	1301,2	80,20
600	873,15	12 566	8964	290,79	1263,0	80,37
610	883,15	12 714	9071	302,90	1226,4	80,54
620	893,15	12 861	9178	315,40	1191,1	80,70
630	903,15	13 010	9285	328,26	1157,3	80,87
640	913,15	13 158	9392	341,52	1124,7	81,03
650	923,15	13 306	9499	355,18	1093,3	81,19
660	933,15	13 455	9607	369,23	1063,0	81,35
670	943,15	13 604	9714	383,72	1033,9	81,51
680	953,15	13 753	9822	398,62	1005,80	81,67
690	963,15	13 902	9929	413,94	978,74	81,83
700	973,15	14 051	10 038	429,72	952,59	81,98
710	983,15	14 201	10 146	445,94	927,36	82,13
720	993,15	14 350	10 254	462,61	903,04	82,28
730	1003,15	14 500	10 363	479,76	879,53	82,43
740	1013,15	14 650	10 472	497,37	856,84	82,58
750	1023,15	14 800	10 580	515,49	834,89	82,73
760	1033,15	14 951	10 690	534,09	812,69	82,88
770	1043,15	15 101	10 799	553,20	793,18	83,02
780	1053,15	15 252	10 908	572,83	773,34	83,17
790	1063,15	15 403	11 018	592,98	754,16	83,31
800	1073,15	15 554	11 128	613,67	735,58	83,45
810	1083,15	15 705	11 238	634,92	717,59	83,59
820	1093,15	15 857	11 348	656,71	700,19	83,73
830	1103,15	16 008	11 458	679,08	683,32	83,87
840	1113,15	16 160	11 569	702,03	666,97	84,00
850	1123,15	16 312	11 680	725,57	651,13	84,14
860	1133,15	16 465	11 791	749,70	635,77	84,27
870	1143,15	16 617	11 902	774,46	620,88	84,41
880	1153,15	16 770	12 014	799,89	606,45	84,54
890	1163,15	16 923	12 125	825,85	592,44	84,67
900	1173,15	17 075	12 237	852,51	578,84	84,80
910	1183,15	17 229	12 349	879,84	565,65	84,93
920	1193,15	17 382	12 462	907,83	552,84	85,06
930	1203,15	17 536	12 574	936,51	540,40	85,19
940	1213,15	17 690	12 687	965,88	528,32	85,32
950	1223,15	17 844	12 799	995,95	516,59	85,45
960	1233,15	17 988	12 913	1026,7	505,20	85,57

t	T	h	u	π_0	θ_0	s
°C	K	кДж/кг				кДж/(кг·К)
970	1243,15	18 153	13 026	1058,3	494,08	85,701
980	1253,15	18 308	13 139	1090,6	483,30	85,825
990	1263,15	18 463	13 253	1123,6	472,86	85,948
1000	1273,15	18 618	13 367	1157,5	462,66	86,071
1010	1283,15	18 773	13 481	1192,2	452,74	86,192
1020	1293,15	18 929	13 595	1227,5	443,10	86,313
1030	1303,15	19 084	13 710	1263,6	433,75	86,433
1040	1313,15	19 240	13 824	1300,8	424,63	86,552
1050	1323,15	19 397	13 940	1338,8	415,73	86,671
1060	1333,15	19 553	14 055	1377,5	407,08	86,788
1070	1343,15	19 709	14 170	1417,1	398,68	86,905
1080	1353,15	19 866	14 285	1457,7	390,47	87,021
1090	1363,15	20 023	14 401	1499,2	382,47	87,137
1100	1373,15	20 180	14 517	1541,5	374,70	87,252
1110	1383,15	20 338	14 633	1584,8	367,11	87,366
1120	1393,15	20 496	14 750	1629,0	359,72	87,480
1130	1403,15	20 653	14 866	1674,2	352,52	87,593
1140	1413,15	20 811	14 983	1720,4	345,5	87,705
1150	1423,15	20 970	15 101	1767,6	338,6	87,816
1160	1433,15	21 128	15 218	1815,9	331,9	87,927
1170	1443,15	21 287	15 335	1865,1	325,4	88,038
1180	1453,15	21 446	15 453	1915,4	319,1	88,148
1190	1463,15	21 605	15 571	1966,8	312,9	88,257
1200	1473,15	21 675	15 689	2019,2	306,8	88,365
1210	1483,15	21 924	15 807	2072,8	300,9	88,473
1220	1493,15	22 084	15 926	2127,5	295,2	88,581
1230	1503,15	22 244	16 045	2183,3	289,5	88,688
1240	1513,15	22 404	16 164	2240,3	284,1	88,794
1250	1523,15	22 565	16 283	2298,5	278,7	88,900
1260	1533,15	22 726	16 403	2357,9	273,5	89,005
1270	1543,15	22 886	16 522	2418,4	268,4	89,109
1280	1553,15	23 047	16 642	2480,3	263,3	89,214
1290	1563,15	23 209	16 762	2543,4	258,5	89,317
1300	1573,15	23 371	16 882	2607,7	253,7	89,420
1310	1583,15	23 532	17 003	2673,0	249,1	89,523
1320	1593,15	23 694	17 124	2740,3	244,5	89,625
1330	1603,15	23 586	17 245	2808,5	240,1	89,726
1340	1613,15	24 019	17 366	2878,1	235,7	89,827
1350	1623,15	26 181	17 487	2949,1	231,5	89,927
1360	1633,15	24 344	17 609	3021,5	277,3	90,028
1370	1643,15	24 507	17 731	3095,3	223,2	90,127
1380	1653,15	24 671	17 853	3170,5	219,3	90,226
1390	1663,15	24 834	17 975	3247,2	215,4	90,325
1400	1673,15	24 998	18 097	3325,4	211,6	90,423
1410	1683,15	25 161	18 220	3405,1	207,9	90,520

t	T	h	u	π_0	θ_0	s^0
°C	K	кДж/кг				кДж/(кг·К)
1420	1693,15	25 326	18 343	3486,2	204,2	90,618
1430	1703,15	25 490	18 466	3569,0	200,7	90,715
1440	1713,15	25 654	18 589	3653,3	197,2	90,811
1450	1723,15	25 819	18 712	3739,2	193,8	90,906
1460	1733,15	25 984	18 836	3826,7	190,5	91,002
1470	1743,15	26 149	18 960	3915,9	187,2	91,097
1480	1753,15	26 397	19 146	4052,7	182,4	91,239
1490	1763,15	26 480	19 208	4099,2	180,9	91,286
1500	1773,15	26 646	19 333	4193,3	177,8	91,379

Таблица 18

Термодинамические функции водяного пара по С. Л. Ривкину

t	T	h	u	π_0	θ_0	s^0
°C	K	кДж/кг				кДж/(кг·К)
—50	223,15	410,2	307,2	0,22450	46 780	9,9371
—40	233,15	428,7	321,1	0,26767	40 998	10,0182
—30	243,15	447,2	335,0	0,31682	36 121	10,0960
—20	253,15	465,7	348,9	0,37250	31 987	10,1707
—10	263,15	484,3	362,9	0,43527	28 456	10,2426
0	273,15	502,9	376,8	0,50574	25 422	10,3118
10	283,15	521,5	390,8	0,58453	22 800	10,3787
20	293,15	540,0	404,8	0,67232	20 523	10,4433
30	303,15	558,7	418,8	0,76980	18 535	10,5057
40	313,15	577,4	432,8	0,87769	16 793	10,5663
50	323,15	596,0	446,9	0,99679	15 259	10,6250
60	333,15	614,7	461,0	1,1279	13 902	10,6820
70	343,15	633,5	475,1	1,2718	12 700	10,7375
80	353,15	652,3	489,3	1,4295	11 628	10,7914
90	363,15	671,1	503,5	1,6019	10 670	10,8439
100	373,15	689,9	517,7	1,7901	9811	10,8952
110	383,15	708,9	532,0	1,9949	9040	10,9452
120	393,15	727,8	546,3	2,218	8345	10,9940
130	403,15	746,8	560,7	2,459	7717	11,0417
140	413,15	765,8	575,2	2,721	7148	11,0884
150	423,15	784,9	589,6	3,004	6631	11,1340
160	433,15	804,1	604 2	3,309	6161	11,1787
170	443,15	823,2	618,7	3,639	5732	11,2225
180	453,15	842,5	633,4	3,994	5341	11,2655
190	463,15	861,8	648,1	4,375	4983	11,3076
200	473,15	881,1	662,8	4,785	4654	11,3490
210	483,15	900,6	677,6	5,225	4352	11,3896
220	493,15	920,0	692,4	5,697	4074	11,4294
230	503,15	939,6	707,3	6,202	3818	11,4686
240	513,15	959,1	722,3	6,742	3582	11,5072

t	T	h	u	π_0	θ_0	s^0
°C	K	кДж/кг				кДж/(кг·К)
250	523,15	978,8	737,4	7,320	3364	11,5451
260	533,15	998,5	752,5	7,936	3162	11,5825
270	543,15	1018,3	767,6	8,594	2975	11,6192
280	553,15	1038,1	782,8	9,295	2801	11,6554
290	563,15	1058,0	798,1	10,041	2640	11,6910
300	573,15	1078,0	813,4	10,835	2490	11,7261
310	583,15	1098,0	828,8	11,679	2350	11,7608
320	593,15	1118,1	844,3	12,576	2219	11,7949
330	603,15	1138,2	859,9	13,529	2098	11,8286
340	613,15	1158,4	875,5	14,539	1984,9	11,8618
350	623,15	1178,7	891,1	15,610	1878,9	11,8946
360	633,15	1199,0	906,9	16,745	1779,7	11,9271
370	643,15	1219,5	922,6	17,947	1686,7	11,9590
380	653,15	1240,0	938,5	19,218	1599,6	11,9906
390	663,15	1260,5	954,5	20,560	1517,9	12,0218
400	673,15	1281,1	970,4	21,983	1441,2	12,0527
410	683,15	1301,8	986,5	23,485	1369,1	12,9831
420	693,15	1322,5	1002,6	25,070	1301,3	12,1133
430	703,15	1343,3	1018,8	26,743	1237,5	12,1431
440	713,15	1364,2	1035,1	28,507	1177,5	12,1726
450	723,15	1385,2	1051,4	30,366	1120,9	12,2018
460	733,15	1406,1	1067,8	32,325	1067,5	12,2306
470	743,15	1427,2	1084,2	34,389	1017,1	12,2591
480	753,15	1448,4	1100,8	36,561	969,6	12,2874
490	763,15	1469,6	1117,4	38,846	924,6	12,3154
500	773,15	1490,9	1134,0	41,249	882,2	12,3431
510	783,15	1512,2	1150,8	43,776	842,0	12,3705
520	793,15	1533,6	1167,6	46,431	804,0	12,3977
530	803,15	1555,1	1184,5	49,220	768,0	12,4246
540	813,15	1576,7	1201,4	52,149	733,9	12,4513
550	823,15	1598,3	1218,4	55,224	701,6	12,4777
560	833,15	1620,0	1235,5	58,450	670,9	12,5040
570	843,15	1641,8	1252,6	61,834	641,8	12,5299
580	853,15	1663,6	1269,6	65,382	614,2	12,5557
590	863,15	1685,5	1287,2	69,102	587,9	12,5812
600	873,15	1707,5	1304,6	72,999	563,0	12,6065
610	883,15	1729,6	1322,0	77,081	539,3	12,6317
620	893,15	1751,7	1339,5	81,356	516,7	12,6566
630	903,15	1773,9	1357,1	85,831	495,3	12,6813
640	913,15	1796,2	1374,7	90,514	474,8	12,7058
650	923,15	1818,5	1392,4	95,414	455,4	12,7301
660	933,15	1840,9	1410,2	100,54	436,8	12,7542
670	943,15	1863,4	1428,1	105,89	419,2	12,7782
680	953,15	1885,9	1446,0	111,49	402,4	12,8020
690	963,15	1908,15	1464,1	117,35	386,3	12,8256

t	T	h	u	π_0	θ_0	s^0
°C	K	кДж/кг				кДж/(кг·К)
700	973,15	1931,2	1482,2	123,47	371,0	12,8491
710	983,15	1954,0	1500,3	129,85	356,4	12,8724
720	993,15	1976,9	1518,5	136,52	342,4	12,8955
730	1003,15	1999,8	1536,8	143,48	329,1	12,9184
740	1013,15	2022,8	1555,2	150,75	316,3	12,9412
750	1023,15	2045,8	1573,6	158,33	304,2	12,9638
760	1033,15	2068,9	1592,1	166,24	292,5	12,9864
770	1043,15	2092,1	1610,7	174,49	281,4	13,0087
780	1053,15	2115,4	1629,4	183,09	270,7	13,0309
790	1063,15	2138,7	1648,1	192,05	260,6	13,0529
800	1073,15	2162,2	1666,9	201,4	250,8	13,0749
810	1083,15	2185,6	1685,8	211,1	241,5	13,0966
820	1093,15	2209,2	1704,7	221,3	232,5	13,1183
830	1103,15	2232,8	1723,7	231,8	224,0	13,1398
840	1113,15	2256,5	1742,8	242,8	215,8	13,1612
850	1123,15	2280,2	1761,9	254,2	207,9	13,1824
860	1133,15	2304,1	1781,1	266,2	200,4	13,2035
870	1143,15	2328,0	1800,4	278,5	193,16	13,2245
880	1153,15	2351,9	1819,7	291,4	186,24	13,2454
890	1163,15	2376,0	1839,2	304,8	179,59	13,2662
900	1173,15	2400,1	1858,6	318,8	173,22	13,2868
910	1183,15	2424,2	1878,2	333,2	167,10	13,3073
920	1193,15	2448,5	1897,8	348,3	161,23	13,3277
930	1203,15	2472,8	1917,5	364,0	155,59	13,3480
940	1213,15	2497,1	1937,3	380,2	150,18	13,3682
950	1223,15	2521,6	1957,1	397,1	144,97	13,3882
960	1233,15	2546,1	1977,0	414,6	139,98	13,4081
970	1243,15	2570,6	1996,9	432,9	135,18	13,4280
980	1253,15	2595,3	2016,9	451,8	130,56	13,4477
990	1263,15	2620,0	2037,0	471,4	126,12	13,4673
1000	1273,15	2644,8	2057,1	491,8	121,85	13,4869
1010	1283,15	2669,6	2077,1	512,9	117,75	13,5065
1020	1293,15	2694,5	2097,5	534,8	113,79	13,5256
1030	1303,15	2719,5	2118,0	557,6	110,00	13,5448
1040	1313,15	2744,5	2138,5	581,2	106,34	13,5640
1050	1323,15	2769,6	2159,0	605,6	102,83	13,5830
1060	1333,15	2794,7	2179,5	631,0	99,44	13,6019
1070	1343,15	2819,9	2200,0	657,3	96,18	13,6207
1080	1353,15	2845,2	2220,7	684,5	93,04	13,6395
1090	1363,15	2870,5	2241,4	712,8	90,02	13,6580
1100	1373,15	2895,9	2262,2	742,0	87,10	13,6767
1110	1383,15	2921,3	2283,0	772,3	84,29	13,6952
1120	1393,15	2946,8	2303,9	803,7	81,59	13,7135
1130	1403,15	2972,4	2324,8	836,1	78,98	13,7318
1140	1413,15	2998,0	2345,8	869,8	76,47	13,7500

Продолжение табл. 18

t	T	h	u	π_θ	θ_0	s^0
°C	K	кДж/кг				кДж/(кг·К)
1150	1423,15	3023,7	2366,8	904,6	74,05	13,7682
1160	1433,15	3049,5	2388,1	940,6	71,71	13,7862
1170	1443,15	3075,3	2409,2	977,9	69,46	13,8041
1180	1453,17	3101,1	2430,5	1016,5	67,28	13,8220
1190	1463,15	3127,0	2451,8	1056,4	65,19	13,8398
1200	1473,15	2152,9	2473,1	1097,1	63,16	13,8574
1210	1483,15	3179,1	2494,5	1140,4	61,21	13,8751
1220	1493,15	3205,2	2516,0	1184,5	59,33	13,8926
1230	1503,15	3131,3	2537,6	1230,2	57,51	13,9101
1240	1513,15	3257,5	2559,2	1277,4	55,75	13,9274
1250	1523,15	3283,7	2580,8	1326,1	54,06	13,9447
1260	1533,15	3310,0	2602,5	1376,5	52,42	13,9619
1270	1543,15	3336,4	2624,2	1428,6	50,84	13,9790
1280	1553,15	3362,8	2646,0	1482,4	49,31	13,9961
1290	1563,15	3389,3	2667,8	1538,0	47,84	14,0131
1300	1573,15	3415,8	2689,6	1595,4	46,41	14,0300
1310	1583,15	3442,3	2711,5	1654,6	45,03	14,0468
1320	1593,15	3469,0	2733,7	1715,8	43,70	14,0636
1330	1603,15	3495,6	2766,9	1779,0	42,41	14,0803
1340	1613,15	3522,4	2777,9	1844,3	41,17	14,0969
1350	1623,15	3549,1	2800,1	1911,5	39,97	14,1134
1360	1633,15	3575,9	2822,2	1981	38,80	14,1299
1370	1643,15	3602,8	2844,5	2053	37,68	14,1463
1380	1653,15	3629,7	2866,8	2127	36,59	14,1626
1390	1663,15	3656,7	2889,1	2203	35,53	14,1789
1400	1673,15	3683,7	2911,5	2282	34,52	14,1951
1410	1683,15	3710,8	2934,0	2363	33,53	14,2112
1420	1693,15	2737,9	2956,5	2446	32,58	14,2273
1430	1703,15	3765,1	2979,0	2533	31,65	14,2433
1440	1713,15	3792,2	3001,6	2622	30,76	14,2592
1450	1723,15	3819,5	3024,2	2713	29,89	14,2750
1460	1733,15	3846,8	3046,9	2808	29,05	14,2908
1470	1734,15	3874,1	3069,6	2905	28,24	14,3066
1480	1743,15	3901,5	3092,4	3005	27,46	14,3222
1490	1753,15	3928,9	3115,2	3109	26,70	14,3378
1500	1763,15	3956,4	3138,1	3215	25,95	14,3534

Таблица 19

Термодинамические функции окиси углерода по С. Л. Ривкину

t	T	h	u	π_0	θ_0	s^0
°C	K	кДж/кг				кДж/(кг·К)
—50	223,15	231,6	165,3	0,78813	8,572	6,7643
—40	233,15	242,0	172,7	0,91881	7,682	6,8098
—30	243,15	252,3	180,2	1,0643	6,916	6,8535

t	T	h	u	ε_0	θ_0	s°
°C	K	кДж/кг				кДж/(кг·К)
—20	253,15	262,7	187,6	1,2256	6,253	6,8953
—10	263,15	273,1	195,0	1,4036	5676	6,9356
0	273,15	283,5	202,4	1,5993	5171	6,9743
10	283,15	293,9	209,9	1,8140	4726	7,0117
20	293,15	304,3	217,3	2,0484	4333	7,0478
30	303,15	314,7	224,7	2,3038	3984	7,0827
40	313,15	325,1	232,2	2,5813	3673	7,1164
50	323,15	335,5	239,6	2,8820	3394	7,1491
60	333,15	345,9	247,1	3,2072	3145	7,1809
70	343,15	356,3	254,5	3,5579	2920	7,2117
80	353,15	366,8	262,0	3,9356	2716	7,2416
90	363,15	377,2	269,4	4,3413	2532	7,2708
100	373,15	387,7	276,9	4,7765	2365	7,2991
110	383,15	398,1	284,4	5,2425	2213	7,3267
120	393,15	408,5	291,9	5,7405	2073	7,3537
130	403,15	419,0	299,4	6,2723	1945,8	7,3800
140	413,15	429,5	306,9	6,8392	1828,8	7,4056
150	423,15	440,0	314,4	7,4427	1721,2	7,4308
160	433,15	450,5	322,0	8,0845	1622,0	7,4553
170	443,15	461,0	329,5	8,7660	1530,4	7,4793
180	453,15	471,6	337,1	9,4890	1445,7	7,5029
190	463,15	482,1	344,7	10,255	1367,3	7,5259
200	473,15	492,7	352,3	11,067	1294,3	7,5485
210	483,15	503,3	359,9	11,924	1226,7	7,5706
220	493,15	513,9	367,6	12,830	1163,6	7,5924
230	503,15	524,6	375,2	13,787	1104,8	7,6138
240	513,15	535,2	382,9	14,796	1050,0	7,6348
250	523,15	545,9	390,6	15,861	998,5	7,6553
260	533,15	556,6	398,3	16,981	950,5	7,6756
270	543,15	567,3	406,0	18,159	905,5	7,6955
280	553,15	578,1	413,9	19,399	863,2	7,7151
290	563,15	588,8	421,7	20,702	823,5	7,7344
300	573,15	599,6	429,5	22,070	786,2	7,7534
310	583,15	610,4	437,3	23,506	751,0	7,7721
320	593,15	621,3	445,2	25,012	717,9	7,7905
330	603,15	632,2	453,1	26,590	686,7	7,8087
340	613,15	643,0	461,0	28,244	657,2	7,8266
350	623,15	654,0	469,0	29,975	629,4	7,8443
360	633,15	664,9	477,0	31,787	603,0	7,8617
370	643,15	675,9	485,0	33,682	578,1	7,8789
380	653,15	686,9	493,0	35,663	554,4	7,8959
390	663,15	697,9	501,0	37,732	532,1	7,9126
400	673,15	708,9	509,1	39,894	510,8	7,9291
410	683,15	720,0	517,2	42,149	490,7	7,9455
420	693,15	731,1	525,3	44,503	471,5	7,9616

t	T	h	u	τ_0	θ_0	s°
°C	K	кДж/кг				кДж/(кг·К)
430	703,15	742,2	533,5	46,957	453,3	7,9775
440	713,15	753,4	541,7	49,516	436,0	7,9933
450	723,15	764,5	549,9	52,182	419,5	8,0088
460	733,15	775,8	558,1	54,957	403,9	8,0242
470	743,15	787,0	566,4	57,848	388,9	8,0394
480	753,15	798,2	574,7	60,856	374,7	8,0545
490	763,15	809,6	583,0	63,986	361,1	8,0694
500	773,15	820,9	591,3	67,240	348,1	8,0841
510	783,15	832,2	599,7	70,622	335,7	8,0987
520	793,15	843,6	608,1	74,137	323,9	8,1131
530	803,15	854,9	616,5	77,787	312,5	8,1274
540	813,15	866,4	625,0	81,577	301,76	8,1415
550	823,15	877,8	633,5	85,511	291,42	8,1555
560	833,15	889,2	642,0	89,594	281,52	8,1693
570	843,15	900,7	650,5	93,826	272,05	8,1830
580	853,15	912,3	659,0	98,216	262,97	8,1966
590	863,15	923,8	667,6	102,77	254,26	8,2100
600	873,15	935,8	676,2	107,48	245,92	8,2233
610	883,15	946,9	684,8	112,37	237,93	8,2365
620	893,15	958,5	693,4	117,42	230,27	8,2496
630	903,15	970,2	702,1	122,66	222,90	8,2626
640	913,15	981,8	710,7	128,08	215,83	8,2754
650	923,15	993,5	719,5	133,68	209,06	8,2881
660	933,15	1005,2	728,2	139,48	202,53	3,3007
670	943,15	1016,9	737,0	145,48	196,26	8,3132
680	953,15	1028,7	745,8	151,68	190,24	8,3256
690	963,15	1040,4	754,5	158,08	184,45	8,3378
700	973,15	1052,2	763,3	164,70	178,87	8,3500
710	983,15	1064,0	772,2	171,53	173,52	8,3621
720	993,15	1075,8	781,0	178,59	168,35	8,3741
730	1003,15	1087,7	789,9	185,88	163,38	8,3859
740	1013,15	1099,5	798,8	193,39	158,60	8,3977
750	1023,15	1111,4	807,7	201,15	153,99	8,4094
760	1033,15	1123,4	816,7	209,15	149,54	8,4210
770	1043,15	1135,2	825,6	217,41	145,25	8,4325
780	1053,15	1147,2	834,6	225,92	141,12	8,4438
790	1063,15	1159,1	843,6	234,68	134,14	8,4552
800	1073,15	1171,2	852,6	243,72	133,30	8,4664
810	1083,15	1183,1	861,6	253,04	129,59	8,4775
820	1093,15	1195,2	870,7	262,63	126,01	8,4885
830	1103,15	1207,2	879,8	272,51	122,55	8,4995
840	1113,15	1219,3	888,9	282,68	119,20	8,5104
850	1123,15	1231,3	897,9	293,15	115,99	8,5212
860	1133,15	1243,4	907,1	303,93	112,87	8,5319
870	1143,15	1255,5	916,2	315,02	109,86	8,5425

t	T	h	u	τ_0	Θ_0	s^0
°C	K	кДж/кг				кДж/(кг·
880	1153,15	1267,7	925,4	326,42	106,95	8,5531
890	1163,15	1279,8	934,5	338,15	104,13	8,5636
900	1173,15	1292,0	943,7	250,22	101,41	8,5740
910	1183,15	1304,1	952,9	362,63	98,77	8,5843
920	1193,15	1316,3	962,2	375,38	96,22	8,5946
930	1203,15	1328,5	971,4	388,49	93,76	8,6047
940	1213,15	1340,7	980,6	401,95	91,37	8,6149
950	1223,15	1353,0	989,9	415,79	89,06	8,6249
960	1233,15	1365,2	999,2	430,0	86,82	8,6349
970	1243,15	1377,5	1008,5	444,59	84,65	8,6448
980	1253,15	1389,8	1017,7	459,56	82,55	8,6546
990	1263,15	1402,1	1027,1	474,94	80,52	8,6644
1000	1273,15	1414,3	1036,4	490,72	78,54	8,6741
1010	1283,15	1426,7	1045,8	506,91	76,63	8,6838
1020	1293,15	1439,0	1055,2	523,52	74,78	8,6933
1030	1303,15	1451,4	1064,5	540,57	72,98	8,7028
1040	1313,15	1463,7	1073,9	558,05	71,24	8,7123
1050	1323,15	1476,1	1083,3	575,98	69,54	8,7216
1060	1333,15	1488,4	1092,8	594,35	67,90	8,7310
1070	1343,15	1500,9	1102,2	613,20	66,31	8,7402
1080	1353,15	1513,3	1111,6	632,51	64,76	8,7494
1090	1363,15	1525,7	1121,1	652,30	63,26	8,7586
1100	1373,15	1538,1	1130,5	672,58	61,81	8,7677
1110	1383,15	1550,6	1140,0	693,35	60,39	8,7767
1120	1393,15	1563,0	1149,5	714,64	59,02	8,7857
1130	1403,15	1575,5	1159,0	536,43	57,68	8,7946
1140	1413,15	1588,0	1168,5	758,74	56,38	8,8035
1150	1423,15	1600,5	1178,0	781,60	55,12	8,8123
1160	1433,15	1613,0	1187,5	805,00	53,90	8,8210
1170	1443,15	1625,5	1197,1	828,94	52,70	8,8297
1180	1453,15	1638,0	1206,8	853,45	51,55	8,8384
1190	1463,15	1650,6	1216,2	878,54	50,418	8,8470
1200	1473,15	1663,1	1225,8	904,18	49,323	8,8555
1210	1483,15	1675,6	1235,4	930,43	48,257	8,8640
1220	1493,15	1688,2	1245,0	957,28	47,220	8,8725
1230	1503,15	1700,8	1254,6	984,74	46,210	8,8809
1240	1513,15	1713,4	1264,2	1012,8	45,227	8,8892
1250	1523,15	1726,0	1273,8	1041,5	44,273	8,8975
1260	1533,15	1738,6	1283,5	1070,9	43,341	8,9057
1270	1543,15	1751,2	1293,1	1100,8	42,438	8,9139
1280	1553,15	1763,8	1302,8	1131,5	41,554	8,9221
1290	1563,15	1776,4	1312,4	1162,9	40,693	8,9302
1300	1573,15	1789,0	1322,1	1194,9	39,856	8,9383

Продолжение табл. 19

t	T	h	u	π_0	θ_0	s^0
°C	К	кДж/кг				кДж/(кг·К)
1310	1583,15	1801,7	1331,7	1227,5	39,044	8,9463
1320	1593,15	1814,3	1341,4	1260,9	38,250	8,9543
1330	1603,15	1827,0	1351,1	1295,1	37,476	8,9622
1340	1613,15	1839,7	1360,8	1329,9	36,721	8,9700
1350	1623,15	1852,4	1370,5	1365,5	35,985	8,9779
1360	1633,15	1865,1	1380,3	1401,9	35,267	8,9857
1370	1643,15	1877,7	1390,0	1438,9	34,570	8,9935
1380	1653,15	1890,5	1399,7	1476,8	33,888	9,0012
1390	1663,15	1903,1	1409,5	1515,5	33,223	9,0088
1400	1673,15	1915,9	1419,2	1554,9	32,575	9,0164
1410	1683,15	1928,6	1429,0	1595,2	31,942	9,0240
1420	1693,15	1941,4	1438,8	1636,2	31,327	9,0316
1430	1703,15	1954,1	1448,5	1678,1	30,725	9,0391
1440	1713,15	1966,9	1458,3	1720,8	30,137	9,0465
1450	1723,15	1979,6	1468,1	1764,5	29,564	9,0540
1460	1733,15	1992,4	1477,9	1808,9	29,005	9,0614
1470	1743,15	2005,1	1487,7	1854,3	28,458	9,0687
1480	1753,15	2018,0	1497,5	1900,5	27,926	9,0760
1490	1763,15	2030,7	1507,4	1947,6	27,406	9,0833
1500	1773,15	2043,5	1517,2	1995,7	26,897	9,0905

Таблица 20

Термодинамические функции по [6]. Сероводород H_2S

t	T	c_p	c_v	u	h	s	s_v
°C	К	кДж/(кг·К)		кДж/кг		кДж/(кг·К)	
0	273,15	0,991	0,747	—66,63	0	0	0
100	373,15	1,025	0,780	9,68	100,7	0,3084	0,2323
200	473,15	1,069	0,824	89,96	205,4	0,5566	0,4226
300	573,15	1,120	0,876	174,9	314,7	0,7652	0,5844
400	673,15	1,173	0,929	265,2	429,5	0,9495	0,7295
500	773,15	1,225	0,980	360,5	549,1	1,1167	0,8629
600	873,15	1,274	1,030	461,4	574,4	1,2690	0,9855
700	973,15	1,321	1,076	566,6	804,0	1,4090	1,0991
800	1073,15	1,361	1,117	676,7	938,15	1,5404	1,2066
900	1173,15	1,398	1,153	789,6	1075,8	1,6633	1,3078
1000	1273,15	1,431	1,187	906,8	1217,4	1,7787	1,4032
1100	1373,15	1,459	1,215	1027,1	1362,1	1,8881	1,4942
1200	1473,15	1,484	1,239	1148,7	1508,0	1,9914	1,5803

Таблица 21

Термодинамические функции по [6]. Сернистый ангидрид SO_2

t	T	c_p	c_v	u	h	s	s_v
°C	K	кДж/(кг·К)		кДж/кг		кДж/(кг·К)	
0	273,15	0,606	0,476	—35,45	0	0	0
100	373,15	0,662	0,532	15,02	63,45	0,1960	0,1555
200	473,15	0,711	0,581	70,74	132,1	0,3601	0,2888
300	573,15	0,753	0,623	131,1	205,5	0,5000	0,4038
400	673,15	0,784	0,654	195,0	282,3	0,6234	0,5064
500	773,15	0,807	0,677	261,7	362,0	0,7339	0,5989
600	873,15	0,825	0,695	330,2	443,5	0,8332	0,6824
700	973,15	0,839	0,709	400,7	527,0	0,9240	0,7591
800	1073,15	0,850	0,720	471,9	611,2	1,0065	0,8289
900	1173,15	0,859	0,729	544,7	697,0	1,0822	0,8931
1000	1273,15	0,865	0,735	617,7	782,9	1,1529	0,9532
1100	1373,15	0,871	0,741	691,6	869,8	1,2187	1,0091
1200	1473,15	0,875	0,745	765,6	956,7	1,2802	1,0615

Таблица 22

Термодинамические функции по [6]. Сероуглерод CS_2

t	T	c_p	c_v	u	h	s	s_v
°C	K	кДж/(кг·К)		кДж/кг		кДж/(кг·К)	
0	273,15	0,585	0,475	—29,83	0	0	0
100	373,15	0,639	0,530	20,55	61,31	0,1897	0,1556
200	473,15	0,679	0,570	75,69	127,4	0,3470	0,2870
300	573,15	0,708	0,598	134,1	196,6	0,4800	0,3991
400	673,15	0,730	0,620	195,0	268,6	0,5950	0,4965
500	773,15	0,746	0,637	257,9	342,3	0,6978	0,5842
600	873,15	0,759	0,650	322,3	417,7	0,7891	0,6622
700	973,15	0,768	0,659	388,0	494,2	0,8716	0,7329
800	1073,15	0,776	0,666	454,1	571,3	0,9469	0,7975
900	1173,15	0,782	0,672	521,3	649,4	1,0167	0,8576
1000	1273,15	0,787	0,678	588,5	727,5	1,0810	0,9129
1100	1373,15	0,792	0,682	656,7	806,7	1,1411	0,9648
1200	1473,15	0,795	0,686	725,5	886,4	1,1971	1,0131

Таблица 23

Термодинамические функции по [6]. Метан CH_4

t	T	c_p	c_v	u	h	s	s_v
°C	К	кДж/(кг·К)		кДж/кг		кДж/(кг·К)	
0	273,15	2,166	1,647	—141,6	0	0	0
100	373,15	2,449	1,931	36,04	229,5	0,7047	0,5446
200	473,15	2,807	2,289	246,3	491,5	1,3260	1,0439
300	573,15	3,176	2,658	493,6	790,6	1,9002	1,5196
400	673,15	3,530	3,012	777,6	1126,6	2,4406	1,9775
500	773,15	3,856	3,338	1094,6	1495,4	2,9496	2,4154
600	873,15	4,153	3,635	1443,0	1895,6	3,4377	2,8410
700	973,15	4,422	3,904	1820,5	2324,9	3,9023	3,2500
800	1073,15	4,660	4,142	2231,4	2787,7	4,3382	3,6356
900	1173,15	4,873	4,355	2665,1	3273,2	4,7610	4,0127
1000	1273,15	5,062	4,544	3111,8	3771,8	5,1656	4,3753
1100	1373,15	5,227	4,709	3571,6	4283,4	5,5598	4,7306
1200	1473,15	5,368	4,850	4036,6	4800,2	5,9383	5,0730

Таблица 24

Термодинамические функции по [6]. Этан C_2H_6

t	T	c_p	c_v	u	h	s	s_v
°C	К	кДж/(кг·К)		кДж/кг		кДж/(кг·К)	
0	273,15	1,647	1,371	—75,5	0	0	0
100	373,15	2,068	1,791	82,8	186,0	0,5778	0,4916
200	473,15	2,490	2,213	282,8	413,7	1,1167	0,9648
300	573,15	2,870	2,593	522,2	680,7	1,6277	1,4228
400	673,15	3,214	2,937	800,3	986,5	2,1178	1,8684
500	773,15	3,519	3,242	1110,2	1324,0	2,5870	2,2993
600	873,15	3,787	3,510	1447,5	1688,9	3,0312	2,7099
700	973,15	4,022	3,745	1811,1	2080,2	3,4558	3,1045
800	1073,15	4,215	3,939	2197,0	2493,7	3,8554	3,4771
900	1173,15	4,389	4,112	2602,4	2926,7	4,2383	3,8353
1000	1273,15	4,548	4,271	3024,4	3376,5	4,6073	4,1817
1100	1373,15	4,693	4,416	3460,4	3840,1	4,9610	4,5145
1200	1473,15	4,823	4,547	3909,0	4316,3	5,3007	4,8348

Таблица 25

Приведенные плотности веществ

$\tau_{кр}$	Жидкость на линии насыщения				$n=1,0$				$n=2,0$		
	H_2O, $z_{кр}=0,23$	I, $z_{кр}=0,24\div0,26$	II, $z_{кр}=0,26\div0,28$	III, $z_{кр}=0,28\div0,30$	H_2O, $z_{кр}=0,23$	I, $z_{кр}=0,24\div0,26$	II, $z_{кр}=0,26\div0,28$	III, $z_{кр}=0,28\div0,30$	I, $z_{кр}=0,24\div0,26$	II, $z_{кр}=0,26\div0,28$	III, $z_{кр}=0,28\div0,30$
0,30	—	3,487	3,287	3,081	—	3,490	3,290	3,084	3,494	3,294	3,088
0,32	—	3,450	3,253	3,049	—	3,454	3,256	3,052	3,461	3,260	3,056
0,34	—	3,419	3,223	3,021	—	3,423	3,227	3,025	3,427	3,231	3,029
0,36	—	3,383	3,189	2,989	—	3,387	3,193	2,993	3,392	3,198	2,998
0,38	—	3,348	3,156	2,959	—	3,354	3,162	2,964	3,358	3,170	2,970
0,40	—	3,306	3,118	2,922	—	3,313	3,123	2,928	3,322	3,132	2,936
0,42	3,140	3,271	3,084	2,891	3,181	3,278	3,090	2,897	3,287	3,099	2,905
0,44	3,138	3,234	3,049	2,858	3,174	3,239	3,054	2,863	3,251	3,065	2,873
0,46	3,130	3,195	3,012	2,824	3,164	3,203	3,020	2,831	3,215	3,031	2,841
0,48	3,118	3,156	2,975	2,789	3,149	3,165	2,984	2,797	3,177	2,995	2,806
0,50	3,101	3,115	2,937	2,753	3,132	3,126	2,947	2,763	3,136	2,957	2,772
0,52	3,082	3,076	3,900	2,719	3,115	3,088	2,911	2,727	3,099	2,922	2,739
0,54	3,060	3,036	2,862	2,683	3,099	3,050	2,875	2,696	3,063	2,888	2,707
0,56	3,032	2,996	2,825	2,648	3,071	3,012	2,840	2,662	3,028	2,855	2,676
0,58	3,005	2,956	2,787	2,613	3,040	2,974	2,800	2,630	2,990	2,823	2,646
0,60	2,973	2,913	2,746	2,574	3,007	2,932	2,764	2,591	2,952	2,783	2,609
0,61	2,957	2,893	2,727	2,556	2,989	2,913	2,746	2,574	2,936	2,768	2,595
0,62	2,940	2,858	2,704	2,535	2,965	2,888	2,723	2,553	2,916	2,749	2,577
0,63	2,923	2,849	2,686	2,518	2,954	2,868	2,704	2,535	2,897	2,731	2,560
0,64	2,904	2,825	2,663	2,496	2,938	2,845	2,682	2,514	2,877	2,712	0,542
0,65	2,889	2,800	2,640	2,475	2,919	2,824	2,660	2,494	2,852	2,689	2,521

Продолжение табл. 25

$\tau_{кр}$	Жидкость на линии насыщения				$n=1,0$				$n=2,0$		
	H_2O, $z_{кр}=0,23$	I, $z_{кр}=$ $=0,24\div0,26$	II, $z_{кр}=$ $=0,26\div0,28$	III, $z_{кр}=$ $=0,28\div0,30$	H_2O, $z_{кр}=0,23$	I, $z_{кр}=$ $=0,24\div0,28$	II, $z_{кр}=$ $=0,26\div0,28$	III, $z_{кр}=$ $=0,28\div0,30$	I, $z_{кр}=$ $=0,24\div0,26$	II, $z_{кр}=$ $=0,26\div0,28$	III, $z_{кр}=$ $=0,28\div0,30$
0,66	8,868	2,781	2,622	2,458	2,900	2,800	2,640	2,475	2,836	2,674	2,507
0,67	2,848	2,757	2,599	2,436	2,882	2,784	2,625	2,461	2,816	2,655	2,489
0,68	2,827	2,733	2,577	2,416	2,864	2,761	2,603	2,440	2,797	2,637	2,472
0,69	2,810	2,709	2,554	2,394	2,846	2,737	2,580	2,419	2,777	2,618	2,454
0,70	2,785	2,686	2,532	2,374	2,828	2,718	2,562	2,402	2,757	2,599	2,436
0,71	2,768	2,661	2,509	2,352	2,805	2,693	2,539	2,380	2,733	2,577	2,416
0,72	2,741	2,637	2,486	2,330	2,782	2,673	2,520	2,362	2,711	2,555	2,395
0,73	2,717	2,614	2,460	2,310	2,759	2,650	2,498	2,342	2,687	2,533	2,376
0,74	2,693	2,586	2,438	2,285	2,736	2,621	2,471	2,316	2,662	2,512	2,351
0,75	2,667	2,557	2,411	2,260	2,714	2,598	2,449	2,296	2,640	2,490	2,333
0,76	2,643	2,534	2,389	2,240	2,690	2,573	2,426	2,274	2,620	2,473	2,317
0,77	2,617	2,505	2,363	2,215	2,668	2,546	2,400	2,250	2,594	2,445	2,292
0,78	2,593	2,478	2,336	2,190	2,644	2,522	2,378	2,229	2,571	2,423	2,271
0,79	2,566	2,450	2,310	2,168	2,621	2,494	2,351	2,204	2,540	2,400	2,250
0,80	2,535	2,420	2,284	2,145	2,597	2,470	2,329	2,183	2,524	2,377	2,230
0,81	2,502	2,390	2,257	2,121	2,577	2,446	2,306	2,160	2,500	2,354	2,206
0,82	2,478	2,359	2,231	2,096	2,553	2,418	2,280	2,137	2,472	2,330	2,183
0,83	2,442	2,327	2,201	2,070	2,526	2,387	2,250	2,109	2,447	2,306	2,161
0,84	2,407	2,295	2,171	2,044	2,498	2,359	2,224	2,085	2,420	2,281	2,137
0,85	2,370	2,263	2,141	2,014	2,468	2,327	2,194	2,057	2,394	2,256	2,114
0,86	2,340	2,227	2,107	1,984	2,436	2,290	2,161	2,038	2,358	2,231	2,098
0,87	2,297	2,191	2,077	1,957	2,402	2,253	2,131	2,002	2,330	2,204	2,070
0,88	2,256	2,155	2,043	1,925	2,364	2,217	2,098	1,972	2,302	2,177	2,049

Продолжение табл. 25

$\tau_{кр}$	Жидкость на линии насыщения				$\pi=1{,}0$				$\pi=2{,}0$		
	H_2O, $z_{кр}=0{,}23$	I, $z_{кр}=$ $=0{,}24\div0{,}26$	II, $z_{кр}=$ $=0{,}26\div0{,}28$	III, $z_{кр}=$ $=0{,}28\div0{,}30$	H_2O, $z_{кр}=0{,}23$	I, $z_{кр}=$ $=0{,}24\div0{,}26$	II, $z_{кр}=$ $=0{,}26\div0{,}28$	III, $z_{кр}=$ $=0{,}28\div0{,}30$	I, $z_{кр}=$ $=0{,}24\div0{,}26$	II, $z_{кр}=$ $=0{,}26\div0{,}28$	III, $z_{кр}=$ $=0{,}28\div0{,}30$
0,89	2,216	2,116	2,006	1,891	2,324	2,179	2,053	1,941	2,274	2,150	2,022
0,90	2,191	2,076	1,959	1,859	2,285	2,140	2,027	1,911	2,243	2,122	1,998
0,91	2,131	2,032	1,932	1,824	2,232	2,094	1,990	1,877	2,211	2,092	1,970
0,92	2,077	1,989	1,890	1,789	2,174	2,051	1,948	1,843	2,180	2,064	1,943
0,93	2,020	1,940	1,846	1,747	2,113	2,000	1,904	1,802	2,145	2,033	1,913
0,94	1,965	1,888	1,797	1,707	2,057	1,948	1,855	1,762	2,104	2,001	1,887
0,95	1,898	1,829	1,745	1,657	1,994	1,889	1,803	1,713	2,063	1,965	1,856
0,96	1,784	1,765	1,685	1,605	1,920	1,824	1,743	1,661	2,028	1,931	1,825
0,97	1,729	1,689	1,617	1,545	1,850	1,740	1,667	1,594	1,988	1,892	1,790
0,98	1,628	1,508	1,535	1,469	1,748	1,644	1,580	1,513	1,946	1,852	1,755
0,99	1,474	1,470	1,420	1,358	1,624	1,450	1,450	1,397	1,902	1,810	1,719
1,00	1,000	1,000	1,000	1,000	1,000	1,000	1,000	1,000	1,854	1,764	1,776

Примечание: *I*, *II*, *III*—группы веществ.

Таблица 26

Коэффициент сжимаемости

	$\pi=0{,}01$				$\pi=0{,}10$				$\pi=0{,}20$			
	H_2O $z_{кр}=0{,}23$	I $z_{кр}=0{,}25$	II $z_{кр}=0{,}27$	III $z_{кр}=0{,}29$	H_2O $z_{кр}=0{,}23$	I $z_{кр}=0{,}25$	II $z_{кр}=0{,}27$	III $z_{кр}=0{,}29$	H_2O $z_{кр}=0{,}23$	I $z_{кр}=$ $=0{,}25$	II $z_{кр}=$ $=0{,}27$	III $z_{кр}=$ $=0{,}29$
τ_S	—	—	—	—	0,758	0,758	0,743	0,714	0,819	0,817	0,805	0,781
z''	—	—	—	—	0,895	0,895	0,898	0,900	0,820	0,830	0,833	0,839

Продолжение табл. 26

	$\pi=0{,}01$				$\pi=0{,}10$				$\pi=0{,}20$			
	H_2O $z_{кр}=0{,}23$	I $z_{кр}=0{,}25$	II $z_{кр}=0{,}27$	III $z_{кр}=0{,}29$	H_2O $z_{кр}=0{,}23$	I $z_{кр}=0{,}25$	II $z_{кр}=0{,}27$	III $z_{кр}=0{,}29$	H_2O $z_{кр}=0{,}23$	I $z_{кр}=0{,}25$	II $z_{кр}=0{,}27$	III $z_{кр}=0{,}29$
z'	—	—	—	—	0,0116	0,014	0,015	0,018	0,0227	0,028	0,030	0,034
τ	—	—	—	—								
0,50	0,0015	0,985	0,986	0,988	0,0150	0,017	0,018	0,021	0,0299	0,032	0,037	0,042
0,60	0,0013	0,987	0,988	0,990	0,0130	0,0145	0,016	0,019	0,0260	0,028	0,033	0,038
0,70	0,988	0,989	0,990	0,993	0,0119	0,0140	0,015	0,018	0,0238	0,027	0,030	0,035
0,80	0,993	0,991	0,992	0,994	0,0114	0,912	0,921	0,925	0,0228	0,026	0,030	0,854
0,90	0,997	0,993	0,994	0,995	0,949	0,940	0,941	0,950	0,886	0,886	0,890	0,900
0,92	0,997	0,994	0,994	0,995	0,954	0,945	0,951	0,955	0,897	0,888	0,901	0,910
0,94	0,998	0,994	0,994	0,995	0,958	0,950	0,955	0,959	0,907	0,907	0,909	0,916
0,96	0,998	0,994	0,995	0,995	0,962	0,954	0,958	0,963	0,915	0,913	0,915	0,923
0,98	0,998	0,994	0,995	0,996	0,964	0,959	0,962	0,965	0,922	0,918	0,922	0,929
1,00	0,998	0,995	0,995	0,996	0,967	0,963	0,965	0,969	0,928	0,923	0,927	0,934
1,01	0,999	0,995	0,996	0,996	0,968	0,964	0,966	0,970	0,931	0,925	0,930	0,937
1,02	0,999	0,995	0,996	0,996	0,970	0,965	0,967	0,971	0,934	0,929	0,933	0,939
1,03	0,999	0,995	0,996	0,996	0,971	0,967	0,968	0,972	0,936	0,931	0,935	0,941
1,04	0,999	0,995	0,996	0,996	0,972	0,969	0,970	0,973	0,939	0,934	0,938	0,943
1,05	0,999	0,996	0,996	0,997	0,973	0,971	0,971	0,974	0,940	0,936	0,940	0,946
1,06	0,999	0,996	0,996	0,997	0,974	0,972	0,973	0,975	0,942	0,939	0,942	0,948
1,07	0,999	0,996	0,996	0,997	0,975	0,973	0,972	0,976	0,945	0,941	0,944	0,950
1,08	0,999	0,996	0,996	0,997	0,976	0,974	0,974	0,977	0,946	0,943	0,946	0,952
1,09	0,999	0,996	0,997	0,997	0,977	0,975	0,975	0,978	0,949	0,945	0,948	0,954
1,10	0,999	0,996	0,997	0,998	0,978	0,976	0,976	0,979	0,951	0,948	0,950	0,955
1,12	0,999	0,997	0,997	0,998	0,979	0,977	0,977	0,980	0,954	0,951	0,953	0,957

Продолжение табл. 26

	$\pi=0,01$				$\pi=0,10$				$\pi=0,20$			
	H_2O $z_{кр}=0,23$	I $z_{кр}=0,25$	II $z_{кр}=0,27$	III $z_{кр}=0,29$	H_2O $z_{кр}=0,23$	I $z_{кр}=0,25$	II $z_{кр}=0,27$	III $z_{кр}=0,29$	H_2O $z_{кр}=0,23$	I $z_{кр}=0,25$	II $z_{кр}=z=0,27$	III $z_{кр}=0,29$
1,14	0,999	0,997	0,997	0,998	0,980	0,979	0,979	0,981	0,958	0,953	0,957	0,959
1,16	1,000	0,997	0,997	0,998	0,982	0,981	0,980	0,982	0,960	0,957	0,960	0,962
1,18	1,000	0,997	0,997	0,998	0,983	0,982	0,982	0,983	0,963	0,960	0,963	0,964
1,20	1,000	0,997	0,998	0,998	0,984	0,983	0,983	0,984	0,965	0,963	0,965	0,967
1,30	1,000	0,998	0,998	0,998	0,989	0,987	0,987	0,988	0,974	0,970	0,974	0,975
1,40	1,000	0,998	0,998	0,999	0,992	0,989	0,990	0,991	0,981	0,980	0,982	0,982
1,50	1,001	0,998	0,999	0,999	0,995	0,991	0,991	0,992	0,986	0,985	0,986	0,986
1,60	1,001	0,998	0,999	1,000	0,997	0,992	0,992	0,992	0,990	0,988	0,988	0,988
1,70	1,001	0,998	0,999	1,000	0,998	0,992	0,992	0,992	0,992	0,989	0,989	0,989
1,80	—	0,999	0,999	1,000	—	0,993	0,993	0,993	—	0,991	0,991	0,991
1,90	—	0,999	1,000	1,000	—	0,993	0,993	0,993	—	0,993	0,993	0,993
2,00	—	0,999	1,000	1,000	—	0,994	0,994	0,994	—	0,994	0,994	0,994
3,00	—	1,000	1,000	1,000	—	1,000	1,000	1,000	—	1,000	1,000	1,000
4,00	—	1,000	1,000	1,000	—	1,000	1,000	1,000	—	1,000	1,000	1,000
6,00	—	1,000	1,000	1,000	—	1,000	1,000	1,000	—	1,000	1,000	1,000
8,0	—	1,000	1,000	1,000	—	1,000	1,000	1,000	—	1,000	1,000	1,000
10,0	—	1,000	1,000	1,000	—	1,000	1,000	1,000	—	1,000	1,000	1,000
15,00	—	1,000	1,000	1,000	—	1,000	1,000	1,000	—	1,000	1,000	1,000

Примечание: I, II, III—группы веществ.

Продолжение табл. 26

	$\pi=0{,}30$				$\pi=0{,}40$				$\pi=0{,}50$			
	H_2O $z_{кр}=0{,}23$	I $z_{кр}=0{,}25$	II $z_{кр}=0{,}27$	III $z_{кр}=0{,}29$	H_2O $z_{кр}=0{,}23$	I $z_{кр}=0{,}25$	II $z_{кр}=0{,}27$	III $z_{кр}=0{,}29$	H_2O $z_{кр}=0{,}23$	I $z_{кр}=0{,}25$	II $z_{кр}=0{,}27$	III $z_{кр}=0{,}29$
τ_s	0,858	0,856	0,846	0,826	0,889	0,885	0,876	0,861	0,914	0,910	0,900	0,892
z''	0,760	0,780	0,783	0,790	0,700	0,732	0,738	0,746	0,650	0,681	0,693	0,698
z'	0,347	0,040	0,045	0,051	0,047	0,052	0,060	0,068	0,060	0,069	0,077	0,086
τ												
0,50	0,0448	0,048	0,055	0,063	0,0597	0,062	0,073	0,084	0,0745	0,080	0,093	0,105
0,60	0,0389	0,043	0,049	0,056	0,0519	0,057	0,065	0,075	0,0648	0,071	0,082	0,094
0,70	0,0356	0,040	0,046	0,052	0,0474	0,053	0,061	0,070	0,0591	0,066	0,076	0,087
0,80	0,0342	0,039	0,044	0,051	0,0456	0,051	0,056	0,067	0,0568	0,064	0,073	0,084
0,90	0,813	0,822	0,826	0,840	0,721	0,745	0,764	0,775	0,0590	0,068	0,077	0,705
0,92	0,836	0,835	0,842	0,852	0,756	0,767	0,783	0,789	0,662	0,692	0,710	0,729
0,94	0,851	0,853	0,856	0,862	0,786	0,790	0,798	0,806	0,712	0,721	0,735	0,752
0,96	0,865	0,864	0,868	0,876	0,809	0,805	0,817	0,820	0,746	0,750	0,761	0,773
0,98	0,877	0,873	0,879	0,885	0,826	0,824	0,832	0,832	0,774	0,772	0,782	0,793
1,00	0,888	0,882	0,889	0,893	0,844	0,838	0,846	0,852	0,798	0,792	0,801	0,808
1,01	0,893	0,886	0,893	0,897	0,851	0,844	0,852	0,858	0,805	0,800	0,809	0,816
1,02	0,898	0,890	0,897	0,902	0,858	0,752	0,858	0,864	0,817	0,808	0,817	0,824
1,03	0,901	0,894	0,901	0,906	0,863	0,856	0,863	0,869	0,825	0,818	0,825	0,831
1,04	0,906	0,898	0,905	0,910	0,870	0,861	0,868	0,874	0,834	0,824	0,832	0,838
1,05	0,910	0,902	0,908	0,913	0,875	0,868	0,873	0,879	0,842	0,833	0,838	0,845
1,06	0,912	0,906	0,911	0,918	0,880	0,873	0,878	0,886	0,848	0,840	0,845	0,852
1,07	0,916	0,910	0,916	0,920	0,885	0,878	0,883	0,889	0,853	0,846	0,850	0,857
1,08	0,920	0,913	0,918	0,923	0,890	0,882	0,886	0,891	0,861	0,851	0,856	0,860
1,09	0,922	0,918	0,920	0,926	0,893	0,886	0,890	0,893	0,866	0,855	0,862	0,865

Продолжение табл. 26

	$n=0{,}30$				$n=0{,}40$				$n=0{,}50$			
	H_2O $z_{кр}=0{,}23$	I $z_{кр}=0{,}25$	II $z_{кр}=0{,}27$	III $z_{кр}=0{,}29$	H_2O $z_{кр}=0{,}23$	I $z_{кр}=0{,}25$	II $z_{кр}=0{,}27$	III $z_{кр}=0{,}29$	H_2O $z_{кр}=0{,}23$	I $z_{кр}=0{,}25$	II $z_{кр}=0{,}27$	III $z_{кр}=0{,}29$
1,10	0,925	0,919	0,923	0,927	0,898	0,889	0,894	0,899	0,872	0,860	0,866	0,870
1,12	0,930	0,924	0,928	0,931	0,905	0,896	0,901	0,904	0,882	0,870	0,876	0,878
1,14	0,934	0,928	0,933	0,936	0,913	0,903	0,907	0,912	0,890	0,878	0,884	0,887
1,16	0,940	0,934	0,937	0,939	0,918	0,911	0,913	0,917	0,898	0,886	0,891	0,894
1,18	0,943	0,937	0,942	0,943	0,923	0,915	0,918	0,924	0,905	0,893	0,898	0,903
1,20	0,946	0,942	0,946	0,948	0,928	0,920	0,924	0,931	0,911	0,901	0,905	0,916
1,30	0,961	0,959	0,961	0,963	0,948	0,944	0,945	0,946	0,937	0,931	0,931	0,932
1,40	0,968	0,970	0,972	0,973	0,960	0,957	0,959	0,961	0,954	0,948	0,949	0,950
1,50	0,974	0,978	0,980	0,980	0,971	0,968	0,970	0,973	0,966	0,961	0,963	0,965
1,60	0,984	0,984	0,985	0,985	0,979	0,978	0,978	0,978	0,975	0,970	0,973	0,976
1,70	0,988	0,988	0,989	0,989	0,984	0,984	0,984	0,984	0,981	0,978	0,980	0,980
1,80	—	0,991	0,991	0,991	—	0,987	0,987	0,987	—	0,985	0,985	0,985
1,90	—	0,993	0,993	0,993	—	0,991	0,991	0,991	—	0,989	0,989	0,989
2,00	—	0,994	0,994	0,994	—	0,994	0,994	0,994	—	0,993	0,993	0,993
3,00	—	1,000	1,000	1,000	—	1,000	1,000	1,000	—	1,000	1,000	1,000
4,00	—	1,000	1,000	1,000	—	1,000	1,000	1,000	—	1,000	1,000	1,000
6,0	—	1,000	1,000	1,000	—	1,000	1,000	1,000	—	1,000	1,000	1,000
8,00	—	1,000	1,000	1,000	—	1,000	1,000	1,000	—	1,000	1,000	1,000
10,00	—	1,000	1,000	1,000	—	1,000	1,000	1,000	—	1,000	1,000	1,000
15,00	—	1,000	1,000	1,000	—	1,000	1,000	1,000	—	1,000	1,000	1,000

Примечание. I, II, III—группы вещества.

Продолжение табл. 26

	$\pi=0{,}60$				$\pi=0{,}70$				$\pi=0{,}80$			
	H_2O $z_{кр}=0{,}23$	I $z_{кр}=0{,}25$	II $z_{кр}=0{,}27$	III $z_{кр}=0{,}29$	H_2O $z_{кр}=0{,}23$	I $z_{кр}=0{,}25$	II $z_{кр}=0{,}27$	III $z_{кр}=0{,}29$	H_2O $z_{кр}=0{,}23$	I $z_{кр}=0{,}25$	II $z_{кр}=0{,}27$	III $z_{кр}=0{,}29$
τ_g	0,936	0,932	0,928	0,919	0,954	0,952	0,949	0,942	0,971	0,969	0,867	0,963
z''	0,602	0,628	0,641	0,650	0,548	0,570	0,583	0,596	0,486	0,505	0,519	0,536
z'	0,0749	0,086	0,096	0,103	0,091	0,103	0,114	0,125	0,110	0,124	0,136	0,150
τ												
0,50	0,0894	0,096	0,110	0,126	0,104	0,112	0,128	0,147	0,119	0,128	0,147	0,168
0,60	0,0776	0,086	0,098	0,012	0,0904	0,100	0,113	0,131	0,103	0,114	0,130	0,149
0,70	0,0709	0,079	0,092	0,104	0,0826	0,092	0,106	0,121	0,0942	0,105	0,121	0,138
0,80	0,0679	0,077	0,088	0,101	0,0790	0,089	0,102	0,117	0,0900	0,102	0,116	0,133
0,90	0,0706	0,080	0,091	0,103	0,0817	0,092	0,105	0,120	0,0927	0,105	0,120	0,136
0,92	0,0721	0,082	0,093	0,652	0,0834	0,095	0,108	0,123	0,0946	0,107	0,122	0,139
0,94	0,0748	0,655	0,660	0,684	0,0866	0,098	0,111	0,126	0,0961	0,111	0,126	0,143
0,96	0,638	0,648	0,700	0,708	0,0933	0,598	0,613	0,630	0,105	0,117	0,133	0,150
0,98	0,675	0,712	0,731	0,736	0,632	0,636	0,665	0,669	0,528	0,555	0,580	0,598
1,00	0,709	0,744	0,755	0,760	0,680	0,690	0,704	0,710	0,605	0,616	0,640	0,652
1,01	0,728	0,756	0,766	0,772	0,700	0,706	0,718	0,726	0,634	0,642	0,661	0,671
1,02	0,744	0,765	0,776	0,782	0,718	0,720	0,732	0,738	0,659	0,664	0,679	0,689
1,03	0,754	0,778	0,785	0,792	0,732	0,735	0,745	0,751	0,679	0,682	0,696	0,701
1,04	0,767	0,786	0,794	0,800	0,746	0,745	0,756	0,760	0,697	0,699	0,709	0,715
1,05	0,777	0,798	0,802	0,808	0,760	0,758	0,766	0,770	0,715	0,716	0,723	0,727
1,06	0,785	0,805	0,809	0,818	0,771	0,769	0,775	0,780	0,728	0,728	0,734	0,739
1,07	0,795	0,811	0,817	0,824	0,782	0,776	0,782	0,788	0,743	0,738	0,745	0,750

Продолжение табл. 26

	$\pi=0{,}60$				$\pi=0{,}70$				$\pi=0{,}80$			
	H_2O $z_{кр}=0{,}23$	I $z_{кр}=0{,}25$	II $z_{кр}=0{,}27$	III $z_{кр}=0{,}29$	H_2O $z_{кр}=0{,}23$	I $z_{кр}=0{,}25$	II $z_{кр}=0{,}27$	III $z_{кр}=0{,}29$	H_2O $z_{кр}=0{,}23$	I $z_{кр}=0{,}23$	II $z_{кр}=0{,}27$	III $z_{кр}=0{,}29$
1,08	0,805	0,818	0,824	0,829	0,793	0,786	0,790	0,797	0,756	0,748	0,755	0,762
1,09	0,813	0,823	0,830	0,834	0,801	0,792	0,798	0,802	0,766	0,758	0,764	0,769
1,10	0,822	0,831	0,837	0,840	0,810	0,800	0,805	0,808	0,779	0,766	0,773	0,776
1,12	0,840	0,842	0,849	0,852	0,826	0,814	0,818	0,822	0,800	0,785	0,789	0,791
1,14	0,855	0,852	0,859	0,863	0,839	0,827	0,830	0,832	0,815	0,800	0,804	0,806
1,16	0,868	0,861	0,870	0,874	0,850	0,840	0,842	0,844	0,827	0,815	0,817	0,819
1,18	0,878	0,870	0,878	0,880	0,862	0,848	0,852	0,856	0,838	0,825	0,830	0,831
1,20	0,889	0,880	0,905	0,888	0,871	0,860	0,862	0,864	0,848	0,839	0,840	0,842
1,30	0,921	0,916	0,916	0,918	0,909	0,900	0,900	0,892	0,890	0,886	0,888	0,890
1,40	0,940	0,934	0,937	0,940	0,932	0,926	0,928	0,930	0,922	0,920	0,921	0,922
1,50	0,954	0,950	0,953	0,956	0,949	0,947	0,948	0,949	0,941	0,944	0,945	0,946
1,60	0,965	0,960	0,965	0,970	0,963	0,963	0,964	0,965	0,958	0,960	0,960	0,960
1,70	0,973	0,971	0,974	0,977	0,972	0,974	0,974	0,975	0,968	0,970	0,972	0,972
1,80	—	0,982	0,982	0,982	—	0,982	0,982	0,982	—	0,980	0,980	0,980
1,90	—	0,987	0,987	0,987	—	0,987	0,987	0,987	—	0,981	0,987	0,987
2,00	—	0,992	0,992	0,992	—	0,992	0,992	0,992	—	0,990	0,990	0,990
3,00	—	1,000	1,000	1,000	—	1,000	1,000	1,000	—	1,000	1,000	1,000
4,00	—	1,000	1,000	1,000	—	1,000	1,000	1,000	—	1,000	1,000	1,000
6,00	—	1,000	1,000	1,000	—	1,000	1,000	1,000	—	1,000	1,000	1,000
8,00	—	1,000	1,000	1,000	—	1,000	1,000	1,000	—	1,000	1,000	1,000
10,00	—	1,000	1,000	1,000	—	1,000	1,000	1,000	—	1,000	1,000	1,000
15,00	—	1,000	1,000	1,000	—	1,000	1,000	1,000	—	1,000	1,000	1,000

Продолжение табл. 26

	$\tau=0{,}9$				$\tau=1{,}0$				$\tau=1{,}05$			
	H_2O $z_к=0{,}23$	I $z_к=0{,}25$	II $z_к=0{,}27$	III $z_к=0{,}29$	H_2O $z_к=0{,}23$	I $z_к=0{,}25$	II $z_к=0{,}27$	III $z_к=0{,}29$	H_2O $z_к=0{,}23$	I $z_к=0{,}25$	II $z_к=0{,}27$	III $z_к=0{,}29$
τ_s	0,986	0,985	0,984	0,982	1,000	1,000	1,000	1,000	—	—	—	—
z''	0,415	0,427	0,443	0,460	0,232	0,250	0,270	0,290	—	—	—	—
z'	0,136	0,152	0,164	0,177	0,232	0,250	0,270	0,290	—	—	—	—
τ												
0,50	0,134	0,144	0,165	0,189	0,148	0,190	0,183	0,210	0,156	0,168	0,192	0,220
0,60	0,116	0,128	0,147	0,168	0,129	0,142	0,163	0,186	0,136	0,149	0,171	0,196
0,70	0,106	0,118	0,136	0,155	0,117	0,130	0,151	0,171	0,123	0,138	0,158	0,181
0,80	0,101	0,114	0,131	0,150	0,112	0,126	0,145	0,165	0,117	0,133	0,152	0,177
0,90	0,104	0,117	0,134	0,153	0,122	0,129	0,148	0,169	0,120	0,136	0,155	0,168
0,92	0,105	0,120	0,134	0,155	0,116	0,133	0,151	0,170	0,121	0,139	0,158	0,179
0,94	0,109	0,124	0,141	0,159	0,120	0,136	0,155	0,175	0,125	0,143	0,162	0,183
0,96	0,115	0,130	0,147	0,166	0,126	0,143	0,161	0,182	0,132	0,149	0,169	0,190
0,98	0,127	0,143	0,161	0,180	0,136	0,157	0,174	0,195	0,140	0,161	0,181	0,204
1,00	0,515	0,500	0,520	0,544	0,232	0,250	0,270	0,290	0,194	0,218	0,230	0,237
1,01	0,556	0,550	0,568	0,580	0,442	0,360	0,424	0,464	0,343	0,272	0,365	0,380
1,02	0,591	0,592	0,602	0,619	0,508	0,484	0,509	0,522	0,454	0,410	0,463	0,466
1,03	0,618	0,620	0,627	0,640	0,547	0,538	0,555	0,564	0,505	0,486	0,505	0,518
1,04	0,643	0,646	0,650	0,662	0,581	0,577	0,585	0,596	0,546	0,537	0,546	0,558
1,05	0,665	0,664	0,670	0,678	0,610	0,600	0,611	0,620	0,581	0,566	0,577	0,587
1,06	0,683	0,683	0,687	0,694	0,632	0,625	0,633	0,639	0,607	0,595	0,603	0,609
1,07	0,701	0,696	0,703	0,708	0,655	0,646	0,654	0,658	0,631	0,620	0,627	0,630

Продолжение табл. 26

	$n=0,9$				$n=1,0$				$n=1,05$			
	H_2O $z_к=0,23$	I $z_к=0,25$	II $z_к=0,27$	III $z_к=0,29$	H_2O $z_к=0,23$	I $z_к=0,25$	II $z_к=0,27$	III $z_к=0,29$	H_2O $z_к=0,23$	I $z_к=0,25$	II $z_к=0,27$	III $z_к=0,29$
1,08	0,713	0,710	0,715	0,723	0,676	0,665	0,671	0,676	0,653	0,639	0,647	0,653
1,09	0,729	0,721	0,726	0,730	0,691	0,680	0,686	0,689	0,670	0,657	0,662	0,668
1,10	0,743	0,731	0,738	0,742	0,707	0,694	0,700	0,702	0,689	0,675	0,678	0,682
1,12	0,765	0,753	0,756	0,760	0,734	0,718	0,723	0,726	0,718	0,702	0,704	0,708
1,14	0,785	0,772	0,773	0,777	0,756	0,740	0,745	0,748	0,742	0,724	0,731	0,735
1,16	0,803	0,786	0,790	0,793	0,780	0,758	0,764	0,766	0,765	0,746	0,750	0,752
1,18	0,817	0,801	0,805	0,808	0,795	0,776	0,780	0,782	0,783	0,765	0,771	0,772
1,20	0,831	0,817	0,818	0,822	0,810	0,792	0,795	0,799	0,800	0,782	0,787	0,788
1,30	0,883	0,872	0,874	0,876	0,886	0,855	0,857	0,860	0,860	0,848	0,849	0,851
1,40	0,912	0,910	0,912	0,914	0,902	0,897	0,899	0,900	0,897	0,892	0,892	0,894
1,50	0,934	0,937	0,938	0,939	0,926	0,926	0,929	0,930	0,923	0,920	0,922	0,926
1,60	0,952	0,955	0,955	0,956	0,946	0,948	0,948	0,952	0,944	0,943	0,943	0,948
1,70	0,963	0,967	0,968	0,968	0,959	0,963	0,964	0,965	0,957	0,958	0,958	0,962
1,80	—	0,977	0,978	0,978	—	0,970	0,974	0,974	—	0,970	0,970	0,972
1,90	—	0,985	0,985	0,985	—	0,983	0,983	0,983	—	0,978	0,978	0,980
2,00	—	0,990	0,990	0,990	—	0,988	0,988	0,988	—	0,986	0,986	0,987
3,00	—	1,000	1,000	1,000	—	1,000	1,000	1,000	—	1,000	1,000	1,000
4,00	—	1,000	1,000	1,000	—	1,000	1,000	1,000	—	1,000	1,000	1,000
6,00	—	1,000	1,000	1,000	—	1,000	1,000	1,000	—	1,000	1,000	1,000
8,00	—	1,000	1,000	1,000	—	1,000	1,000	1,000	—	1,000	1,000	1,000
10,00	—	1,000	1,000	1,000	—	1,000	1,000	1,000	—	1,000	1,000	1,000
15,00	—	1,000	1,000	1,000	—	1,000	1,000	1,000	—	1,000	1,000	1,000

Продолжение табл. 26

	$\pi=1{,}10$				$\pi=1{,}15$				$\pi=1{,}20$	
	H_2O $z_{кр}=0{,}23$	I $z_{кр}=0{,}25$	II $z_{кр}=0{,}27$	III $z_{кр}=0{,}29$	H_2O $z_{кр}=0{,}23$	I $z_{кр}=0{,}25$	II $z_{кр}=0{,}27$	III $z_{кр}=0{,}29$	H_2O $z_{кр}=0{,}23$	I $z_{кр}=0{,}27$
τ										
0,50	0,163	0,176	0,201	0,231	0,170	0,184	0,211	0,241	0,178	0,220
0,60	0,142	0,156	0,179	0,205	0,148	0,163	0,187	0,214	0,154	0,195
0,70	0,129	0,144	0,165	0,190	0,135	0,151	0,173	0,198	0,140	0,180
0,80	0,123	0,139	0,159	0,182	0,128	0,145	0,166	0,190	0,134	0,173
0,90	0,125	0,142	0,162	0,185	0,130	0,148	0,169	0,193	0,135	0,176
0,92	0,127	0,145	0,165	0,187	0,132	0,151	0,172	0,195	0,137	0,179
0,94	0,130	0,149	0,169	0,191	0,136	0,155	0,176	0,199	0,141	0,183
0,96	0,136	0,155	0,176	0,198	0,142	0,161	0,183	0,206	0,146	0,189
0,98	0,145	0,168	0,189	0,212	0,150	0,174	0,195	0,210	0,153	0,202
1,00	0,163	0,214	0,224	0,228	0,166	0,215	0,223	0,223	0,164	0,220
1,01	0,214	0,245	0,256	0,290	0,191	0,239	0,246	0,252	0,183	0,242
1,02	0,381	0,353	0,360	0,398	0,282	0,314	0,316	0,325	0,227	0,295
1,03	0,458	0,430	0,461	0,470	0,400	0,395	0,408	0,415	0,329	0,369
1,04	0,511	0,498	0,505	0,510	0,466	0,459	0,471	0,475	0,419	0,422
1,05	0,549	0,536	0,541	0,551	0,510	0,505	0,513	0,520	0,479	0,478
1,06	0,578	0,560	0,568	0,578	0,546	0,540	0,545	0,545	0,515	0,517
1,07	0,06	0,590	0,594	0,603	0,580	0,570	0,573	0,574	0,551	0,548
1,08	0,631	0,611	0,616	0,623	0,607	0,593	0,597	0,600	0,581	0,573

Продолжение табл. 26

	$n=1{,}10$				$n=1{,}15$				$n=1{,}20$	
	H_2O $z_{кр}=0{,}23$	I $z_{кр}=0{,}25$	II $z_{кр}=0{,}27$	III $z_{кр}=0{,}29$	H_2O $z_{кр}=0{,}23$	I $z_{кр}=0{,}25$	II $z_{кр}=0{,}27$	III $z_{кр}=0{,}29$	H_2O $z_{кр}=0{,}23$	I $z_{кр}=0{,}27$
1,09	0,650	0,635	0,637	0,644	0,628	0,615	0,618	0,620	0,605	0,598
1,10	0,670	0,654	0,655	0,660	0,653	0,636	0,639	0,641	0,629	0,618
1,12	0,701	0,685	0,686	0,690	0,684	0,668	0,672	0,674	0,666	0,654
1,14	0,728	0,709	0,712	0,716	0,713	0,694	0,698	0,700	0,698	0,683
1,16	0,752	0,732	0,735	0,738	0,739	0,720	0,724	0,726	0,725	0,707
1,18	0,771	0,753	0,756	0,757	0,759	0,742	0,745	0,748	0,747	0,730
1,20	0,789	0,772	0,773	0,774	0,778	0,761	0,763	0,765	0,767	0,751
1,30	0,853	0,841	0,841	0,843	0,846	0,834	0,835	0,837	0,838	0,827
1,40	0,893	0,886	0,888	0,888	0,885	0,880	0,882	0,884	0,881	0,875
1,50	0,919	0,915	0,918	0,921	0,915	0,912	0,914	0,916	0,911	0,911
1,60	0,941	0,938	0,940	0,944	0,938	0,938	0,938	0,940	0,935	0,935
1,70	0,955	0,956	0,956	0,958	0,953	0,954	0,954	0,955	0,951	0,951
1,80	—	0,968	0,968	0,969	—	0,965	0,966	0,966	—	0,963
1,90	—	0,97	0,97	0,978	—	0,973	0,974	0,976	—	0,974
2,00	—	0,984	0,984	0,986	—	0,982	0,982	0,985	—	0,981
3,00	—	1,000	1,000	1,000	—	—	—	—	—	1,000
4,00	—	1,000	1,000	1,000	—	—	—	—	—	1,000
8,00	—	1,000	1,000	1,000	—	—	—	—	—	1,004
10,00	—	1,000	1,000	1,000	—	—	—	—	—	1,005
15,00	—	1,000	1,000	1,000	—	—	—	—	—	1,010

Продолжение табл. 26

	$n=1{,}25$		$n=1{,}30$		$n=1{,}35$		$n=1{,}40$		$n=1{,}45$	
	H_2O $z_{кр}=0{,}23$	II $z_{кр}=0{,}27$	H_2O $z_{кр}=0{,}23$	II $z_{кр}=0{,}27$	H_2O $z_{кр}=0{,}23$	II $z_{кр}=0{,}27$	H_2O $z_{кр}=0{,}23$	II $z_{кр}=0{,}27$	H_2O $z_{кр}=0{,}23$	II $z_{кр}=0{,}27$
τ										
0,50	0,185	0,229	0,192	0,238	0,200	0,247	0,207	0,256	0,214	0,265
0,60	0,160	0,203	0,167	0,211	0,173	0,219	0,180	0,227	0,186	0,235
0,70	0,146	0,188	0,152	0,195	0,158	0,202	0,163	0,210	0,169	0,217
0,80	0,139	0,180	0,144	0,187	0,150	0,194	0,155	0,201	0,161	0,208
0,90	0,141	0,183	0,146	0,190	0,151	0,197	0,156	0,203	0,162	0,210
0,92	0,143	0,185	0,148	0,192	0,153	0,199	0,158	0,206	0,163	0,213
0,94	0,147	0,190	0,152	0,197	0,156	0,203	0,161	0,210	0,166	0,217
0,96	0,151	0,196	0,156	0,203	0,162	0,210	0,166	0,217	0,172	0,223
0,98	0,159	0,209	0,164	0,216	0,169	0,222	0,174	0,228	0,179	0,235
1,00	0,171	0,223	0,174	0,225	0,178	0,230	0,182	0,234	0,187	0,241
1,01	0,183	0,242	0,185	0,242	0,188	0,246	0,190	0,246	0,195	0,259
1,02	0,209	0,282	0,207	0,271	0,206	0,267	0,202	0,264	0,205	0,270
1,03	0,268	0,343	0,254	0,336	0,238	0,302	0,220	0,288	0,221	0,292
1,04	0,368	0,396	0,333	0,364	0,298	0,345	0,254	0,323	0,251	0,316
1,05	0,438	0,444	0,400	0,415	0,359	0,389	0,311	0,366	0,299	0,346
1,06	0,485	0,488	0,450	0,455	0,414	0,430	0,370	0,403	0,351	0,380
1,07	0,525	0,529	0,496	0,493	0,465	0,467	0,427	0,438	0,405	0,415
1,08	0,559	0,552	0,534	0,522	0,507	0,500	0,474	0,472	0,452	0,447

Продолжение табл. 26

	$\varkappa=1{,}25$		$\varkappa=1{,}30$		$\varkappa=1{,}35$		$\varkappa=1{,}40$		$\varkappa=1{,}45$	
	H_2O $z_{кр}=0{,}23$	II $z_{кр}=0{,}27$	H_2O $z_{кр}=0{,}23$	II $z_{кр}=0{,}27$	H_2O $z_{кр}=0{,}23$	II $z_{кр}=0{,}27$	H_2O $z_{кр}=0{,}23$	II $z_{кр}=0{,}27$	H_2O $z_{кр}=0{,}23$	II $z_{кр}=0{,}27$
1,09	0,590	0,579	0,562	0,550	0,538	0,531	0,507	0,507	0,488	0,481
1,10	0,611	0,599	0,591	0,574	0,569	0,553	0,541	0,534	0,524	0,512
1,12	0,651	0,636	0,634	0,615	0,616	0,600	0,592	0,577	0,578	0,559
1,14	0,685	0,667	0,670	0,649	0,655	0,632	0,633	0,615	0,621	0,600
1,16	0,715	0,694	0,702	0,678	0,689	0,663	0,669	0,647	0,659	0,632
1,18	0,738	0,718	0,728	0,706	0,715	0,692	0,697	0,677	0,690	0,667
1,20	0,758	0,741	0,749	0,728	0,738	0,719	0,721	0,705	0,715	0,694
1,30	0,833	0,819	0,827	0,811	0,821	0,803	0,808	0,795	0,806	0,790
1,40	0,878	0,872	0,874	0,865	0,869	0,860	0,859	0,855	0,859	0,852
1,50	0,909	0,907	0,907	0,902	0,903	0,899	0,894	0,894	0,895	0,892
1,60	0,934	0,932	0,933	0,928	0,931	0,926	0,922	0,923	0,924	0,926
1,70	0,950	0,949	0,949	0,947	0,950	0,949	0,941	0,945	0,943	0,949
1,80	—	0,962	—	0,962	—	0,962	—	0,960	—	0,962
1,90	—	0,973	—	0,972	—	0,972	—	0,972	—	0,972
2,00	—	0,981	—	0,981	—	0,980	—	0,979	—	0,978
3,00	—	1,000	—	1,000	—	1,000	—	1,000	—	1,000
4,00	—	1,000	—	1,000	—	1,000	—	1,000	—	1,000
6,00	—	1,000	—	1,000	—	1,000	—	1,004	—	1,000
8,00	—	1,004	—	1,004	—	1,004	—	1,008	—	1,004
10,00	—	1,007	—	1,007	—	1,007	—	1,010	—	1,010
15,00	—	1,010	—	1,010	—	1,010	—	1,020	—	1,020

Продолжение табл. 26

	$\pi=1{,}50$		$\pi=1{,}60$		$\pi=1{,}70$		$\pi=1{,}8$	$\pi=1{,}9$	$\pi=2{,}0$	$\pi=2{,}2$
	H_2O $z_{кр}=0{,}23$	II $z_{кр}=0{,}27$	H_2O $z_{кр}=0{,}23$	II $z_{кр}=0{,}27$	H_2O $z_{кр}=0{,}23$	II $z_{кр}=0{,}27$	II $z_{кр}=0{,}27$	II $z_{кр}=0{,}27$	II $z_{кр}=0{,}27$	II $z_{кр}=0{,}27$
τ										
0,50	0,221	0,274	0,236	0,293	0,251	0,311	0,329	0,347	0,365	0,402
0,60	0,192	0,243	0,205	0,259	0,217	0,275	0,291	0,307	0,323	0,355
0,70	0,175	0,224	0,186	0,239	0,196	0,254	0,268	0,282	0,297	0,326
0,80	0,166	0,215	0,177	0,229	0,187	0,243	0,257	0,270	0,284	0,311
0,90	0,167	0,217	0,177	0,230	0,187	0,244	0,257	0,270	0,283	0,309
0,92	0,196	0,219	0,179	0,233	0,189	0,246	0,259	0,272	0,284	0,311
0,94	0,171	0,223	0,182	0,237	0,192	0,249	0,262	0,275	0,287	0,313
0,96	0,177	0,230	0,187	0,242	0,197	0,255	0,267	0,279	0,291	0,317
0,98	0,184	0,241	0,191	0,253	0,203	0,265	0,276	0,287	0,298	0,323
1,00	0,191	0,247	0,200	0,254	0,209	0,268	0,279	0,293	0,306	0,328
1,01	0,198	0,258	0,206	0,262	0,215	0,277	0,287	0,300	0,312	0,333
1,02	0,208	0,273	0,214	0,276	0,222	0,288	0,296	0,308	0,318	0,338
1,03	0,222	0,288	0,224	0,289	0,229	0,300	0,307	0,319	0,326	0,344
1,04	0,246	0,308	0,239	0,305	0,241	0,312	0,317	0,326	0,333	0,351
1,05	0,286	0,332	0,262	0,323	0,258	0,328	0,332	0,338	0,341	0,358
1,06	0,333	0,368	0,293	0,347	0,278	0,346	0,347	0,349	0,351	0,366
1,07	0,387	0,398	0,334	0,370	0,307	0,365	0,365	0,364	0,361	0,375
1,08	0,429	0,431	0,378	0,396	0,342	0,387	0,380	0,375	0,372	0,384
1,09	0,466	0,464	0,418	0,424	0,380	0,409	0,398	0,390	0,386	0,394
1,10	0,504	0,496	0,460	0,455	0,419	0,432	0,416	0,408	0,400	0,404
1,12	0,563	0,542	0,526	0,505	0,486	0,480	0,454	0,439	0,432	0,426

Продолжение табл. 26

	$n=1{,}50$		$n=1{,}60$		$n=1{,}70$		$n=1{,}8$	$n=1{,}9$	$n=2{,}0$	$n=2{,}2$
	H_2O $z_{кр}=0{,}23$	II $z_{кр}=0{,}27$	H_2O $z_{кр}=0{,}23$	II $z_{кр}=0{,}27$	H_2O $z_{кр}=0{,}23$	II $z_{кр}=0{,}27$	II $z_{кр}=0{,}27$	II $z_{кр}=0{,}27$	II $z_{кр}=0{,}27$	II $z_{кр}=0{,}27$
1,14	0,609	0,580	0,577	0,549	0,541	0,521	0,494	0,479	0,466	0,454
1,16	0,649	0,619	0,621	0,588	0,588	0,565	0,540	0,521	0,503	0,488
1,18	0,680	0,653	0,651	0,622	0,626	0,606	0,583	0,561	0,542	0,525
1,20	0,707	0,682	0,685	0,653	0,652	0,638	0,620	0,600	0,573	0,562
1,30	0,801	0,783	0,784	0,768	0,770	0,755	0,742	0,731	0,716	0,697
1,40	0,856	0,846	0,843	0,837	0,832	0,829	0,819	0,812	0,801	0,786
1,50	0,895	0,888	0,883	0,782	0,874	0,877	0,869	0,861	0,852	0,842
1,60	0,926	0,919	0,914	0,894	0,909	0,909	0,904	0,896	0,888	0,880
1,70	0,952	0,940	0,935	0,916	0,931	0,932	0,929	0,922	0,915	0,908
1,80	—	0,956	—	0,932	—	0,949	0,946	0,940	0,935	0,930
1,90	—	0,968	—	0,953	—	0,962	0,960	0,956	0,952	0,947
2,00	—	0,976	—	0,974	—	0,972	0,971	0,969	0,966	0,960
3,00	—	0,999	—	0,997	—	0,997	0,995	0,991	0,986	0,984
4,00	—	1,000	—	1,000	—	1,000	0,997	0,993	0,990	0,988
6,00	—	1,004	—	1,003	—	1,005	1,000	0,994	0,995	0,993
8,00	—	1,008	—	1,008	—	1,008	1,005	0,998	0,998	0,996
10,00	—	1,010	—	1,010	—	1,012	1,008	1,000	1,000	0,998
15,0	—	1,020	—	1,020	—	1,020	1,020	1,020	1,020	1,020

Примечание. I, II, III—группы веществ.

Свойства насыщенного пара ртути

t	T	p^*	$v' \cdot 10^5$	v''	h'	h''	r	s'	s''
°С	К	бар	м³/кг		кДж/кг			кДж/(кг·К)	
100	373,15	$3{,}745 \cdot 10^{-4}$	7,48984	413,0	56,936	360,253	303,317	0,40969	1,22255
110	383,15	$6{,}247 \cdot 10^{-4}$	7,50337	254,2	58,306	361,289	302,983	0,41331	1,20408
120	393,15	$1{,}015 \cdot 10^{-3}$	7,51693	153,6	58,674	362,336	302,652	0,41684	1,18665
130	403,15	$1{,}608 \cdot 10^{-3}$	7,53052	103,9	61,039	363,362	302,323	0,42027	1,17017
140	413,15	$2{,}491 \cdot 10^{-3}$	7,54415	68,75	62,403	364,397	301,994	0,42361	1,15456
150	423,15	$3{,}778 \cdot 10^{-3}$	7,55780	46,43	63,765	365,433	301,668	0,42687	1,13978
160	433,15	$5{,}618 \cdot 10^{-3}$	7,57148	31,96	65,125	366,469	301,344	0,43004	1,12575
170	443,15	$8{,}204 \cdot 10^{-3}$	7,58520	22,39	66,484	367,504	301,020	0,43314	1,11242
180	453,15	$1{,}178 \cdot 10^{-2}$	7,59897	15,95	67,842	368,539	300,697	0,43647	1,09975
190	463,15	$1{,}664 \cdot 10^{-2}$	7,61277	11,54	69,198	369,574	300,376	0,43913	1,08768
200	473,15	$2{,}315 \cdot 10^{-2}$	7,62662	8,469	70,553	370,609	300,056	0,44203	1,07619
210	483,15	$3{,}177 \cdot 10^{-2}$	7,64051	6,301	71,908	371,642	299,734	0,44486	1,06524
220	493,15	$4{,}304 \cdot 10^{-2}$	7,65444	4,748	73,261	372,676	299,415	0,44763	1,05468
230	503,15	$5{,}758 \cdot 10^{-2}$	7,66843	3,621	74,614	373,708	299,094	0,45035	1,04479
240	513,15	$7{,}614 \cdot 10^{-2}$	7,68247	2,793	75,967	374,740	298,773	0,45301	1,03525
250	523,15	$9{,}959 \cdot 10^{-2}$	7,69656	2,176	77,319	375,771	298,452	0,45562	1,02611
260	533,15	0,12892	7,71071	1,7132	78,671	376,800	298,129	0,45818	1,01737
270	543,15	0,16527	7,72491	1,3613	80,023	377,829	297,806	0,46069	1,00899
280	553,15	0,20993	7,73918	1,0922	81,375	378,885	297,480	0,46316	1,00095
290	563,15	0,26435	7,75351	0,88213	82,728	379,880	297,152	0,46558	0,99324
300	573,15	0,33015	7,7679	0,71874	84,080	380,904	296,824	0,46796	0,98584
310	583,15	0,40910	7,7823	0,59002	85,434	381,925	296,491	0,47030	0,97872

* В табл. 27—30 давление выражено в барах (1 бар=10^5 Па=0,1 МПа).

Продолжение табл. 27

t	T	p^*	$v' \cdot 10^3$	v''	h'	h''	r	s'	s''
°C	K	бар	м³/кг		кДж/кг			кДж/(кг·К)	
320	593,15	0,50320	7,7969	0,48779	86,788	382,944	296,156	0,47260	0,97190
330	603,15	0,61460	7,8115	0,40600	88,143	393,960	295,817	0,4787	0,96532
340	613,15	0,74567	7,8262	0,34008	88,499	384,973	295,474	0,47709	0,95899
350	623,15	0,89896	7,8409	0,28660	90,856	385,984	295,128	0,47929	0,95289
360	633,15	1,0772	7,8558	0,24291	92,215	386,991	294,776	0,48145	0,94702
370	643,15	1,2834	7,8707	0,20702	93,575	387,994	294,419	0,48358	0,94135
380	653,15	1,5207	7,8858	0,17735	94,937	388,994	294,057	0,48568	0,93589
390	663,15	1,7925	7,9008	0,15269	96,300	389,989	293,689	0,48774	0,93061
400	673,15	2,1024	7,9160	0,13207	97,766	390,980	293,314	0,48978	0,92552
410	683,15	2,454	7,9313	0,11476	99,033	391,966	292,933	0,49180	0,92059
420	693,15	2,852	7,9467	0,10014	100,403	392,947	292,544	0,49378	0,91583
430	703,15	2,299	7,9622	0,08775	101,775	393,923	292,148	0,49574	0,91123
440	713,15	3,801	7,9778	0,07719	103,150	394,893	291,743	0,49768	0,90677
450	723,15	4,362	7,9935	0,06815	104,428	395,858	291,330	0,49959	0,90245
460	733,15	4,986	8,0094	0,06039	105,908	396,816	290,908	0,50148	0,89927
470	743,15	5,679	8,0252	0,05369	107,292	397,767	290,475	0,50335	0,89422
480	753,15	6,446	8,0413	0,04789	108,679	398,711	290,032	0,50519	0,89029
490	763,15	7,292	8,0574	0,04285	110,069	399,649	289,580	0,50702	0,88647
500	773,15	8,222	8,074	0,03846	111,463	400,579	289,116	0,50882	0,88277
510	783,15	9,242	8,090	0,03462	112,861	401,501	288,640	0,51061	0,87917
520	793,15	10,358	8,106	0,03124	114,262	402,415	288,153	0,51238	0,87568
530	803,15	11,576	8,123	0,02827	115,668	403,321	287,653	0,51412	0,87228
540	813,15	12,901	8,140	0,02565	117,078	404,218	287,140	0,51586	0,86898
550	823,15	14,340	8,157	0,02333	118,492	405,106	286,614	0,51757	0,86576

Критические параметры пути: $p_{кр}$ = 14 МПа; $t_{кр}$ = 1,210°С; $\rho_{кр}$ = 5,7 кг/м³.

Термодинамические свойства двуокиси углерода CO_2 на линии насыщения [15]

Температура		Давление	Плотность		Энтальпия		Энтропия	
t, °С	T, К	p, бар	$\rho_{тв}$, кг/м³	$\rho_п$, кг/м³	$h_{тв}$, кДж/кг	$h_п$, кДж/кг	$s_{тв}$, кДж/(кг·К)	$s_п$, кДж/(кг·К)
Линия равновесия твердое тело—пар								
—130	143,15	0,00308	1626	0,01139	92,54	693,6	1,2167	5,414
—125	148,15	0,00652	1621	0,02326	97,87	696,4	1,2535	5,293
—120	153,15	0,01311	1616	0,04525	103,28	699,1	1,2895	5,180
—115	158,15	0,02514	1610	0,08416	108,78	702,3	1,3251	5,078
—110	163,15	0,04620	1605	0,1504	114,37	705,2	1,3599	4,981
—105	168,15	0,0817	1600	0,2582	120,05	708,2	1,3942	4,892
—100	173,15	0,1397	1595	0,4298	125,84	711,3	1,4281	4,809
—95	178,15	0,2315	1589	0,6944	131,74	714,1	1,4616	4,730
—90	183,15	0,3727	1582	1,0902	137,75	717,1	1,4951	4,658
—85	188,15	0,5847	1574	1,673	143,88	719,9	1,5282	4,590
—80	193,15	0,8962	1565	2,515	150,14	722,4	1,5608	4,523
—75	198,15	1,345	1555	3,708	156,55	725,0	1,5931	4,462
—70	203,15	1,981	1545	5,386	163,1	727,1	1,625	4,401
—65	208,15	2,870	1534	7,721	169,8	728,3	1,658	4,341
—60	213,15	4,097	1522	10,962	176,6	728,7	1,689	4,281
—56,6	216,55	5,179	1513	13,797	181,4	729,0	1,721	4,250

Продолжение табл. 28

Температура	Давление	Плотность		Энтальпия		Энтропия	
t, °С	p, бар	ρ', кг/м³	ρ'', кг/м³	h', кДж/кг	h'', кДж/кг	s', кДж/(кг·К)	s'', кДж/(кг·К)
Линия равновесия жидкость—пар							
—56,6	5,179	1177,8	13,797	380,5	729,0	2,641	4,250
—50,0	6,831	1152,6	18,03	392,5	730,2	2,691	4,203

Продолжение табл. 28

Температура	Давление	Плотность		Энтальпия		Энтропия	
t, °C	p, бар	ρ', кг/м³	ρ'', кг/м³	h', кДж/кг	h'', кДж/кг	s', кДж/(кг·К)	s'', кДж/(кг·К)
—40,0	10,051	1113,6	26,21	411,3	732,4	2,772	4,149
—30,0	14,281	1072,7	37,04	430,8	734,4	2,851	4,100
—20,0	19,691	1029,3	51,33	451,0	735,0	2,930	4,052
—15,0	22,896	1006,2	60,16	461,5	734,5	2,970	4,028
—10,0	26,466	981,9	70,33	472,2	733,6	3,010	4,003
—5,0	30,431	956,1	82,26	483,3	731,8	3,050	3,977
0,0	34,817	928,5	96,26	495,0	729,4	3,092	3,950
1,0	35,747	922,7	99,90	497,5	727,8	3,101	3,942
2,0	36,697	916,8	103,11	500,0	727,0	3,109	3,935
3,0	37,664	910,7	106,53	502,4	726,1	3,118	3,929
4,0	38,651	904,5	110,15	505,0	725,2	3,127	3,922
5,0	39,657	898,2	113,78	507,3	724,2	3,136	3,915
6,0	40,683	891,8	117,66	510,0	723,3	3,144	3,908
7,0	41,729	885,2	121,61	512,5	722,3	3,152	3,901
8,0	42,795	878,4	125,83	515,3	721,3	3,161	3,894
9,0	43,881	871,4	130,19	518,0	720,2	3,170	3,887
10,0	44,988	864,2	134,59	520,4	718,5	3,179	3,879
12,0	47,267	849,4	144,26	526,0	716,5	3,196	3,865
14,0	49,633	833,5	154,52	531,5	713,9	3,215	3,850
16,0	52,090	816,4	166,22	537,5	710,9	3,235	3,835
18,0	54,641	797,9	179,11	543,7	707,5	3,256	3,819
20,0	57,289	777,7	193,9	550,4	703,6	3,278	3,800
22,0	60,037	754,8	210,8	557,8	699,1	3,303	3,782
24,0	62,889	728,6	231,0	566,5	694,1	3,331	3,760
25,0	64,356	713,8	242,4	571,0	691,2	3,345	3,748
26,0	65,849	697,3	256,3	576,0	687,3	3,363	3,735

Продолжение табл. 28

Температура	Давление	Плотность		Энтальпия		Энтропия	
t, °C	p, бар	ρ', кг/м³	ρ'', кг/м³	h', кДж/кг	h'', кДж/кг	s', кДж/(кг·К)	s'', кДж/(кг·К)
27,0	67,371	678,6	272,4	581,5	682,8	3,382	3,720
28,0	68,922	656,8	290,8	587,8	678,1	3,403	3,703
29,0	70,502	629,9	312,5	594,7	672,4	3,430	3,684
30,0	72,111	592,9	339,7	602,5	664,1	3,454	3,658
31,05	73,834	468,0		634,3		3,552	

Таблица 29

Свойства насыщенного пара аммиака

t	p	v'	v''	s'	s''	h'	h''	r
°C	бар	м³/кг		кДж/(кг·К)		кДж/(кг)		
—75	0,0750	0,001368	12,89	2,7771	10,2287	87,5	1563,8	1476,3
—70	0,109	0,001379	9,01	2,8797	10,0906	108,4	1573,0	1464,5
—65	0,157	0,001399	6,46	2,9823	9,9621	129,8	1582,2	1452,4
—60	0,219	0,001401	4,70	3,0840	9,8407	151,1	1591,0	1439,8
—55	0,302	0,001413	3,49	3,1824	9,7272	172,5	1599,8	1427,3
—50	0,409	0,001425	2,62	3,2791	9,6204	193,4	1608,1	1414,7
—45	0,546	0,001437	2,01	3,3767	8,5199	215,6	1616,5	1400,9
—40	0,718	0,001449	1,55	3,4730	9,4245	237,8	1624,9	1387,1
—35	0,933	0,001462	1,22	3,5672	9,3341	260,0	1632,9	1372,9
—30	1,195	0,001476	0,963	3,6601	9,2486	282,2	1640,8	1358,6
—25	1,516	0,001490	0,772	3,7514	9,1674	304,4	1648,3	1344,0
—20	1,902	0,001504	0,624	3,8410	9,0895	327,4	1655,9	1328,5

Продолжение табл. 29

t	p	v'	v''	s'	s''	h'	h''	r
°C	бар	м³/кг		кДж/(кг·К)		кДж/(кг)		
—15	2,363	0,001519	0,509	3,9293	9,0150	350,0	1662,6	1312,6
—10	2,909	0,001534	0,419	4,0164	8,9438	372,6	1669,3	1296,7
—5	3,549	0,001550	0,347	4,1022	8,8756	395,7	1675,1	1279,5
0	4,294	0,001566	0,290	4,1868	8,8094	418,7	1681,0	1262,3
5	5,157	0,001583	0,244	4,2705	8,7458	441,7	1686,4	1244,7
10	6,150	0,001601	0,206	4,3530	8,6838	465,2	1691,0	1225,9
15	7,283	0,001619	0,175	4,4347	8,6240	488,6	1695,7	1207,1
20	8,572	0,001639	0,149	4,5155	8,5658	512,5	1699,4	1187,0
25	10,03	0,001659	0,128	4,5954	8,5093	536,3	1703,2	1166,9
30	11,67	0,001680	0,111	4,6746	8,4536	560,2	1705,7	1145,5
35	13,50	0,001702	0,0959	4,7529	8,3991	584,9	1708,2	1123,3
40	15,54	0,001726	0,0833	4,8307	8,3455	609,2	1709,9	1100,7
45	17,81	0,001750	0,0727	4,9078	8,2928	633,9	1710,7	1076,8
50	20,33	0,001777	0,0635	4,9840	8,2400	659,0	1711,1	1052,1

Таблица 30

Свойства насыщенных паров фреона-12 [19]

Температура		Давление абсолютное p, бар	Удельный объем		Плотность		Энтальпия		Теплота парообразования r, кДж/кг	Энтропия		Отношение теплоты парообразования к абсолютной температуре, кДж/(кг·К)
t, °C	T, К		жидкости v', дм³/кг	пара v'', м³/кг	жидкости ρ', кг/дм³	пара ρ'', кг/м³	жидкости h', кДж/кг	пара h'', кДж/кг		жидкости s', кДж/(кг·К)	пара s'', кДж/(кг·К)	
—20	253,15	1,5098	0,6868	0,1107	1,456	9,034	400,47	564,00	163,54	4,11835	4,76449	0,64615
—19	254,15	1,5695	0,6882	0,1067	1,453	9,372	401,39	564,51	163,12	4,12182	4,76387	0,64205
—18	255,15	1,6306	0,6897	0,1030	1,450	9,709	402,27	565,01	162,74	4,12530	4,76324	0,63794

Продолжение табл. 30

Температура		Давление абсолютное p, бар	Удельный объем		Плотность		Энтальпия		Теплота парообразования r, кДж/кг	Энтропия		Отношение теплоты парообразования к абсолютной температуре, кДж/(кг·К)
t, °С	T, К		жидкости v', дм³/кг	пара v'', м³/кг	жидкости ρ', кг/дм³	пара ρ'', кг/м³	жидкости h', кДж/кг	пара h'', кДж/кг		жидкости s', кДж/(кг·К)	пара s'', кДж/(кг·К)	
—17	256,15	1,6941	0,6911	0,09938	1,447	10,06	403,15	565,49	162,32	4,12877	4,76261	0,63384
—16	257,15	1,7593	0,6925	0,09597	1,444	10,42	404,03	565,93	161,90	4,13220	4,76198	0,62978
—15	258,15	1,8262	0,6940	0,09268	1,441	10,79	404,95	566,43	161,48	4,13564	4,76135	0,62572
—14	259,15	1,8947	0,6954	0,08952	1,438	11,17	406,04	566,89	161,07	4,13907	4,76077	0,62170
—13	260,15	1,9662	0,6973	0,08650	1,434	11,56	406,75	567,40	160,65	4,14250	4,76018	0,61768
—12	261,15	2,0391	0,6988	0,08361	1,431	11,96	407,63	567,86	160,23	4,14598	4,75964	0,61366
—11	262,15	2,1138	0,7003	0,08082	1,428	12,37	408,55	568,36	159,81	4,14941	4,75905	0,60964
—10	263,15	2,1910	0,7018	0,07813	1,425	12,80	409,47	568,86	159,39	4,15280	4,75859	0,60579
—9	264,15	2,2700	0,7032	0,07558	1,422	13,23	410,39	569,32	158,93	4,15624	4,75805	0,60181
—8	265,15	2,3520	0,7047	0,07313	1,419	13,68	411,27	569,78	158,51	4,15963	4,75759	0,59796
—7	266,15	2,4353	0,7062	0,07078	1,416	14,13	412,19	570,24	158,05	4,16302	4,75704	0,59402
—6	267,15	2,5215	0,7077	0,06852	1,413	14,60	413,11	570,74	157,63	4,16645	4,75658	0,59013
—5	268,15	2,6088	0,7092	0,06635	1,410	15,08	414,03	571,21	157,17	4,16984	4,75612	0,50628
—4	269,15	2,6999	0,7107	0,06427	1,407	15,57	414,95	571,67	156,71	4,17323	4,75562	0,58238
—3	270,15	2,7928	0,7127	0,06226	1,403	16,07	415,87	572,13	156,25	4,17663	4,75516	0,57853
—2	271,15	2,8870	0,7143	0,06028	1,400	16,59	416,84	572,63	155,79	4,18006	4,75478	0,57472
—1	272,15	2,9857	0,7158	0,05844	1,397	17,11	417,76	573,09	155,33	4,18341	4,75432	0,57091
0	273,15	3,0857	0,7173	0,05667	1,394	17,65	418,68	573,55	154,87	4,18680	4,75394	0,56714
1	274,15	3,1882	0,7189	0,05496	1,391	18,20	419,60	574,01	154,41	4,19019	4,75348	0,56329
2	275,15	3,2934	0,7205	0,05330	1,388	18,76	420,56	574,47	153,91	4,19354	4,75302	0,55948
3	276,15	3,4006	0,7220	0,05166	1,385	19,35	421,49	574,93	153,45	4,19693	4,75265	0,55571
4	277,15	3,5112	0,7241	0,05012	1,381	19,95	422,45	575,39	152,94	4,20028	4,75227	0,55199

Продолжение табл. 30

Температура		Давление абсолютное p, бар	Удельный объем		Плотность		Энтальпия		Теплота парообразования r, кДж/кг	Энтропия		Отношение теплоты парообразования к абсолютной температуре, кДж/(кг·К)
t, °С	T, К		жидкости v', дм³/кг	пара v'', м³/кг	жидкости ρ', кг/дм³	пара ρ'', кг/м³	жидкости h', кДж/кг	пара h'', кДж/кг		жидкости s', кДж/(кг·К)	пара s'', кДж/(кг·К)	
5	278,15	3,6244	0,7257	0,04863	1,378	20,56	423,37	575,85	152,48	4,20363	4,75189	0,54826
6	279,15	3,7398	0,7273	0,04721	1,375	21,18	424,33	576,31	151,98	4,20702	4,75152	0,54449
7	280,15	3,8587	0,7289	0,04583	1,372	21,82	425,30	576,77	151,48	4,21037	4,75118	0,54081
8	281,15	3,9797	0,7310	0,04450	1,368	22,47	426,22	577,19	150,98	4,21372	4,75080	0,53708
9	282,15	4,1044	0,7326	0,04323	1,365	23,13	427,18	577,65	150,47	4,21707	4,75043	0,53336
10	283,15	4,2301	0,7342	0,04204	1,362	23,79	428,14	578,11	149,97	4,22042	4,75013	0,52971
11	284,15	4,3606	0,7358	0,04086	1,359	24,48	429,14	578,53	149,43	4,22377	4,74976	0,52599
12	285,15	4,4354	0,7380	0,03970	1,355	25,19	430,07	578,99	148,92	4,22712	4,74946	0,52235
13	286,15	4,6296	0,7396	0,03858	1,352	25,92	431,03	579,41	148,38	4,23043	4,74909	0,51866
14	287,15	4,7681	0,7413	0,03751	1,349	26,66	431,99	579,83	147,84	4,23378	4,74875	0,51498
15	288,15	4,9108	0,7435	0,03648	1,345	27,41	433,00	580,33	147,33	4,23708	4,74842	0,51133
16	289,15	5,0553	0,7452	0,03547	1,342	28,18	433,96	580,71	146,75	4,24043	4,74812	0,50769
17	290,15	5,2041	0,7468	0,03449	1,339	28,99	434,92	581,17	146,24	4,24378	4,74783	0,50405
18	291,15	5,3549	0,7491	0,03354	1,335	29,87	435,93	581,59	145,65	4,24709	4,74750	0,50041
19	292,15	5,5086	0,7507	0,03263	1,332	30,65	436,89	582,01	145,11	4,25040	4,74720	0,49764
20	293,15	5,6669	0,7524	0,03175	1,329	31,50	437,90	582,47	144,57	4,25371	4,74691	0,49321
21	294,15	5,5883	0,7547	0,03089	1,325	32,38	438,86	582,84	143,98	4,25705	4,74662	0,48960
22	295,15	5,9930	0,7570	0,03005	1,321	33,28	439,87	583,26	143,40	4,26036	4,74633	0,48596
23	296,15	6,1610	0,7587	0,02925	1,318	34,19	440,83	583,64	142,81	4,26363	4,74604	0,48236
24	297,15	6,3335	0,7605	0,02848	1,315	35,11	441,83	584,06	142,23	4,26694	4,74575	0,47880
25	298,15	6,5080	0,7628	0,02773	1,311	36,07	442,84	584,52	141,68	4,27024	4,74549	0,47524
26	299,15	6,6857	0,7645	0,02700	1,308	37,04	443,84	584,90	141,05	4,29993	4,74519	0,47164
27	300,15	6,8666	0,7669	0,02629	1,304	38,04	444,85	585,27	140,43	4,27686	4,74486	0,46800

Температура		Давление абсолютное p, бар	Удельный объем		Плотность		Энтальпия		Теплота парообразования r, кДж/кг	Энтропия		Отношение теплоты парообразования к абсолютной температуре, кДж/(кг·К)
t, °С	T, К		жидкости v', дм³/кг	пара v'', м³/кг	жидкости ρ', кг/дм³	пара ρ'', кг/м³	жидкости h', кДж/кг	пара h'', кДж/кг		жидкости s', кДж/(кг·К)	пара s'', кДж/(кг·К)	
28	301,15	7,0542	0,7692	0,02560	1,300	39,06	445,85	585,69	139,84	4,28012	4,74457	0,46444
29	302,15	7,2435	0,7710	0,02494	1,297	40,10	446,86	586,07	139,21	4,28339	4,74427	0,46088
30	303,15	7,4344	0,7734	0,02433	1,293	41,11	447,86	586,49	138,62	4,28674	4,74406	0,45732
31	304,15	7,6321	0,7758	0,02371	1,289	42,18	448,87	586,82	137,96	4,29000	4,74369	0,45368
32	305,15	7,8352	0,7782	0,02309	1,285	43,31	449,87	587,20	137,33	4,29327	4,74339	0,45012
33	306,15	8,0417	0,7800	0,02250	1,282	44,45	450,88	587,58	136,70	4,29649	4,74306	0,44656
34	307,15	8,2461	0,7825	0,02192	1,278	45,62	451,92	587,95	136,03	4,29980	4,74281	0,44301
35	308,15	8,4596	0,7849	0,02136	1,274	46,81	452,93	588,29	135,36	4,30311	4,74251	
40	313,15	9,5818	0,7968	0,01882	1,255	53,13	458,08	590,09	132,01	4,31940	4,74097	
45	318,15	10,810	0,8104	0,01656	1,234	60,38	463,31	591,72	128,41	4,33568	4,73933	
50	323,15	12,147	0,8244	0,01459	1,213	68,56	468,54	593,10	124,56	4,35189	4,73741	
55	328,15	13,600	0,8410	0,01316	1,189	75,98	474,16	595,07	120,91	4,36876	4,73728	
60	333,15	15,182	0,8568	0,01167	1,167	85,69	479,68	596,58	116,90	4,38509	4,73850	
65	338,15	16,883	0,8741	0,01036	1,114	96,52	485,33	597,96	112,63	4,40142	4,73452	
70	343,15	18,727	0,8936	0,00919	1,102	108,81	491,07	599,09	108,02	4,41787	4,73226	
75	348,15	20,717	0,9149	0,00814	1,093	122,85	496,93	600,01	103,08	4,43432	4,73041	
80	353,15	22,840	0,9498	0,00724	1,064	138,31	502,96	600,64	97,68	4,45099	4,72761	
85	358,15	25,124	0,9680	0,00649	1,033	156,49	509,16	600,85	91,69	4,46765	4,72367	
90	363,15	27,564	1,0009	0,00564	0,999	177,30	515,48	600,43	84,95	4,48469	4,71861	
95	368,15	30,176	1,0416	0,00497	0,960	201,20	522,05	599,17	77,12	4,50202	4,71153	
100	373,13	32,964	1,0952	0,00437	0,914	228,83	529,04	596,66	67,62	4,51986	4,70102	
105	378,15	35,945	1,1736	0,00359	0,852	278,48	536,46	592,47	56,01	4,53878	4,65204	
110	383,15	39,103	1,3513	0,00266	0,742	374,93	550,31	581,50	31,19	4,57065	4,65204	

Список литературы

1. Андрющенко А. И. Термодинамические расчеты оптимальных параметров тепловых электростанций. — М.: Высшая школа, 1963. — 287 с.
2. Термодинамические свойства индивидуальных веществ/ Под ред. В. П. Глушко. — М.: Изд-во АН СССР, 1962. — 916 с.
3. Ривкин С. Л. Термодинамические свойства газов. — М.: Энергия, 1964. — 288 с.
4. Вукалович М. П., Ривкин С. Л., Александров А. А. Таблицы теплофизических свойств воды и водяного пара. — М.: Изд-во стандартов, 1969. — 408 с.
5. Термодинамические свойства газов/ М. П. Вукалович, В. А. Кириллин, С. А. Ремизов, В. С. Силецкий, В. И. Тимофеев. — М.: Машгиз, 1953. — 373 с.
6. Кириллин В. А., Сычев В. В., Шейндлин А. Е. Техническая термодинамика. — М.: Наука, 1979. — 512 с.
7. Дейч М. Е. Техническая газодинамика — М.: Госэнергоиздат, 1953. — 592 с.
8. Гохштейн Д. П. Современные методы термодинамического анализа энергетических установок. — М.: Энергия, 1969. — 368 с.
9. Зубарев В. Н., Маркин В. А. Диаграмма влажного воздуха для давлений от 1 до 15 кгс/см². — Теплоэнергетика, 1961, № 7, с. 4.
10. Карапетьянц М. Х. Химическая термодинамика. — М.: Химия, 1975. — 584 с.
11. Вукалович М. П., Алтунин В. В. Теплофизические свойства двуокиси углерода. — М.: Атомиздат, 1965. — 455 с.
12. Бадылкес И. С. Рабочие вещества и процессы холодильных машин — М.: Госторгиздат, 1962. — 280 с.
13. Теплофизические свойства веществ/ Под ред. Н. Б. Варгафтика. — М.: Госэнергоиздат, 1956. — 376 с.
14. Варгафтик Н. Б. Справочник по теплофизическим свойствам газов и жидкостей. — М.: Физматгиз, 1963. — 708 с.
15. Вассерман А. А., Казавчинский Я. З., Рыбинович В. А. Теплофизические свойства воздуха и его компонентов. — М.: Наука, 1966. — 375 с.

ОГЛАВЛЕНИЕ

Предисловие 3
Глава первая. Параметры состояния 4
Глава вторая. Первый закон термодинамики 9
Глава третья. Законы и уравнение состояния идеальных газов 13
Глава четвертая. Теплоемкость, энтальпия и внутренняя энергия газов в идеальном состоянии 18
Глава пятая. Смеси идеальных газов 24
Глава шестая. Процессы изменения состояния идеальных газов 30
Глава седьмая. Второй закон термодинамики 46
Глава восьмая. Реальные газы 62
Глава девятая. Свойства воды и водяного пара; процессы изменения его состояния 81
Глава десятая. Влажный воздух 94
Глава одиннадцатая. Истечение и дросселирование газов и паров 102
Глава двенадцатая. Компрессоры и циклы двигателей внутреннего сгорания 125
Глава тринадцатая. Циклы газотурбинных установок и реактивных двигателей 131
Глава четырнадцатая. Циклы паротурбинных установок 142
Глава пятнадцатая. Циклы холодильных машин . . . 162
Глава шестнадцатая. Элементы термодинамики химических процессов 168
Приложение 177
Список литературы 240