Т. Н. АНДРИАНОВА, Б. В. ДЗАМПОВ,
В. Н. ЗУБАРЕВ, С. А. РЕМИЗОВ

СБОРНИК ЗАДАЧ ПО ТЕХНИЧЕСКОЙ ТЕРМОДИНАМИКЕ

Под ред. проф. М. П. ВУКАЛОВИЧА

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

ИЗДАТЕЛЬСТВО „ЭНЕРГИЯ"
МОСКВА 1964 ЛЕНИНГРАД

ЭТ-5-2
УДК 621 036.7 (076.1)
А 65

Задачник составлен в соответствии с программой курса «Техническая термодинамика» для теплотехнических и теплофизических специальностей энергетических вузов и факультетов.

Все задачи снабжены ответами, а наиболее типичные — подробными решениями.

Предлагаемый задачник предназначен в качестве учебного пособия для студентов теплотехнических и теплофизических специальностей энергетических втузов и факультетов и отвечает соответствующей программе курса «Техническая термодинамика». Задачник может быть использован при упражнениях на практических занятиях в аудитории и дома. Этой книгой могут пользоваться и студенты других, неэнергетических втузов.

Андрианова Тамара Николаевна, Дзампов Борис Васильевич, Зубарев Владимир Николаевич, Ремизов Серафим Александрович

Сборник задач по технической термодинамике

М.—Л., Издательство „Энергия", 1964, 200 с. с черт.
Темплан 1963 г. № 1

Редактор *Л. Н. Синельникова* Техн. редактор *Н. А. Булдяе*

Сдано в набор 24/X 1963 г. Подписано к печати 15/II 196
Т-00870 Бумага 84×108¹/₃₂ 12,5 печ. л. 12,5 изд. л. 1
Тираж 25 000 Цена 47 коп. Заказ

Московская типография № 10 Главполиграфпрома
Государственного комитета Совета Министров СССР по печати
Шлюзовая наб., 10.

ПРЕДИСЛОВИЕ

Работая над задачником, авторы использовали свой опыт педагогической работы в Московском ордена Ленина энергетическом институте и расположили материал в такой последовательности, в какой обычно излагается программа курса в МЭИ

Ввиду того что в Советском Союзе с 1 января 1963 г введена как предпочтительная международная система единиц (СИ), большая часть задач дана в этой системе Авторы испытывали затруднения, применяя ее, в связи с тем, что, составляя задачи, они не располагали нормативными материалами (таблицы и диаграммы одного пара, таблицы термодинамических свойств газов и др.), составленными по новой системе. Часть задач и ответов к ним даны в старых единицах, что авторы считают необходимым, учитывая сложность «переходного» периода. Сущность системы, ее положительные стороны и отличие от технической системы авторы постарались подчеркнуть в решениях некоторых задач раздела «Параметры состояния» и «Первый закон термодинамики»

Содержание некоторых разделов заметно отличается от того материала, который предлагался в ранее изданных задачниках. Так, составляя раздел «Реальные газы», авторы предложили задачи, дающие некоторые понятия о способах обработки экспериментального материала (применение метода конечных разностей, пользование таблицами и диаграммами обобщенных свойств веществ). Эти задачи могут быть полезными для студентов-теплофизиков. Задачи подобного типа могут быть предложены для домашних упражнений

В разделе «Теплоемкость газов в идеальном состоянии» авторы сочли нужным поместить несколько простейших задач на вычисление теплоемкостей газов по формуле Эйнштейна, для того чтобы дать хотя бы некоторое представление о том, как вычисляются термодинамические функции при помощи квантовой теории теплоемкости

В разделе «Влажный воздух» приведены задачи с применением *id*-диаграммы для повышенных давлений воздуха.

В задачах разделов «Циклы газотурбинных установок и реактивных двигателей» и «Циклы паротурбинных установок» обращено внимание на влияние необратимости процессов на к. п. д. установок, а также помещены задачи, рассматривающие новые циклы парогазовых установок

Авторы не сочли необходимым отдельно выделять тему «дифференциальные уравнения термодинамики» и решили применять эти уравнения в соответствующих разделах, там, где это необходимо.

Наиболее характерные задачи приведены с решениями.

Разделы 4, 8, 11 и 15 составлены Т. Н. Андриановой, разделы 2, 5 — Б. В. Дзамповым, разделы 3, 7, 10 и 13 — В. Н. Зубаревым, разделы 1, 6 и 9 — С. А. Ремизовым, раздел 14 — С. А. Ремизовым при участии Б. Б. Дзампова, раздел 12 — Т. Н. Андриановой и Б. В. Дзамповым, раздел 16 — В. Н. Зубаревым и С. А. Ремизовым.

В конце книги, в приложениях, помещен необходимый справочный материал.

Авторы выражают благодарность коллективу кафедры теоретических основ теплотехники МЭИ, рецензенту В. С. Силецкому и титульному редактору М. П. Вукаловичу за целый ряд практических советов.

Авторы будут также благодарны всем читателям за критические замечания, которые позволят в будущем улучшить написанную ими книгу.

Авторы

СОДЕРЖАНИЕ

Предисловие 3
Список основных обозначений 6
1. Параметры состояния 7
2. Первый закон термодинамики 14
3. Законы и уравнение состояния идеальных газов 18
4. Теплоемкость газов в идеальном состоянии 24
5. Смеси идеальных газов 31
6. Процессы изменения состояния идеальных газов 40
7. Второй закон термодинамики 54
8. Реальные газы 67
9. Свойства воды и водяного пара; процессы изменения его состояния 82
10. Влажный воздух 97
11. Термодинамика газовых потоков 106
12. Компрессоры; циклы двигателей внутреннего сгорания . . 124
13. Циклы газотурбинных установок и реактивных двигателей 130
14. Циклы паротурбинных установок 141
15. Циклы холодильных машин 157
16. Элементы термодинамики химических процессов 164
Приложения 172
Литература 200

СПИСОК ОСНОВНЫХ ОБОЗНАЧЕНИЙ

m — масса, *кг*, $кГ \cdot сек^2/м$, или массовый расход, *кг/сек*, *кг/ч*.

G — вес, *н*, *кГ*.

μ — молекулярный вес.

μ — масса одного киломоля, *кг/кмоль*.

F — сила, *н*, *кГ*.

S — площадь, $м^2$.

h — высота, *м*.

τ — время, *сек*.

g — ускорение силы тяжести, $м/сек^2$.

T — температура по шкале Кельвина, °К.

t — температура по международной практической шкале 1948 г., °С.

p — давление, $н/м^2$; *бар*, $кГ/м^2$, $кГ/см^2$.

ρ — плотность, $кг/м^3$.

v — удельный объем, $м^3/кг$.

S; s — энтропия, *кдж*/°К, *кдж/кг·*°К; *ккал*/°К, *ккал/кг·*°К.

Q; q — тепло, *кдж*, *кдж/кг*, *ккал*, *ккал/кг*.

U; u — внутренняя энергия, *кдж*, *кдж/кг*, *ккал*, *ккал/кг*.

I; i — энтальпия, *кдж*, *кдж/кг*, *ккал*, *ккал/кг*.

H — энтальпия, *ккал/кмоль*.

L, l — работа, *кдж*, *кдж/кг*, $кГ \cdot м$, $кГ \cdot м/кг$.

N — мощность, *вт*, *квт*.

c — удельная теплоемкость, $кдж/кг \cdot град$.

c' — удельная теплоемкость, $кдж/м^3_н \cdot град$.

r — теплота парообразования, *кдж/кг*, *ккал/кг*.

x — паросодержание (степень сухости пара).

g — массовая доля.

r — объемная (мольная) доля

d — влагосодержание влажного воздуха, *г/кг* с. в.

c — скорость потока газа, *м/сек*.

η_t — термический к. п. д. цикла.

η_{oi} — относительный внутренний к. п. д.

η_{oe} — относительный эффективный к. п. д.

η_{oe} — относительный электрический к. п. д.

η_i — внутренний к. п. д.

a_i — дифференциальный адиабатический дроссельэффект, $град \Big/ \frac{кГ}{см^2}$.

ε — степень сжатия.

β — степень повышения давления

ρ — степень предварительного расширения.

ε — холодильный коэффициент.

Θ — характеристическая температура, °К.

1. 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 силы тяжести $g_{90°} = 9{,}8324$ *м/сек*². Каков вес свинца, выраженный в ньютонах и в килограммах-сила? Что покажут пружинные весы на экваторе, где $g_{0°} = 9{,}7805$ *м/сек*²?

Решение

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

$$G = mg.$$

Определяя его в международной системе единиц СИ (ГОСТ 9867-61), получим, учитывая, что $m = \rho V$:

$$G_{90°} = \rho \; кг/м^3 \cdot V \; м^3 \cdot g_{90°} \; м/сек^2 = 11\,300 \cdot 0{,}001 \cdot 9{,}8324 = 111{,}11 \; н.$$

Прежде чем подсчитать вес в килограммах-сила (*кгс* или *кГ*), необходимо вспомнить, что эта единица была установлена в системе механических единиц МКГСС (метр — килограмм-сила — секунда) на основании того же второго закона Ньютона. За 1 *кГ* была принята такая сила, с которой тело, имеющее массу, равную массе международного прототипа килограмма, притягивается к земле при так называемом «нормальном» ускорении[1] силы тяжести $g_н = 9{,}80665$ *м/сек*². При этом техническая единица массы получила сложную размерность: 1 *т. е. м.* = 1 *кГ* · *сек*²/*м*.

Нетрудно сообразить, что 1 *кГ* эквивалентен $9{,}80665$ *кг* · *м/сек*² = $9{,}80665$ *н*, а 1 *т. е. м.* = 1 *кГ* · *сек*²/*м* эквивалентна $9{,}80665$ *кг*. Следовательно, для того чтобы найти вес G *кГ*, нужно вес в ньютонах разделить на величину $9{,}80665$ *н/кГ*, которая лишь численно равна нормальному ускорению силы тяжести, 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.

[1] Нормальное ускорение $g_н$ имеет место на географической широте φ, близкой к 45°, на уровне океана.

Вес свинца, выраженный по системе МКГСС, будет равен:

$$G_{90^\circ} = \frac{111{,}11\ н}{9{,}80665\ н/кГ} = 11{,}333\ кГ.$$

Для случая измерения веса на экваторе получим соответственно:

$$G_{0^\circ} = 110{,}52\ н,\ \text{или: } 11{,}270\ кГ.$$

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

Ясным становится и то, что величина, называемая «удельным весом» (γ, *н/м*^{3}, *или кГ/м*^{3}), по той же причине не может служить табличной величиной. Приводимые в многочисленных таблицах физических свойств веществ, составленных по опытным данным, значения γ всегда приведены к нормальному ускорению силы тяжести, если взвешивание в опыте произведено при помощи пружинных динамометров той или иной конструкции. При этом удельный вес γ численно становится равным массе вещества ρ.

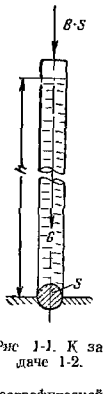


Рис. 1-1. К задаче 1-2.

При пользовании системой единиц СИ в подавляющем большинстве случаев употребляется величина ρ, *кг/м*^{3}, и обратная ей величина — «удельный объем» (объем единицы массы) $v = 1/\rho$, *м*^{3}*/кг*.

1-2. Определить силу F, приложенную к горизонтальной плоской площадке $S = 4$ *см*^{2} (рис. 1-1), находящуюся под столбом воды высотой $h = 10$ *м*. Измерение h произведено в Баку (географическая широта $\varphi = 40^\circ 20'$) на уровне океана при барометрическом давлении $B = 1\,010$ *мбар* (миллибар) и при температуре окружающего воздуха $t = 20^\circ$ С. Вода, имеющая ту же температуру, обладает плотностью $\rho = 0{,}9982$ *г/см*^{3}.

Какой будет эта сила, если опыт поставить в Мурманске ($\varphi = 69^\circ$) *при тех же прочих условиях?*

Ускорение силы тяжести g_φ, зависящее от географической широты φ точки земной поверхности, можно подсчитать по приближенной формуле

$$g_\varphi = 9{,}80665\,(1 + 0{,}0026\cos 2\varphi),\ м/сек^2.$$

Ответ: В Баку — 79,54 *н*; в Мурманске — 79,63 *н*.

1-3. Манометр, установленный в открытой кабине самолета, находящегося на земле, и измеряющий давление масла, показывает 6 *кГ/см*^{2} при показании барометра 752 *мм рт. ст.*

1) Каково абсолютное давление масла, выраженное в *н/м*^{2}, в *бар*, в *кГ/м*^{2}, в *кГ/см*^{2}, в *мм рт. ст.*, в *мм вод. ст.*, в *lb/sq.in*?

2) Каково будет показание манометра, выраженное в этих же единицах, *после подъема самолета на некоторую высоту, где* атмосферное давление $B = 0{,}590$ *бар*, если абсолютное давление остается неизменным?

Ускорение силы тяжести считать нормальным (g_n=9,80665 *м/сек²*) и не зависящим от высоты подъема самолета. Плотности ртути и воды принимать, соответственно, при 0° С и 4° С *.

Ответ: 1) p=6,89·10⁵ *н/м²*=6,89 *бар*=70 223 *кГ/м²*=7,02 *кГ/см²*=5 165 *мм рт. ст.*=70 223 *мм вод. ст.*=99,9 *lb/sq.in.*

2) $p_{\text{изб}}$=6,297·10⁵ *н/м²*=6,297 *бар*=6,421·10⁴ *кГ/м²*=6,421 *кГ/см²*=4 723 *мм рт. ст*=6,421·10⁴ *мм вод. ст*=91,3 *lb/sq·in.*

1-4. Для точного измерения давлений или для поверки образцовых пружинных манометров применяются грузопоршневые манометры системы Индрика.

Устройство такого манометра показано на схематическом чертеже рис. 1-2.

В измерительной колонке *1* имеется канал, в котором ходит притертый поршень 2 малого диаметра. С поршнем соединена грузоприемная тарелка *3*, на которую накладываются грузы, точный вес которых известен. Внутренние полости манометра заполняются касторовым маслом через штуцер *7*. Штуцер *4* служит для соединения со средой, давление которой измеряется. Штуцер *5* предназначен для присоединения поверяемых манометров. Давление во внутренних полостях манометра может быть создано при помощи пресса *6*

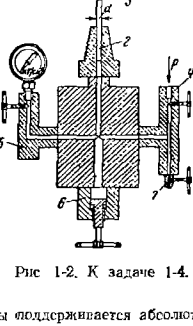


Рис 1-2. К задаче 1-4.

Определить абсолютное давление в исследуемой среде, если в состоянии равновесия на тарелке оказалось пять грузов по 5 *кг*, два груза по 1 *кг* и 550 *г* мелкого разновеса.

Барометр показывает B=746 *мм рт. ст.* Площадь поршня 2—f=0,05 *см²*.

Ответ: p=54 134 *кн/м²*=541,34 *бар*=552,01 *кГ/см²*.

1-5. В конденсаторе паровой турбины поддерживается абсолютное давление p=0,04 *кГ/см²*. Каковы показания вакуумметров, градуированных в *кн/м²* и в *мм рт. ст.*, если в одном случае показания барометра составляют 735 *мм рт. ст.*, а в другом—764 *мм. рт. ст*?

Чему равны показания вакуумметра в этих же условиях, если его шкала проградуирована в английских фунтах на квадратный дюйм?

Ответ: 1) $P_{\text{вак}}$=94,06 *кн/м²*=706 *мм рт. ст.*=13,64 *lb/sq.in.*

2) $P_{\text{вак}}$=97,93 *кн/м²*=735 *мм рт. ст.*=14,20 *lb/sq.in.*

1-6. Для измерения малых избыточных давлений или небольших разрежений употребляются микроманометры.

Принципиальная схема этого прибора представлена на рис. 1-3.

---

* Эти же условия ($g=g_n$; $\rho_{рт}=\rho_{рт,0°\,C}$; $\rho_{воды}=\rho_{воды,4°\,C}$ следует принимать в последующих задачах, если не делается специальных указаний.

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

Рабочая жидкость — спирт с плотностью $\rho = 0{,}8$ *г/см*³.

Показание барометра $B = 1\,020$ *мбар*. Давление выразить в *бар*, *мм рт. ст.* и *кГ/см*².

Ответ: $p_{абс} = 1{,}027$ *бар* $= 770$ *мм рт ст.* $= 1{,}047$ *кГ/см*².

1-7. Для измерения расхода жидкостей и газов употребляются дроссельные диафрагмы. Схема измерения (рис. 1-4) такова.

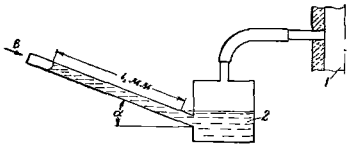


Рис 1-3 К задаче 1-6.
1 — воздухопровод, *2* — микроманометр, заполненный спиртом

Текущая по трубе жидкость проходит через дроссельную диафрагму *1*. В результате дросселирования давление за диафрагмой оказывается меньшим, чем давление перед ней. Перепад давления на диафрагме измеряется дифференциальным U образным манометром *2*. Массовый расход жидкости подсчитывается по формуле вида

$$m_{сек} = kf\sqrt{2\Delta p\rho}, \quad кг/сек,$$

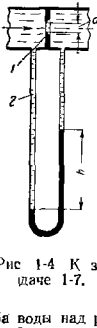


Рис 1-4 К задаче 1-7.

где $m_{сек}$ — искомый массовый расход жидкости, *кг/сек*;
k — постоянный коэффициент;
f — площадь входного отверстия диафрагмы, *м*²;
Δp — перепад давления на диафрагме, *н/м*²;
ρ — плотность текущей жидкости, *кг/м*³.

Определить часовой расход воды, измеренный при помощи этого устройства, если $k = 0{,}6$; $\rho = 0{,}998$ *г/см*³; показание дифференциального манометра $h = 22$ *мм рт. ст.*; диаметр входного отверстия диафрагмы $d = 10$ *мм*.

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

Ответ: $m_{сек} = 527$ *кг/ч*. Ошибка в сторону преувеличения на 3,9%.

403—1

1-8. В паросборнике находится водяной пар в количестве 300 *кг*. Определить объем паросборника V, *м*³, если удельный объем пара $v=20{,}2$ *см*³/*г*.

Ответ: $V=60{,}6$ *м*³.

1-9. Связь между международной практической шкалой температур 1948 г (в градусах Цельсия и Кельвина) и шкалой Фаренгейта показана в виде схемы на рис. 1-5.

Вывести самостоятельно формулы для взаимного пересчета показаний термометров с этими шкалами



Рис. 1-5. К задаче 1-9.

1-10. Перевести в °C следующие температуры, измеренные термометром со шкалой Фаренгейта:

—275° F, 24° F, 162° F, 1 465° F

Перевести в °F следующие температуры, измеренные в градусах Цельсия:

—186° C; —12° C; 127° C, 893° C

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

2) —302,8° F; 10,40° F; 260,6° F; 1 639° F.

1-11. Наинизшая температура воздуха, зафиксированная в Антарктике, составляет —84° C (по данным 1960 г)

Выразить ее в градусах Фаренгейта.

Ответ: —119,2° F

1-12. При установлении своей шкалы Фаренгейт принял за 100° нормальную температуру человеческого тела. Какова, по мнению Фаренгейта, эта температура в °C?

Ответ: 37,8 °C.

1-13. Какова температура абсолютного нуля по шкале Фаренгейта?

Ответ: —459,67 °F.

1-14. При проведении технических и научных работ часто измеряется непосредственно разность температур (например, при помощи дифференциальных термопар).

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

Ответ: $\Delta t = 119{,}44°$ C.

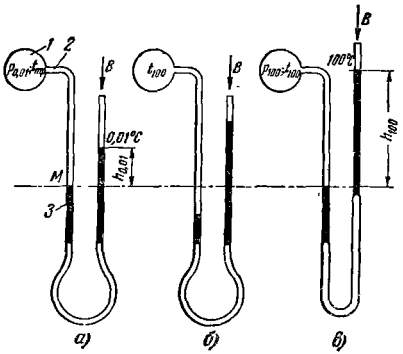


Рис. 1-6 К задаче 1-17.

1-15. В США употребляется абсолютная шкала Рэнкина [1], в которой за нуль принята температура абсолютного нуля, а цена деления такая же, как и цена деления шкалы Фаренгейта. Какова температура t по этой абсолютной шкале, если известно, что $t = 520°$ C?

Ответ: 1 428° Ra.

1-16. Термометры показывают 315° C и —440° F. Каковы в этих случаях значения абсолютных температур в шкалах Кельвина и Рэнкина?

Ответ: 1) $t = 588{,}15°$ K $= 1058{,}67°$ Ra.

2) $t = 10{,}93°$ K $= 19{,}67°$ Ra.

1-17. Для построения температурных шкал и иногда для непосредственных измерений употребляются гелиевые газовые термометры постоянного объема.

Схема такого термометра изображена на рис. 1-6.

Баллон *1* заполнен гелием при некотором положительном избыточном давлении. Этот баллон соединен трубкой *2* с U-образным манометром *3*, правое, открытое колено которого подвижно.

[1] Температура по этой шкале обозначается °Ra.

В положении *а* баллон находится в среде с температурой $t_{тр}$ тройной точки воды* При этом положение мениска ртути в правом колене соответствует точке 0,01 на шкале термометра.

Если теперь баллон *I* поместить в среду с парами кипящей воды при $p_н = 101\,325$ *н/м²*, то давление гелия в баллоне возрастет, мениск ртути в левом колене опустится, а в правом поднимется (положение *б*). Чтобы количество вещества в процессе изменения состояния гелия, необходимо поднять мениск ртути в левом колене до исходного уровня *М* (положение *в*). Тогда положение мениска ртути в правом колене будет соответствовать второй опорной точке международной практической шкалы температур 1948 г. — точке 100.

Подобным же образом фиксируются показания термометра при других постоянных температурах: температуре кипения кислорода, кипения серы (или затвердевания цинка), затвердевания серебра и золота (все температуры — при нормальном давлении). Для максимального приближения к термодинамической шкале температур вводятся поправки на отклонения свойств гелия от идеального газа. Для интерполяции шкалы существуют специальные приборы и расчетные формулы.

На основании опыта с гелиевым газовым термометром при $V = \text{const}$ определить температуру t_0° С абсолютного нуля в градусах международной практической температурной шкалы 1948 г. (градусы Цельсия).

Найдено, что при температуре в тройной точке $t_{тр} = 0{,}01$° С перепад давления $h_{0\,01} = 1\,000$ *мм рт. ст.*, а при температуре кипения воды $t = 100$° С $h_{100} = 1644{,}25$ *мм рт. ст.*

Показания барометра $B = 760$ *мм рт. ст.*

Решение

Абсолютная температура T° К связана с температурой следующим соотношением:

$$T = t + (-t_0),\ ^\circ\text{К}.$$

Для нахождения искомой t_0 воспользуемся законом Гей-Люссака:

$$\frac{p_{0.01}}{p_{100}} = \frac{T_{тр}}{T_{100}} = \frac{0{,}01 - t_0}{100 - t_0},$$

где

$$p_{0.01} = h_{0.01} + B = 1\,000 + 760 = 1\,760\ \textit{мм рт. ст.};$$

$$p_{100} = h_{100} + B = 1\,644{,}25 + 760 = 2404{,}25\ \textit{мм рт. ст.}$$

Таким образом,

$$p_{0.01}\,(100 - t_0) = p_{100}\,(0{,}01 - t_0),$$

* Тройной точкой определяется такое состояние вещества, при котором сосуществуют и находятся в равновесии все три фазы его: жидкая, твердая и газообразная. Для воды абсолютное давление в тройной точке $p_{тр} = 0{,}006228$ *кГ/см²* и температура $t_{тр} = 0{,}01$° С Согласно ГОСТ 8550-61 температура тройной точки воды принята за одну из основных опорных точек международной практической шкалы температур 1948 г.

откуда

$$t = \frac{100 p_{0,01} - 0{,}01 p_{100}}{p_{0,01} - p_{100}} = \frac{100 \cdot 1760{,}00 - 0{,}01 \cdot 2404{,}25}{1760{,}00 - 2404{,}25} = -273{,}15^\circ \text{ C}.$$

1-18. Определить перепад давления h в U образной трубе *3* (рис. 1-6) газового термометра постоянного объема после помещения рабочего баллона *1* в пары кипящего кислорода (находящиеся в равновесии с жидким кислородом при нормальном давлении) и приведения термометра в положение *в*. Температура этих паров (температура кипения кислорода) $t = -182{,}97^\circ$ C является одной из опорных точек международной практической шкалы температур. Перепад давления при температуре в тройной точке воды $h_{0,01} = 133{,}322$ *кн/м²*. Барометрическое давление $B = 1013{,}25$ *мбар*.

Ответ: В баллоне образуется вакуум.

$$p_{\text{вак}} = 179 \text{ мм рт ст}.$$

2. ПЕРВЫЙ ЗАКОН ТЕРМОДИНАМИКИ

2-1. Выразить теплоемкость $c_T = 0{,}547$ *ккал/кг · град* в килоджоулях.

Ответ: $c_T = 2{,}289$ *кдж/кг · град*

2-2. До сих пор во многих странах применяется британская тепловая единица *BTU*. Она определяется как количество тепла, необходимое для нагревания одного английского фунта воды на 1 °F.

Выразить 1 *BTU*, 1 *BTU/lb* и 1 *BTU/lb · °F* соответственно в *кдж*, *ккал*, *кдж/кг*, *ккал/кг*, *кдж/кг · град* и *ккал/кг · град*, приняв во внимание, что 1 англ. фунт (1 *lb*) равен 0,45359 *кг*.

Ответ: 1 *BTU* = 1,055 *кдж* = 0,252 *ккал*; 1 *BTU/lb* = 2,326 *кдж/кг* = = 0,556 *ккал/кг*; 1 *BTU/lb · °F* = 4,187 *кдж/кг · град* = 1,000 *ккал/кг · град*.

2-3. В калориметры, содержащие по 0,500 *кг* воды при температуре 30° С, опускают образцы металлов весом по 0,500 *кг*. Температура каждого образца равна 150,0° С. После того как были опущены образцы серебра, стали и магния, температура в соответствующих калориметрах оказалась равной 37,3° С, 42,1° С и 54,0° С.

Определить теплоемкости металлов, пренебрегая массой калориметров.

Ответ: $c_{Ag} = 0{,}271$ *кдж/кг · град* $= 0{,}065$ *ккал/кг · град*;

$c_{ст} = 0{,}469$ *кдж/кг · град* $= 0{,}112$ *ккал/кг · град*;

$c_{Mg} = 1{,}047$ *кдж/кг · град* $= 0{,}250$ *ккал/кг · град*.

2-4. Стальной образец массой 0,2 *кг* долгое время выдерживается в нагревательной печи. Затем он быстро опускается в калориметр с 0,5 *кг* воды при $t = 20^\circ$ С. Температура воды в калориметре после установления равновесного состояния становится равной 75° С.

Какова температура в нагревательной печи? Теплоемкость образца взять из ответа на предыдущую задачу.

Ответ: 1 291° С

2-5. Выразить 1 *квт · ч* и 1 *л. с · ч* (лошадиная сила-час) в килоджоулях, килокалориях, килограммометрах и килоджоулях.

Ответ: См. приложение, табл. 7.

2-6. Мощность станции 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 $Q_н^р = 6\,700$ *ккал/кг*?

Ответ: $B = 5{,}14$ *т/ч*.

2-7. Определить суточный расход топлива на станции мощностью $N = 100\,000$ *квт*, если ее к. п. д. $\eta_{ст} = 0{,}35$, а теплота сгорания топлива $Q_н^р = 30\,000$ *кдж/кг*.

Определить также удельный расход топлива *b* на 1 *Мдж* выработанной энергии

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

2-8 Сколько килограммов свинца можно нагреть от температуры 15° С до температуры его плавления $t = 327°$ С посредством удара молота массой в 200 *кг* при падении его с высоты 2 *м*, если считать, что вся энергия падения молота превращается в тепло, которое целиком поглощается свинцом? Теплоемкость свинца $c_{Pb} = 0{,}1200$ *кдж/кг · град*

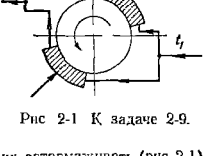


Рис 2-1 К задаче 2-9.

Ответ: 0,0969 *кг*

2-9. При испытании двигателей для определения мощности необходимо их затормаживать (рис 2-1). При этом работа, произведенная двигателем, расходуется на преодоление сил трения и превращается в тепло, часть которого (~ 20%) рассеивается в окружающей среде, а остальная часть отводится охлаждающей тормоз водой.

Сколько воды необходимо подводить к тормозу за 1 *ч*, если его крутящий момент $M_{кр} = 2\,000$ *дж*, число оборотов $n = 1\,500$ *об/мин*, а допустимое повышение температуры воды равно $\Delta t = 35°$ С? Теплоемкость воды принять равной $c = 1$ *ккал/кг · град*.

Решение

Мощность двигателя целиком переходит в тепло трения, выделяемое в единицу времени, а 80% этого тепла поглощается водой. Поэтому энергетический баланс можно записать так:

$$0{,}80N = m_в c \Delta t,$$

где $m_в$ — массовый расход воды, *кг/сек*;
c — ее теплоемкость, *дж/кг · град*,

$$N = \frac{2\pi n M_{кр}}{60} \text{ — мощность двигателя, } вт.$$

Отсюда

$$m_в = \frac{2\pi n M_{кр} \cdot 0{,}80}{60 c \Delta t} = \frac{6{,}2832 \cdot 1\,500 \cdot 2\,000 \cdot 0{,}80}{60 \cdot 4{,}1868 \cdot 10^3 \cdot 35} =$$

$$= 1{,}717 \text{ } кг/сек \approx 6\,180 \text{ } кг/ч.$$

2-10. При торможении двигателя охлаждающая тормозные колодки вода нагревается на 30° С Расход воды составляет $m_в = 1\,500$ *кг/ч*.

Определить мощность двигателя N, *квт*, если 25% тепла трения рассеивается в окружающую среду.

Ответ: $N = 69{,}8$ *квт*.

2-11. Испытание двигателя ведется с помощью присоединенного к нему генератора. Напряжение на клеммах генератора постоянного тока $U = 220$ *в*, сила тока $I = 50$ *а*, к п д. генератора $\eta_г = 0{,}98$

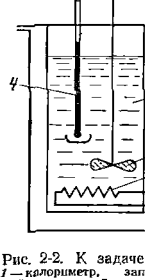


Рис. 2-2. К задаче 2-12.
1 — калориметр, заполненный маслом; *2* — мешалка; *3* — нагреватель, *4* — термометр.

Определить мощность двигателя в *квт*

Ответ: $N = 11{,}2$ *квт*.

2-12. Для определения теплоемкости масла используется калориметр, принципиальная схема которого представлена на рис 2 2.

В опыте с таким калориметром получены следующие данные: падение напряжения на нагревателе $\Delta U = 43$ *в*; сила тока $I = 6$ *а* За время опыта $\tau = 12$ *мин* температура масла (масса которого $m = 3$ *кг*) возросла на $\Delta t = 18$ *град*.

Равнее, специально проведенным опытом было найдено так называемое тепловое значение А собственно калориметра, т. е то количество энергии, которое нужно сообщить калориметрическому сосуду, мешалке и термометру, для того чтобы нагреть всю эту калориметрическую систему на 1 *град*. Оказалось, что $A = 3\,120$ *дж/град*.

Какова теплоемкость масла?

Ответ: $c = 2\,400$ *дж/кг · град* $= 0{,}573$ *ккал/кг · град*.

2-13. Мешалка калориметра (рис 2-2) приводится в движение серводвигателем типа Уоррена мощностью $N = 10$ *вт*.

Следует ли при подсчете теплоемкости масла учитывать джоулево тепло, возникающее в результате трения лопастной мешалки о масло, если считать, что маслу передается половина энергии, потребляемой двигателем, и если суммарная погрешность калориметрического опыта равна ±0,1%? Условия опыта такие же, как в задаче 2-12.

Ответ: Следует, потому что тепло, вносимое нагревателем, составляет 3 440 *дж/кг · град*, а джоулево тепло мешалки равно 67 *дж/кг · град*, что составляет 1,9%.

2-14. Работа расширения 0,5 *кг* газа составляет $L = 10$ *кдж*. При этом от газа отнимается 10 *ккал* тепла.

Как изменится удельная (на 1 *кг*) внутренняя энергия в результате совершения процесса?

Ответ: Внутренняя энергия уменьшится на 103,7 *кдж/кг*.

2-15. При температуре $t = 0{,}01°$ С и давлении $p = 0{,}006228$ *кГ/см²* (тройная точка) энтальпия воды принимается равной нулю. Чему равна при этих условиях внутренняя энергия u' воды?

Решение

В соответствии с определением энтальпии можно записать: $i=u+pv$. Отсюда внутренняя энергия воды в тройной точке

$$u'=i'-pv',$$

так как $i'=0$, то

$$u'=-pv'.$$

Рассчитаем значение u' в единицах СИ:

$$u'=-0{,}006228\ кГ/см^2\cdot 98066{,}5\ \frac{н}{м^2}\Big/\frac{кГ}{см^2}\cdot 0{,}0010002\ м^3/кг=$$

$$=-0{,}6109\ дж/кг.$$

Эта же величина в килокалориях:

$$u'=\frac{-0{,}6109}{4{,}1868}\cdot 10^{-3}=-0{,}1460\cdot 10^{-3}\ ккал/кг.$$

Здесь $98066{,}5\ \frac{н}{м^2}\Big/\frac{кГ}{см^2}$ и $4{,}1868\ дж/кал$ — переводные коэффициенты;

$0{,}0010002\ м^3/кг=v'$ — удельный объем воды в тройной точке, взятый из таблиц воды и водяного пара.

Проведем этот же расчет в системе МКГСС:

$$u'=-0{,}006228\cdot 10^4\ кГ/м^2\cdot 0{,}0010002\ м^3/кг\cdot 9{,}80665\ кг/т.\ е.\ м.=$$

$$=-0.6109\ кГ\cdot м/т.\ е.\ м$$

или в килокалориях:

$$u'=-\frac{0{,}6109}{426{,}94}=-1{,}431\cdot 10^{-3}\ ккал/т.\ е.\ м,$$

где $426{,}94\ кГ\cdot м/ккал$ — механический эквивалент теплоты.

Последний результат получился вполне закономерным, так как 1 *т. е. м* в 9,80665 раз крупнее, чем 1 *кг*.

По поводу приведенного выше решения следует сделать следующие замечания.

В технической практике единица массы, равная 1 *т. е. м.*, не привилась, ею почти никогда не пользуются. В расчетах при пользовании системой МКГСС все удельные величины относят, как правило, не к 1 *т. е. м.*, а к 1 килограмму-массе, смешивая тем самым две различные системы единиц. Запись же ведут следующим образом: либо, например,

$$l=1\ кГ\cdot м/кг;\ c_p=1\ ккал/кг\cdot град;\ v=1\ м^3/кг \text{ и т. д.}$$

либо

$$l=1\ кГ\cdot м/кГ;\ c_p=1\ ккал/кГ\cdot град;\ v=1\ м^3/кГ \text{ и т. д.}$$

И ту и другую форму записи следует признать неосостоятельными. В первом случае запись подчеркивает недопустимое смешение различных систем единиц измерения. Во втором случае формаль-

ного нарушения не делается, но искажается физический смысл величин: невозможно представить себе работу в *кГ · м*, тепло в *ккал*, отнесенными к единице силы (*кГ*), или объем, принадлежащий единице силы

Мы пришли к выводу, что до введения системы СИ в технических расчетах не применялась какая-либо единая система единиц (например, МКГСС), а смешивались две системы: МКГСС (метр—килограмм-сила—секунда) и МКС (метр—килограмм-масса—секунда). Такое, в сущности, незаконное смешение приводило часто к недоразумениям и ошибкам в расчетах

Введение единой международной системы СИ устраняет все эти недоразумения

2-16. При температуре $t_0=0°$ С и абсолютном давлении $p_0=1$ *кГ/см²* энтальпия кислорода O_2 принимается равной нулю.

Чему равна в этих условиях внутренняя энергия этого же газа?

Ответ: $u_0=-70{,}9$ *кдж/кг*.

Указание. воспользоваться уравнением состояния идеального газа.

2-17. Важнейшей характеристикой работы двигателя является отношение количества выработанной энергии к количеству энергии, которое выделяет топливо, потребляемое двигателем. Это отношение называется коэффициентом полезного действия двигателя η

Определить к. п. д. автомобильного двигателя в 60 *л. с* при часовом расходе топлива в 7,4 *кг/ч* Теплоту сгорания топлива принять равной 10 000 *ккал/кг*

Ответ: $\eta=0{,}512$

2-18. На электростанции мощностью $N=100$ *Мвт* сжигается топливо с теплотой сгорания $Q^{p}_{и}=30\,000$ *кдж/кг*. Коэффициент полезного действия станции $\eta_{ст}=33{,}0\%$.

Определить часовой расход топлива B.

Ответ: $B=36{,}4$ *т/ч*.

2-19. Паровая турбина расходует 0,00110 *кг* пара на получение 1 *кдж* электроэнергии На производство 1 *кг* пара необходимых параметров затрачивается 3 300 *кдж*.

Найти к. п. д паротурбинной установки.

Ответ: $\eta=27{,}55\%$

3. ЗАКОНЫ И УРАВНЕНИЕ СОСТОЯНИЯ ИДЕАЛЬНЫХ ГАЗОВ

3-1. Начальное состояние азота задано параметрами: $t=200°$ С, $v=1{,}9$ *м³/кг*. Азот нагревается в процессе при постоянном давлении, причем объем азота увеличивается втрое.

Определить конечную температуру.

Ответ: $t=1\,146°$ С.

3-2. В цилиндре с подвижным поршнем находится кислород при температуре $t=80°$ С и разрежении (вакууме), равном 320 *мм рт. ст.* При постоянной температуре кислород сжимается до избыточного давления $p_{изб}=12$ *кГ/см²* Барометрическое давление равно 745 *мм рт. ст.*

Во сколько раз уменьшится объем кислорода?

Ответ: $V_1/V_2=22{,}5$.

3-3. Абсолютное давление азота в сосуде при комнатной температуре ($t=20°$ С) $p=22$ *бар*. В сосуде азот нагревают, причем известно, что предельное избыточное давление, при котором возможна безопасная работа, составляет 60 *бар*.

Определить температуру, до которой возможно нагревание азота. Барометрическое давление равно 750 *мм рт ст*.

Ответ: $t=539°$ С.

3-4. Определить плотность воздуха и водорода при нормальных условиях.

Ответ: $\rho_{\text{возд}}=1{,}293$ *кг/м*^{3}, $\rho_{H_2}=0{,}0899$ *кг/м*^{3}.

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 *см*^{3}, 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 тыс. 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 величину коэффициента изотермического сжатия $\lambda=-\frac{1}{p}\left(\frac{\partial p}{\partial v}\right)_t$ для азота и водорода, если эти газы находятся при абсолютном давлении $p=12$ *бар* и температуре $t=430°$ С.

Ответ: $\lambda_{N_2}=\lambda_{H_2}=0{,}0833$ *1/бар*.

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 CO, если эти газы находятся при параметрах $p=1\,200$ *кн/м*^{2} и $t=430°$ С.

Ответ:

$$\alpha_{N_2}=\alpha_{CO}=\beta_{N_2}=\beta_{CO}=\frac{1}{703{,}15}=0{,}001422\ 1/\text{град}.$$

3-8. Паротурбинная установка мощностью 100 000 *квт* расходует 0,37 *кг* топлива на 1 *квт·ч*.

Какова должна быть суммарная массовая производительность (*кг/ч*) вентиляторов, подающих воздух в топку котла, если для сжигания 1 *кг* топлива требуется 15 *м*^{3} воздуха при нормальных условиях?

Ответ: $m=717{,}2$ *т/ч*.

3-9. Определить массу воздуха, находящегося в комнате площадью 25 *м*^{2} и высотой 3,2 *м*.

Принять, что температура воздуха в комнате равна $t=22°$ С, а барометрическое давление равно $B=986{,}5$ *мбар*.

Ответ: $m=93{,}1$ *кг*.

3-10. Определить плотности азота при абсолютных[1] давлениях $p=10$ и 60 *ат*. Температура азота равна $t=400°$ С.

Ответ: $\rho_1=4{,}91$ *кг/м*^{3}; $\rho_2=29{,}4$ *кг/м*^{3}.

3-11. Вычислить универсальную газовую постоянную в *дж/кмоль · град*, зная, что в технической системе единиц газовая постоянная равна $\mu R=847{,}83$ *кГ · м/кмоль · град*.

Ответ: $\mu R=8314{,}4$ *дж/кмоль · град*.

3-12. Определить удельный объем кислорода при давлении 23 *бар* и температуре 280° С. Задачу решить в международной системе единиц.

Решение

$$v=\frac{RT}{p}=\frac{\frac{8314{,}4}{32}\ дж/кг\cdot град\cdot 553{,}15\ град}{23\cdot 10^5\ н/м^2}=0{,}0625\ м^3/кг.$$

Размерность удельного объема $м^3/кг$ получается, если учесть, что $1\ дж=1\ н\cdot м$.

3-13. Решить предыдущую задачу (3-12) в технической системе единиц.

Решение

$$v=\frac{RT}{p}=\frac{\frac{847{,}83}{32}\ кГ\cdot м/кГ\cdot град\cdot 553{,}15\ град}{23\ бар\cdot 10197{,}2\ кГ/м^2/бар}=0{,}0625\ м^3/кГ.$$

размерности $[v]=м^3/кГ$ см. задачу 2-15.

3-14. Плотность воздуха при нормальных условиях равна $\rho=1{,}293$ *кг/м*$^3_н$*.

Чему равна плотность воздуха при параметрах $t=20°$ С и $p=15$ *бар*?

Ответ: $\rho=17{,}82$ *кг/м*^{3}.

3-15. Измерение объемов газов может дать представление о строении молекул газа.

Определить, является ли действительно молекула кислорода двухатомной молекулой, если известно, что в объеме, равном 4 *л*, находится 5 *г* кислорода при температуре $t=150°$ С, а давление кислорода равно 1,373 *бар*.

---

[1] В дальнейшем, если имеется ввиду а б с о л ю т н о е давление, будем писать просто «давление».

* Обозначение $м^3_н$ относится к „нормальному кубическому метру". Широко принятое ранее $нм^3$ не может теперь употребляться, так как в таком виде этот размер можно расшифровать: „ньютон$\times$ метр в кубе" или „нанометр в кубе".

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

Ответ: $\mu=32$; молекула состоит из двух атомов. Для озона $p=0{,}916$ *бар*.

3-16. 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 равен $V=420$ *см*^{3}, температура равна $t=320°$ С, а давление равно $p=1{,}02$ *бар*. Исследуемым веществом является этиловый спирт C_2H_5OH.

Ответ: $m=0{,}40$ *г*.

3-17. При измерении расхода воздуха с помощью дроссельной шайбы (см. задачу 1-7) было зафиксировано, что при давлении $p=750$ *мм рт. ст.* и температуре $t=20°$ С расход воздуха равен 24 *л/мин*.

Определить массовый расход воздуха в *кг/мин* и объемный — в нормальных кубических метрах в минуту ($м^3_н/мин$).

Ответ: $m=0{,}0285$ *кг/мин*; $V=0{,}0221$ $м^3_н/мин$.

3-18. Для экспериментального определения удельного объема реальных газов весьма часто пользуются методом гидростатического взвешивания, измеряя в опыте выталкивающую силу, которая действует на поплавок, помещенный в сжатый газ.

Однако при расчете чувствительности устройства, измеряющего выталкивающую силу, приходится приближенно оценивать величину выталкивающей силы. 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 *см*^{3} в углекислом газе CO_2 при температуре $t=700°$ С и давлении $p=600$ *кГ/см*^{2}.

Ответ: 2,56 *Г*.

3-19. 0,3 $м^3_н$ кислорода находятся в сосуде емкостью 650 *см*^{3}.

Определить показания манометра, измеряющего давление в этом сосуде, если температура кислорода равна $t=200°$ С. Атмосферное давление равно $B=762$ *мм рт. ст.*

Ответ: Избыточное давление $p_{изб}=16{,}9$ *кГ/см*^{2}.

3-20. При температуре $t=800°$ С и давлении $p=750$ *мм рт. ст.* плотность газа равна $\rho=0{,}44764$ *кг/м*^{3}.

Что это за газ?

Ответ: Аргон.

3-21. Компрессор подает кислород в резервуар емкостью 3 *м*^{3}, избыточное давление в резервуаре увеличивается при этом от 0,1 до 6 *ат*, а температура газа от 15 до 30° С.

Определить вес поданного компрессором кислорода. Барометрическое давление $B=745$ *мм рт. ст.*

Ответ: $\Delta G=21{,}8$ *кГ*.

3-22. Вес пустого баллона для аргона емкостью 40 *л* равен 64 *кГ*.

Сколько будет весить баллон с аргоном, если при температуре $t=15°$ С баллон наполняют газом до давления $p=150$ *ат*?

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

Ответ: Вес баллона с аргоном равен 73,8 *кГ* Давление увеличится до 155,2 *кГ/см*^{2}.

3-23. В сосуде объемом 5 *м*^{3} находится воздух при барометрическом давлении $B=1\,000$ *мбар* и температуре 300° С Затем воздух выкачивается до тех пор, пока в сосуде не образуется вакуум, равный 600 *мм рт. ст* Температура воздуха после выкачивания остается той же

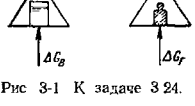


Рис 3-1 К задаче 3 24.

Сколько воздуха (в *кг*) 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 оказалось равным 101 *мбар*.

3-24. 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

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 *Г*? Удельный вес материала гирь равен 8,4 *Г/см*^{3}, а удельный вес воды вместе с бюксой равен 1,2 *Г/см*^{3} Взвешивание произведено в воздухе при температуре $t=20°$ С и барометрическом давлении $B=755$ *мм рт ст*.

Решение

При равновесии весов имеет место следующее равенство сил:

$$G_r - \Delta G_r = G_в - \Delta G_в,$$

где G_r — вес гирь в пустоте (номинальное значение веса гирь есть их вес в пустоте),

ΔG_r — выталкивающая сила, действующая на гири;

$G_в$ — вес воды (в пустоте);

$\Delta G_в$ — выталкивающая сила, действующая на воду.

Отсюда истинный вес взвешиваемой воды

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

Согласно закону Архимеда выталкивающая сила равна весу вытесненного воздуха, поэтому

$$\Delta G_в = V_в \frac{1}{v} = \frac{G_r}{\gamma_в v} \quad \text{и} \quad \Delta G_r = V_r \frac{1}{v} = \frac{G_r}{\gamma_r v},$$

где $V_в$ и V_r — 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 равен.

$$v = \frac{847,83 \cdot 293,15 \cdot 735,559}{28,93 \cdot 755,0 \cdot 10^4} = 0,83615 \ м^3/кГ = 836,15 \ см^3/Г.$$

Вес воды в бюксе равен:

$$G_в = 20,563 \left[1 + \frac{1}{836,15} \left(\frac{1}{1,2} - \frac{1}{8,4} \right) \right] = 20,581 \ Г.$$

Таким образом, поправка равна приблизительно 0,1%.

3-25. Решить задачу 3-24, применяя систему СИ

Решение

Заменяя в основном уравнении равновесия

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

весá как произведения масс на ускорения силы тяжести, 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

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

и

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

Здесь ρ — плотность воздуха, $кг/м^3$.

После сокращения на g получим:

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

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 состояния $p = \rho RT$):

$$\rho = \frac{p}{RT} = \frac{755\ мм\ рт.\ ст \cdot 133{,}322\ \frac{н}{м^2} \Big/ мм\ рт.\ ст}{\frac{8314{,}4}{28{,}96}\ дж/кг \cdot град\ 293{,}15\ град} = 1{,}196\ кг/м^3.$$

Масса воды в бюксе равна:

$$m_в = 20{,}563 \cdot 10^{-3}\ кг\left[1 + 1{,}196\ кг/м^3\left(\frac{1}{1\,200\ кг/м^3} - \right.\right.$$

$$\left.\left. - \frac{1}{8\,400\ кг/м^3}\right)\right] = 20{,}581 \cdot 10^{-3}\ кг = 20{,}581\ г.$$

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 силы тяжести.

3-26. 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 равна $\rho_в = 0{,}2\ г/см^3$, а плотность вещества гирь $\rho_г = 8{,}4\ г/см^3$. Взвешивание производится в комнате при параметрах воздуха $p = 1{,}02\ бар$, $t = 25°$ С.

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

4. ТЕПЛОЕМКОСТЬ ГАЗОВ В ИДЕАЛЬНОМ СОСТОЯНИИ

При решении задач этого раздела там, где это оговорено, следует пользоваться приведенными в приложении таблицами теплоемкостей и энтальпий газов (табл. 8-20).

Для подсчета теплоемкости по квантовой теории в приложении дана таблица функции Эйнштейна (табл 22) и значения характеристических температур для различных газов (табл. 21).

4-1. Определить при помощи молекулярно-кинетической теории объемные теплоемкости при постоянном объеме c'_v и массовые теплоемкости при постоянном давлении c_p для азота и сероводорода H_2S, молекула которого нелинейна.

Ответ:

Газ	c'_v		c_p	
	кдж/м³н·град	*ккал/м³н·град*	*кдж/кг·град*	*ккал/кг·град*
N_2	0,928	0,222	1,039	0,248
H_2S	1,113	0,266	0,977	0,234

4-2. Зависимость средней от 0 до $t°$ С мольной теплоемкости воздуха от температуры можно приближенно выразить уравнением:

$$\mu c_{pm}\Big|_0^t = 6{,}949 + 5{,}76 \cdot 10^{-4}\, t \quad ккал/кмоль \cdot град.$$

Какое количество тепла необходимо подвести к воздуху, заключенному в сосуде объемом 20 $дм^3$ при давлении $p_1 = 10$ *бар* и температуре $t_1 = 20°$ С, чтобы поднять его температуру до $t_2 = 600°$ С?

Решение

Определим прежде всего количество килограммов воздуха, находящегося в сосуде:

$$m = \frac{pV}{RT} = \frac{10 \cdot 10^5 \cdot 20 \cdot 10^{-3} \cdot 28{,}96}{8\,314 \cdot 293{,}15} = 0{,}239 \ кг.$$

Известно, что

$$\mu c_{vm} = \mu c_{pm} - \mu R,$$

откуда получаем:

$$\mu c_{vm}\Big|_0^t = 6{,}949 + 5{,}76 \cdot 10^{-4} t - \frac{8{,}314}{4{,}1868} =$$

$$= 4{,}963 + 5{,}76 \cdot 10^{-4} t \ ккал/кмоль \cdot град,$$

или

$$c_{vm}\Big|_0^t = 0{,}171 + 0{,}1988 \cdot 10^{-4} t \ ккал/кг \cdot град.$$

Тогда

$$Q = m\left[c_{vm}\Big|_0^{t_2} t_2 - c_{vm}\Big|_0^{t_1} t_1\right] = 0{,}239\,(0{,}183 \cdot 600 - 0{,}171 \cdot 20) =$$

$$= 26{,}4 \ ккал = 106 \ кдж.$$

4-3. Подсчитать среднюю массовую и среднюю объемную теплоемкость воздуха при нагревании его от $t_1 = 20°$ С до $t_2 = 800°$ С в процессе при постоянном объеме, пользуясь таблицами. Сравнить полученный результат со значениями теплоемкостей, подсчитанными по молекулярно-кинетической теории.

Ответ: $c_{pm}\Big|_{t_1}^{t_2} = 0{,}188$ *ккал/кг · град*, $c'_{vm}\Big|_{t_1}^{t_2} = 0{,}243$ *ккал/м*$^3_н$ *· град*.

По молекулярно-кинетической теории: $c_v = 0{,}171$ *ккал/кг · град*;

$c'_v = 0{,}221$ *ккал/м*$^3_н$ *· град*. Ошибка $\delta \approx 9\%$.

4-4. Определить изменение внутренней энергии 0,4 *кг* азота при расширении его в цилиндре с подвижным поршнем, если в результате процесса температура азота падает от 500° С до 150° С.

Решить задачу, пользуясь таблицами.

Определить относительную ошибку, получаемую в случае, если полагать, что теплоемкость является постоянной величиной.

Ответ: $\Delta U = 109{,}1 \cdot 10^3$ *дж* $= 26{,}1$ *ккал*. Ошибка $\delta \approx 4\%$.

4-5. Определить величину энтальпии воздуха, отсчитанную от 0° С при температуре $t_1 = 287°$ С и $t_2 = 560°$ С, если известна интерполяционная формула для истинной теплоемкости воздуха:

$$\mu c_p = 6{,}90 + 14{,}8 \cdot 10^{-4}\, t - 20{,}1 \cdot 10^{-8}\, t^2 \quad \textit{ккал/кмоль · град}.$$

Решение

Известно, что

$$\Delta i = \int_{t_0}^{t} c_p dt.$$

Вследствие того что $i_0 = 0$ при $t_0 = 0°$ С:

$$i_{287} = \int_0^{287} (6{,}90 + 14{,}8 \cdot 10^{-4} t - 20{,}1 \cdot 10^{-8} t^2)\, dt =$$

$$= 6{,}9 \cdot 287 + 7{,}4 \cdot 10^{-4} \cdot 287^2 - 6{,}7 \cdot 10^{-8} \cdot 287^3 = 2\,041 \quad \textit{ккал/кмоль}.$$

Аналогично

$$i_{560} = 6{,}9 \cdot 560 + 7{,}4 \cdot 10^{-4} \cdot 560^2 - 6{,}7 \cdot 10^{-8} \cdot 560^3 = 4\,084 \quad \textit{ккал/кмоль}.$$

4-6. Определить значение средней мольной теплоемкости в процессе при постоянном давлении для азота в интервале температур от 300 до 400° С, если выражение для величины его истинной теплоемкости имеет вид:

$$\mu c_p = 6{,}86 + 0{,}00125\ t - 3{,}01 \cdot 10^{-10} t^2 \quad \textit{ккал/кмоль · град}.$$

Решение

$$\mu c_{pm}\Big|_{t_1}^{t_2} = \frac{1}{t_2 - t_1} \int_{t_1}^{t_2} (6{,}86 + 0{,}00125t - 3{,}01 \cdot 10^{-10} t^2)\, dt =$$

$$= 6{,}86 + 0{,}00125 \frac{300 + 400}{2} - 3{,}01 \cdot 10^{-10} \frac{400^2 + 300 \cdot 400 + 300^2}{3} =$$

$$= 7{,}294 \quad \textit{ккал/кмоль · град}.$$

4-7. Средняя мольная теплоемкость μc_{pm} для водорода задана уравнением

$$\mu c_{pm}\Big|_0^t = 6{,}88 + 2.67 \cdot 10^{-4} t, \ ккал/кмоль \cdot град.$$

Получить формулы для средней теплоемкости при постоянном объеме, отнесенной к 1 *кг* и 1 $м^3_н$ газа. Подсчитать среднюю (между 0 и 500°С) объемную теплоемкость водорода при постоянном объеме.

Ответ: $c_{vm}\Big|_0^{500} = 2{,}44 + 1{,}33 \cdot 10^{-4} t \ ккал/кг \cdot град;$

$$c'_{vm}\Big|_0^{500} = 0{,}218 + 0{,}119 \cdot 10^{-4} t \ ккал/м^3_н \cdot град;$$

$$c'_{vm}\Big|_0^{500} = 0{,}224 \ ккал/м^3_н \cdot град.$$

4-8. В компрессоре газовой турбины сжимается воздух. Начальная температура воздуха $t_1 = 30°$ С, конечная температура после сжатия $t_2 = 150°$ С. Определить изменение энтальпии и внутренней энергии воздуха в процессе сжатия, считая значения теплоемкостей по молекулярно-кинетической теории.

Ответ: $\Delta i = 28{,}92 \ ккал/кг = 120{,}58 \cdot 10^3 \ дж/кг;$

$$\Delta u = 20{,}52 \ ккал/кг = 85{,}41 \cdot 10^3 \ дж/кг.$$

4-9. В регенеративном подогревателе газовой турбины воздух нагревается от $t_1 = 130°$ С до $t_2 = 500°$ С.

Определить количество тепла, сообщенное воздуху в единицу времени, если расход его составляет 250 *кг/ч*. Ответ дать в *ккал/ч*, в *кдж/сек* и в *квт*. Для решения задачи воспользоваться таблицами.

Ответ: $Q = 23\,196 \ ккал/ч = 26{,}9 \ кдж/сек = 26{,}9 \ квт.$

4-10. Зависимость мольной теплоемкости CO от температуры выражается следующими экспериментально найденными данными:

T, °К	300	500	700	900	1 500	2 000
μc_p, *ккал/кмоль·град*	6,96	7,11	7,43	7,75	8,36	8,59

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

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

Проверить точность полученного уравнения.

Решение

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

Экспериментальные данные не абсолютно точны, а имеют систематические и случайные ошибки. Поэтому необходимо составить такую формулу зависимости между теплоемкостью и температурой, которая давала бы при подсчете минимум погрешностей. В теории вероятности доказывается, что ошибка минимальна тогда, когда сумма квадратов разностей между вычисленными и экспериментальными данными минимальна.

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

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

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

Решая систему двух уравнений с двумя неизвестными

$$\sum_1^n -\mu c_p + na + b\sum_1^n T = 0;$$

$$\sum_1^n -\mu c_p T + a\sum_1^n T + b\sum_1^n T^2 = 0,$$

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

Для упрощения расчетов вводим в качестве аргумента вместо T величину $T^* = \frac{T - 300}{100}$.

Необходимые для расчета данные сводим в таблицу:

T	μc_p	T^*	$(T^*)^2$	$\mu c_p T^*$
300	6,96	0	0	0
500	7,11	2	4	14,22
700	7,43	4	16	29,72
900	7,75	6	36	46,50
1 500	8,36	12	144	100,32
2 000	8,59	17	289	146,03
Σ	46,20	41	489	336,79

Составляем уравнения:

$$46{,}2 = 6\,a + 41\,b;$$

$$336{,}79 = 41\,a + 489\,b.$$

Решая систему уравнений, находим, что $a=7{,}011$; $b=0{,}1008$. Следовательно,

$$\mu c_p = 7{,}011 + 0{,}1008\,\frac{T-300}{100}$$

или

$$\mu c_p = 6{,}709 + 10{,}08\cdot 10^{-4} T,\ ккал/кмоль\cdot град.$$

Сравним опытные значения теплоемкости с подсчитанными по полученному уравнению:

T, °K	300	500	700	900	1 500	2 000
μc_p (опыт.)	6,96	7,11	7,43	7,75	8,36	8,59
μc_p (расч.)	7,01	7,21	7,42	7,62	8,22	8,73

Совпадение с экспериментальными данными было бы ближе, если бы мы составили уравнение вида $\mu c_p = a + bT + cT^2$. В этом случае составляется и решается система трех уравнений с тремя неизвестными.

4-11. По экспериментальным данным мольная теплоемкость аммиака μc_p при 300°К равна 6,81, а при $T=800$°К она составляет 9,58 *ккал/кмоль·град*.

Установить, пользуясь приведенными значениями, интерполяционную формулу температурной зависимости теплоемкости, принимая линейный характер указанной зависимости.

Интерполяционную формулу составить для случаев, когда температура выражена в градусах Кельвина и в градусах Цельсия.

Ответ:

$$\mu c_p = 5{,}148 + 5{,}54\cdot 10^{-3} T\ ккал/кмоль\cdot град;$$

$$\mu c_p = 6{,}661 + 5{,}54\cdot 10^{-3} t\ ккал/кмоль\cdot град.$$

4-12. Подсчитать теплоемкость c_v, *ккал/кг·град*, для окиси азота NO при $t=1\,600$° С, учитывая энергию колебаний атомов в молекуле и считая колебания гармоническими. Сравнить полученные результаты с табличными данными.

Решение

Мольная теплоемкость идеальных газов при не слишком высоких температурах с учетом спектроскопических данных может быть подсчитана по формуле

$$\mu c_v = \frac{3+n}{2}\mu R + \mu R \sum^{i} \left(\frac{h\nu}{kT}\right)^2 \frac{e^{h\nu/kT}}{(e^{h\nu/kT}-1)^2}.$$

В этой формуле:

n — число вращательных степеней свободы; для двухатомных и линейных многоатомных молекул $n=2$;

$i=3m-(3+n)$ — число колебательных степеней свободы (m — число атомов в молекуле). Для двухатомных молекул $i=1$;

μR — газовая постоянная, отнесенная к одному киломолю;

$h=6{,}62\cdot 10^{-34}$ — постоянная Планка, *дж·сек*;

ν — частота колебаний, *1/сек*;

$k = 1{,}38 \cdot 10^{-23}$ постоянная Больцмана, *дж/град*.

T — абсолютная температура, °К

Величину $h\nu/k = \Theta$ называют „характеристической температурой". Значения Θ для некоторых газов даны в табл. 21 приложений.

Написанную выше формулу для μc_v можно представить в виде:

$$\mu c_v = \frac{3+n}{2}\mu R + \sum^{i} C_j,$$

где $C_j = \mu R f\left(\frac{\Theta}{T}\right)$ находится в табл. 22. приложений.

Из таблиц находим для NO:

$$\Theta = 2\,705°\ \text{К}.$$

При $\frac{\Theta}{T} = \frac{2\,705}{1\,873} = 1{,}444$ величина $C = 1{,}6768$ *ккал/кмоль·град*.

Искомая теплоемкость

$$\mu c_v = \frac{3+2}{2} \cdot 1{,}986 + 1{,}677 = 6{,}642\ \textit{ккал/кмоль·град} =$$

$$= 27{,}8\ \textit{кдж/кмоль·град};$$

$$c_v = \frac{\mu c_v}{\mu} = \frac{6{,}642}{30{,}0} = 0{,}221\ \textit{ккал/кг·град}.$$

По табличным данным $c_v = 0{,}2245$ *ккал/кг·град*, т. е. ошибка составляет $\delta = 1{,}4\%$. Источник ошибки заключается в том, что предложенная формула не учитывает ангармоничности колебаний, возбуждений электронных уровней энергии и взаимодействия между колебательной, вращательной и электронной энергиями.

4-13. Определить теплоемкость μc_v кислорода при температурах $t_1 = 500°$ С и $t_2 = 1\,000°$ С, учитывая колебательную составляющую и считая колебания гармоническими. Сравнить полученные результаты с табличными данными.

Ответ: При $t_1 = 500$ °С $\mu c_v = 6{,}00$ *ккал/кмоль·град*;

$\mu c_{v,\text{таб}} = 6{,}027$ *ккал/кмоль·град*. При $t_2 = 1\,000°$ С

$\mu c_v = 6{,}510$ *ккал/кмоль·град*; $\mu c_{v,\text{таб}} = 6{,}592$ *ккал/кмоль·град*.

4-14. Подсчитать теплоемкость c_p, *дж/кг·град*, окиси углерода CO при $T = 1\,000°$ К, учитывая наличие колебательной составляющей и считая колебания гармоническими. Сравнить результаты с табличными данными.

Ответ: $c_p = 1{,}180 \cdot 10^3$ *дж/кг·град*. Табличное значение $c_p = 1{,}184 \cdot 10^3$ *дж/кг·град*;

$$\delta = 0{,}34\%.$$

4-15. Подсчитать теплоемкость c_p, *кдж/кг · град* для углекислого газа CO_2 при $t=800°$ С, учитывая энергию колебаний атомов в молекуле и считая колебания гармоническими. Сравнить полученные результаты с табличными данными. Определить, какова ошибка в процентах, если рассчитывать теплоемкость по молекулярно-кинетической теории теплоемкости.

Пояснение. Каждой степени свободы колебательного движения отвечает своя частота ν и своя характеристическая температура Θ. Если молекула симметрична, то две или более частоты могут совпадать. Соответствующие им колебания называются вырожденными. В формулу для теплоемкости энергии вырожденных колебаний входят с соответствующими множителями.

Молекула CO_2 линейна. Из четырех степеней свободы колебательного движения две степени совпадают. Поэтому молекула CO_2 дважды вырожденная. Из табл. 21 приложений находим для CO_2:

$$\Theta_1 = 954\ (2);\ \Theta_2 = 1\,920;\ \Theta_3 = 3\,360\ (2)\text{K};$$

$$\mu c_v = \frac{3+2}{2}\mu R + \left[2f\left(\frac{\Theta_1}{T}\right) + f\left(\frac{\Theta_2}{T}\right) + f\left(\frac{\Theta_3}{T}\right)\right]\mu R.$$

Ответ: $c_p = 1{,}250$ *кдж/кг · град*.

По табличным данным при $t=800°$ С $c_p = 1{,}249$ *кдж/кг · град* Расхождение $\delta = 0{,}08\%$.

По молекулярно-кинетической теории $c_p = 0{,}67$ *кдж/кг · град*. Расхождение составляет примерно 46%.

4-16. Определить теплоемкость сероводорода H_2S при температуре $t=1\,000°$ С, учитывая энергию колебаний атомов в молекуле, считая колебания гармоническими.

$$\Theta_1 = 1\,810;\ \Theta_2 = 3\,750\ (2)°\text{K}.$$

Сравнить полученные данные с табличными. Молекула сероводорода имеет нелинейную структуру.

Ответ: $c_p = 0{,}341$ *ккал/кг · град* $= 1{,}425$ *кдж/кг · град*;

$c_{p,\text{табл}} = 0{,}342$ *ккал/кг · град* $= 1{,}429$ *кдж/кг · град*.

5. СМЕСИ ИДЕАЛЬНЫХ ГАЗОВ

5-1. Воздух (приближенно считая, что он является смесью только азота и кислорода) имеет следующий объемный состав:

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

Определить весовые доли азота и кислорода в воздухе; вычислить газовую постоянную и кажущийся молекулярный вес воздуха.

Ответ: $R_{см} = 0{,}288$ *кдж/кг · град* $= 29{,}3$ *кГ · м/кГ · град*; $\mu = 28{,}84$.

5-2. 0,3 $м^3$ воздуха смешиваются с 0,5 *кг* углекислого газа Оба газа до смешения имели параметры

$$p = 6\ кГ/см^2 \text{ и } t = 45° \text{ С}.$$

Определить парциальное давление углекислого газа после смешения.

Ответ: $p_{CO_2} = 85{,}5$ *кн/м²*.

5-3. Дымовые газы имеют следующий массовый состав:

$$g_{CO_2} = 16{,}1\%;\ g_{O_2} = 7{,}5\%;\ g_{N_2} = 76{,}4\%.$$

Рассчитать энтальпию $i'_{см}$ этих газов, отнесенную к 1 $м^3_н$ при температуре $t = 800°C$.

Решение

Согласно принципу аддитивности энтальпии

$$i_{см} = \sum_{j=1}^{n} g_j i_j,\ ккал/кг.$$

По заданным условиям

$$i_{см} = g_{CO_2} \cdot i_{CO_2} + g_{O_2} \cdot i_{O_2} + g_{N_2} \cdot i_{N_2},\ ккал/кг,$$

где $i_j = f(t)$ находим по таблицам приложений:

$$i_{см} = 0{,}161 \cdot 207{,}4 + 0{,}075 \cdot 194{,}1 + 0{,}764 \cdot 209{,}7 =$$
$$= 208{,}2\ ккал/кг = 872\ кдж/кг.$$

Для того чтобы найти $i'_{см}$, $ккал/м^3_н$, необходимо знать плотность смеси при нормальных условиях. Известно, что

$$(\rho_{см})_0 = \frac{1}{\sum_{j=1}^{n} \frac{g_j}{(\rho_j)_0}}.$$

Плотности $(\rho_j)_0$ составляющих смесь газов (см. приложение, табл. 5):

$$(\rho_{CO_2})_0 = 1{,}977;\ (\rho_{O_2})_0 = 1{,}429;\ (\rho_{N_2})_0 = 1{,}251\ кг/м^3_н.$$

Следовательно,

$$(\rho_{см})_0 = \frac{1}{\frac{0{,}161}{1{,}977} + \frac{0{,}075}{1{,}429} + \frac{0{,}764}{1{,}251}} = \frac{1}{0{,}7446} = 1{,}343\ кг/м^3_н.$$

Искомая величина энтальпии $i'_{см}$:

$$i'_{см} = (\rho_{см})_0 \cdot i_{см} = 1\,171\ кдж/м^3_н.$$

5-4. Рассчитать истинную теплоемкость c_p $ккал/кг \cdot град$ смеси паров этилового спирта и воды. Массовая доля этилового спирта равна $g_{сп} = 0{,}9383$.

Расчет произвести, пользуясь таблицами [Л. 6] для температур 200 и 400 °С.

Ответ: $c_{p.200} = 0{,}5026\ ккал/кг \cdot град$;

$$c_{p.400} = 0{,}6104\ ккал/кг\ град.$$

5-5. Определить удельный объем и массовую теплоемкость c_p пара натрия при $p=1$ *Мн/м²* и температуре $t=627°$ С, если известно, что *при этих параметрах пар натрия является смесью одноатомных* и двухатомных молекул следующего мольного состава:

$$r_{Na} = 0{,}8628 \text{ и } r_{Na_2} = 0{,}1372.$$

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.

Атомный вес натрия принять равным $\mu_{Na}=23{,}0$.

Решение

Парциальное давление j-й составляющей смесь равно:

$$p_j = r_j p_{см}$$

Поэтому

$$p_{Na} = 0{,}8628 \cdot 1 = 0{,}8628 \ \ Мн/м^2$$

и

$$p_{Na_2} = 0{,}1372 \cdot 1 = 0{,}1372 \ \ Мн/м^2.$$

Кажущийся молекулярный вес смеси

$$\mu_{см} = \sum_{j=1}^{n} r_j \mu_j = 0{,}8628 \cdot 23{,}0 + 0{,}1372 \cdot 46{,}0 = 26{,}2.$$

Удельный объем смеси находим из уравнения состояния:

$$v_{см} = \frac{R_{см} T}{p_{см}} = \frac{8\,314 \cdot 1\,200}{26{,}2 \cdot 10^6} = 0{,}381 \ \ м^3/кг.$$

Если бы смесь состояла только из одноатомных молекул, то

$$v_{Na} = v_{см} \frac{\mu_{см}}{\mu_{Na}} = 0{,}433 \ \ м^3/кг.$$

Искомая ошибка

$$\delta = \frac{v_{Na} - v_{см}}{v_{см}} \cdot 100 = \frac{0{,}433 - 0{,}381}{0{,}381} \cdot 100 = 13{,}7\%.$$

Теплоемкость смеси определяется как

$$c_{p,см} = \frac{1}{\mu_{см}} \sum_{j=1}^{n} r_j (\mu c_p)_j.$$

Мольные теплоемкости Na и Na_2 равны соответственно:

$$(\mu c_p)_{Na} = \frac{\mu R}{2} 5 \text{ дж/кмоль·град и } (\mu c_p)_{Na_2} = \frac{\mu R}{2} 7 \text{ дж/кмоль·град.}$$

Следовательно,

$$c_{p,см} = \frac{1}{26{,}2} \cdot \frac{8\,314}{2} (0{,}8628 \cdot 5 + 0{,}1372 \cdot 7) = 832 \text{ дж/кг·град.}$$

5-6. В настоящее время проектируются энергетические установки, работающие по так называемому парогазовому циклу, в котором рабочим веществом является смесь водяного пара и горячих продуктов сгорания. Массовая доля продуктов сгорания топлива (принять, что продукты сгорания обладают свойствами воздуха) $g = 0{,}7$.

Определить теплоемкость c_p, *ккал/кг·град*, смеси при температуре 500 и 800° С, а также удельный объем смеси при $t = 500°$ С и давлении $p = 10$ *кГ/см²*.

Ответ: $c_{p,500} = 0{,}335$ *ккал/кг·град.*

$c_{p,800} = 0{,}361$ *ккал/кг·град.*

$v_{см} = 0{,}272$ *м³/кг.*

5-7. 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, кажущийся молекулярный вес смеси и газовую постоянную, отнесенную к одному нормальному кубическому метру.

Ответ: $(r_\mu)_{N_2} = 0{,}275$; $(r_\mu)_{Ar} = 0{,}251$; $(r_\mu)_{CO_2} = 0{,}474$

$(v_{см})_0 = 0{,}579$ *м³н/кг*; $\mu_{см} = 38{,}61$;

$R'_{см} = 372$ *дж/м³н·град.*

5-8. Влажный воздух представляет собой смесь сухого воздуха и водяного пара. Известно, что на каждый килограмм сухого воздуха во влажном воздухе содержится d *г/кг* с. в. водяного пара.

Определить весовые и объемные доли сухого воздуха и водяного пара, плотность при нормальных условиях, газовую постоянную, отнесенную к 1 *кг*, и кажущийся молекулярный вес смеси, если $d = 10$ *г/кг* с. в.

Ответ: $g_{с.в} = 0{,}9901$; $g_{в.п} = 0{,}0099$;

$r_{с.в} = 0{,}9842$; $r'_{в.п} = 0{,}0158$;

$\mu_{см} = 28{,}786$; $R_{см} = 289$ *дж/кг·град*;

$\rho_{см} = 1{,}285$ *кг/м³н*.

5-9. Объемный состав горючего газа следующий:

$$r_{CO} = 10\%,\ r_{H_2} = 45\%,\ r_{CH_4} = 35\%,\ r_{C_2H_4} = 4\%,$$

$$r_{CO_2} = 3\%,\ r_{N_2} = 3\%.$$

Определить кажущийся молекулярный вес, плотность, удельный объем при нормальных условиях, массовую газовую постоянную R, парциальное давление метана в процентах и весовые содержания компонентов.

Ответ: $\mu_{см} = 12{,}63$, $\rho_{см} = 0{,}563$ *кг/м*$^3_н$;

$v_{см} = 1{,}776$ *м*$^3_н$*/кг*; $R_{см} = 0{,}658$ *кдж/кг·град* $= 67{,}1$ *кГ·м/кг·град*;

$g_{CO} = 0{,}222$; $g_{H_2} = 0{,}072$; $g_{C_2H_4} = 0{,}089$; $g_{CH_4} = 0{,}445$; $g_{N_2} = 0{,}067$;

$g_{CO_2} = 0{,}105$; $p_{CH_4} = 35{,}0\%$.

5-10. Смесь газов, получающаяся при сжигании 1 *кг* мазута в топке парового котла, имеет следующий состав, определенный парциальными 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 весовые доли и парциальные давления составляющих, если общее давление $p = 1{,}018$ *кГ/см*^{2}

Ответ: $g_{CO_2} = 0{,}175$; $g_{N_2} = 0{,}773$; $g_{O_2} = 0{,}052$;

$p_{CO_2} = 0{,}051$; $p_{N_2} = 0{,}845$; $p_{O_2} = 0{,}122$ *кГ/см*^{2}.

5-11. Сосуд разделен перегородкой на две части, объемы которых равны $V_1 = 1{,}5$ *м*^{3} и $V_2 = 1{,}0$ *м*^{3}. В части V_1 содержится двуокись углерода CO_2 при давлении $p_1 = 5$ *кГ/см*^{2} и температуре $t_1 = 30{,}0°$ С, а в части V_2 — кислород O_2 при $p_2 = 2$ *кГ/см*^{2} и $t_2 = 57{,}0°$ С.

Определить массовые и объемные доли CO_2 и O_2, кажущийся молекулярный вес смеси и ее газовую постоянную, после того как перегородка будет убрана и процесс смешения закончится.

Решение

Массы газов рассчитываются по уравнению состояния $pV = mRT$.

$$m_{CO_2} = \frac{p_1 V_1}{R_1 T_1} = \frac{5 \cdot 98066{,}5 \cdot 1{,}5 \cdot 44}{8\,314 \cdot 303{,}15} = 12{,}84 \text{ кг};$$

$$m_{O_2} = \frac{p_2 V_2}{R_2 T_2} = \frac{2 \cdot 98\,066{,}5 \cdot 1{,}0 \cdot 32}{8\,314 \cdot 330{,}15} = 2{,}28 \text{ кг}.$$

Массовые доли:

$$g_{CO_2} = \frac{m_{CO_2}}{\sum_{j=1}^{n} m_j} = \frac{12{,}84}{12{,}84 + 2{,}28} = 0{,}849;$$

$$g_{O_2} = \frac{2{,}28}{12{,}84 + 2{,}28} = 0{,}151.$$

Объемные доли:

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

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

Кажущийся молекулярный вес и газовая постоянная смеси:

$$\mu_{см} = \frac{1}{\sum_{i=1}^{n} g_i/\mu_i} = \frac{1}{0{,}02402} = 41{,}7;\ R_{см} = \frac{\mu R}{\mu_{см}} = \frac{8\,314}{41{,}7} =$$

$$= 199{,}3\ дж/кг\text{-}град.$$

5-12. Образование смеси двух газов — азота и гелия — происходит так же, как оно описано в задаче 5-11.

Состояние газов до смешения характеризуется таблицей:

Величины	N_2	He
Масса, m, $кг$ . . .	10	5
Давление p, $бар$	8	20
Температура t, °C	120	860

Найти параметры смеси ($p_{см}$ и $t_{см}$), а также парциальные давления N_2 и He после окончания процесса смешения.

Теплообмен со средой отсутствует.

Решение

Ввиду того что внутренняя энергия системы в процессе смешения не меняется (объем системы постоянен и теплообмена со средой нет), можно записать уравнение баланса внутренней энергии

$$U_{см} = U_{N_2} + U_{He},$$

в правой части которого стоят значения внутренней энергии N_2 и He до смешения. Разделив это уравнение на величину массы смеси $m_{см}$, получим:

$$u_{см} = g_{N_2} \cdot u_{N_2} + g_{He} u_{He},\ ккал/кг,$$

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

$$g_{N_2} = \frac{10}{10+5} = 0{,}667;\ g_{He} = 1 - 0{,}667 = 0{,}333.$$

Внутренние энергии соответственно равны:

$$u_{см} = (c_{vm}\Big|_0^t t)_{см};\ u_{N_2} = (c_{vm}\Big|_0^t t)_{N_2};\ u_{He} = (c_{vm}\Big|_0^t t)_{He}.$$

Находя среднюю теплоемкость азота в табл. 8 приложений, а теплоемкость гелия вычисляя по молекулярно-кинетической теории (так как теплоемкость одноатомного газа практически не зависит от температуры), получим:

$$u_{см} = (c_{vm}\int_0^t t)_{см} = g_{N_2}(c_{vm}\int_0^t t)_{N_2} + g_{He}(c_v \cdot t)_{He}, \quad ккал/кг;$$

$$u_{см} = 0{,}667 \cdot 0{,}17777 \cdot 120 + 0{,}333 \cdot \frac{1{,}986}{2} \cdot \frac{3}{4{,}002} \cdot 860 = 227{,}4 \ ккал/кг.$$

Для нахождения температуры смеси составим предварительно таблицу зависимости $u_{см}$ от температуры, учитывая, что внутренняя энергия смеси равна:

$$u_{см} = \sum_{i=1}^{n} g_i u_i, \text{ где } [u_i] = ккал/кг.$$

t °C	$u_{N_2}=(c_{vm}\int_0^t t)_{N_2}$	$u_{He}=\frac{1{,}986}{2}\times$ $\times\frac{3}{4{,}002}t$	$g_{N_2}u_{N_2}$	$g_{He}u_{He}$	$u_{см}=\sum_1^n g_i u_i$
500	0,1837·500=91,9	372,2	61,3	123,9	185,2
600	0,1861·600=111,7	446,6	74,5	148,7	223,2
700	0,1887·700=132,1	521,1	88,1	173,5	261,6

Теперь (зная, что $u_{см}=227{,}4$ *ккал/кг*), интерполируя, находим температуру $t_{см}=611°$ С.

Кажущийся молекулярный вес и газовую постоянную находим подобно тому, как это было сделано в задаче 6-11:

$$\mu_{см}=9{,}343; \ R_{см}=889{,}9 \ дж/кг \cdot град.$$

Объем смеси равен сумме объемов N_2 и He до смешения, т. е.

$$V_{см} = V_{N_2} + V_{He} = \left(\frac{mRT}{p}\right)_{N_2} + \left(\frac{mRT}{p}\right)_{He} =$$

$$= \frac{10 \cdot 8\,314 \cdot 393}{28 \cdot 8 \cdot 10^5} + \frac{5 \cdot 8\,314 \cdot 1\,133}{4{,}002 \cdot 20 \cdot 10^5} = 1{,}458 + 5{,}883 = 7{,}341 \ м^3.$$

Давление смеси

$$p_{см} = \frac{mRT}{V} = \frac{15 \cdot 889{,}9 \cdot 884}{7{,}341} = 16{,}07 \cdot 10^5 \ н/м^2 = 16{,}07 \ бар.$$

Парциальные давления азота и гелия:

$$p_{N_2}^{парц} = p_{см} g_{N_2} \cdot \frac{\mu_{см}}{\mu_{N_2}} = 16{,}07 \cdot 0{,}667 \cdot \frac{9{,}343}{28{,}016} = 3{,}57 \ бар;$$

$$p_{He}^{парц} = p_{см} g_{He} \frac{\mu_{см}}{\mu_{He}} = 16{,}07 \cdot 0{,}333 \cdot \frac{9{,}343}{4{,}003} = 12{,}50 \ бар.$$

5-13. Имеется два сосуда, соединенных между собой трубкой, на которой установлен кран, разобщающий их. В первом сосуде, емкость которого $V_1=2$ $м^3$, находится воздух при $p_1=10$ $кГ/см^2$ и $t_1=27°C$. Второй ($V_2=1$ $м^3$) содержит также воздух при $p_2=2$ $кГ/см^2$ 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: $p_{см}=7{,}4$ $кГ/см^2$; $t_{см}=29{,}7°C$.

5-14. Горючая смесь состоит из водорода и этана (C_2H_6) и задана объемными долями $r_{H_2}=0{,}40$ и $r_{C_2H_6}=0{,}60$.

Подсчитать количество воздуха, теоретически необходимое для сжигания 1 $м^3_н$ смеси.

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 *кмоль* водорода требуется $^1/_2$ *кмоль* кислорода и для 1 *кмоль* этана — 3,5 *кмоль* кислорода.

Учитывая то, что объемы киломоля любых газов в идеальном состоянии приблизительно равны между собой ($\mu v_0=22{,}4$ $м^3_н/кмоль$) и что в воздухе содержится 21,0% кислорода по объему, нетрудно подсчитать теоретически необходимое для сжигания 1 $м^3_н$ объемное количество воздуха:

$$v_0=\frac{100}{21}(0{,}5r_{H_2}+3{,}5r_{C_2H_6})\ м^3_н/м^3_н \text{ смеси}.$$

Подставляя значения r, получаем:

$$v_0=\frac{100}{21}(0{,}5\cdot0{,}40+3{,}5\cdot0{,}60)=10{,}95\ м^3_н/м^3_н \text{ смеси}.$$

5-15. Горючий газ, полученный при подземной газификации подмосковного угля, имеет следующий объемный состав: $N_2=63{,}6\%$; $H_2=14{,}5\%$; $CO=10{,}0\%$; $CO_2=9{,}5\%$; $H_2S=0{,}6\%$ и $CH_4=1{,}8\%$.

Рассчитать объем воздуха, теоретически необходимый для сгорания 1 $м^3_н$ газа.

Ответ: $v_0=0{,}798$ $м^3_н/м^3_н$ газа.

5-16. Используя условия и результаты предыдущей задачи (5-15), рассчитать объем v $м^3_н/м^3_н$ газа продуктов полного сгорания, получающихся при сгорании 1 $м^3_н$ подземного газа, если полное сгорание его осуществляется при теоретически необходимом объеме воздуха. В воздухе на каждый килограмм «сухого» (не содержащего водяных паров) воздуха содержится 10 *г* водяных паров.

Решение

Полный объем продуктов сгорания на 1 $м^3_н$ горючего газа складывается из парциальных объемов CO_2, SO_2, N_2 и объема водяных паров (H_2O) или, иначе, из объема „сухих" газов $v_{с.г}$ и объема водяных паров v_{H_2O}:

$$v = v_{с.г} + v_{H_2O}, \text{ где } v_{с.г} = v_{CO_2} + v_{SO_2} + v_{N_2} \; м^3_н/м^3_н \text{ газа.}$$

Расчет объема CO_2.

CO_2 получается в результате сгорания CO и CH_4; кроме того, углекислота содержится в самом горючем газе.

Рассматривая уравнения химических реакций горения, можно заключить, что на каждый киломоль сжигаемых окиси углерода CO и метана CH_4 получается 1 *кмоль* CO_2. Следовательно,

$$v_{CO_2} = r_{CO_2} + r_{CO} + r_{CH_4} \; м^3_н/м^3_н \text{ газа.}$$

Расчет объема SO_2.

На 2 *кмоль* сжигаемого H_2S получается 2 *кмоль* SO_2 Значит, $v_{SO_2} = r_{H_2S} \; м^3_н/м^3_н$ газа.

Расчет объема азота N_2.

Объем азота складывается из объема азота, содержащегося в самом горючем газе $v_{N_2} = r_{N_2} \; м^3_н/м^3_н$ газа, и объема азота, внесенного с воздухом.

Полный объем азота

$$v_{N_2} = v_{N_2г} + v_{N_2возд} = r_{N_2} + 0{,}79 v_0 \; м^3_н/м^3_н \text{ газа,}$$

где $v_0 = 0{,}798 \; \frac{м^3_н \text{ возд.}}{м^3_н \text{ газа}}$ — теоретически необходимый объем воздуха (см. предыдущую задачу).

Таким образом, объем сухих газов

$$v_{с.г} = v_{CO_2} + v_{SO_2} + v_{N_2} = r_{CO_2} + r_{CO} + r_{CH_4} + r_{H_2S} + r_{N_2} +$$

$$+ 0{,}79 v_0 = 0{,}095 + 0{,}100 + 0{,}018 + 0{,}006 + 0{,}636 + 0{,}79 \cdot 0{,}798 =$$

$$= 1{,}485 \; м^3_н/м^3_н \text{ газа}$$

Объем водяных паров складывается из объема водяных паров, получающихся при сгорании водорода, сероводорода и метана, а также из объема водяных паров, внесенных с воздухом Рассматривая уравнения химических реакций, видим, что на 1 *кмоль* сжигаемого H_2 получается 1 *кмоль* H_2O, на 2 *кмоль* H_2S — 2 *кмоль* H_2O и на 1 *кмоль* CH_4 — 2 *кмоль* H_2O. Значит, объем водяных паров $v^г_{H_2O}$, получающийся при сжигании 1 $м^3_н$ горючего газа, равен:

$$v^г_{H_2O} = r_{H_2} + r_{H_2S} + 2r_{CH_4}$$

Объем водяных паров $v_{H_2O}^{возд}$, внесенных с воздухом, равен:

$$v_{H_2O}^{возд} = \frac{v_0 \rho_0^{возд} d}{1\,000 \rho_0^{H_2O}}, \quad м_н^3/м_н^3 \text{ газа},$$

где $v_0 = 0{,}798$ $м_н^3/м_н^3$ газа — теоретически необходимый объем воздуха;

$\rho_0^{возд} = \frac{\mu_{возд}}{22{,}4} = \frac{29}{22{,}4} = 1{,}293$ $кг/м_н^3$ — плотность сухого воздуха,

$d = 10$ $г/кг$ с.в — количество водяного пара в граммах на каждый килограмм сухого воздуха, подводимого для сгорания;

$\rho_0^{H_2O} = \frac{\mu_{H_2O}}{22{,}4} = \frac{18{,}016}{22{,}4} = 0{,}805$ $кг/м_н^3$ — плотность водяного пара.

Таким образом, полный объем водяных паров

$$v_{H_2O} = v_{H_2O}^{г} + v_{H_2O}^{возд} = r_{H_2} + r_{H_2S} + 2r_{CH} + v_0 \frac{\rho_0^{возд} d}{1\,000 \rho_0^{H_2O}} =$$

$$= 0{,}145 + 0{,}006 + 2 \cdot 0{,}018 + 0{,}798 \frac{1{,}293 \cdot 10}{1\,000 \cdot 0{,}805} = 0{,}200 \; м_н^3/м_н^3 \text{ газа}.$$

Наконец, искомый полный объем газов

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

5-17. Рассчитать объем продуктов полного сгорания этано-водородной смеси, состав которой задан в задаче 5-14. Объем воздуха, теоретически необходимый для сгорания 1 $м_н^3$ смеси, взять из той же задачи. Влагосодержание воздуха $d = 10$ $г/кг$ с.в.

Ответ: $v = 12{,}226$ $м_н^3/м_н^3$ смеси.

6. ПРОЦЕССЫ ИЗМЕНЕНИЯ СОСТОЯНИЯ ИДЕАЛЬНЫХ ГАЗОВ

6-1. В закрытом сосуде, имеющем объем $V = 0{,}8$ $м^3$, находится углекислый газ при давлении $p_1 = 22$ $кГ/см^2$ и температуре $t_1 = 20°$ С.

Газу сообщается $Q_v = 1\,100$ $ккал$ тепла.

Определить температуру и давление углекислого газа в конце процесса. Задачу решить двумя способами: 1) считая теплоемкость постоянной и принимая ее по молекулярно-кинетической теории; 2) считая теплоемкость зависящей от температуры и пользуясь табл. 18 приложений.

Решение

1) Количество тепла, выраженное через постоянную теплоемкость и разность температур, равно:

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

Отсюда

$$t_2 = \frac{Q_v}{mc_v} + t_1, \ ^\circ C.$$

Масса газа $m = \frac{p_1 V_1}{RT_1}$, *кг*, где $R = \frac{\mu R}{\mu}$.

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

$$c_v = \frac{\mu R}{2}(\delta_{\text{пост}} + \delta_{\text{вр}})\frac{1}{\mu},$$

где $\delta_{\text{пост}} = 3$ и $\delta_{\text{вр}} = 2$ — число степеней свободы поступательного и вращательного движения молекулы CO_2 (*эта молекула линейна*).

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

$$t_2 = \frac{1\,100 \cdot 4\,187 \cdot 8\,314 \cdot 293 \cdot 44 \cdot 2}{22 \cdot 0{,}981 \cdot 10^5 \cdot 0{,}8 \cdot 44 \cdot 8\,314 \cdot 5} + 20^\circ C = 313 + 20 \approx 333^\circ C.$$

Здесь 4 187 *дж/ккал* — переводный коэффициент килокалорий в джоули;

8 314 $\frac{дж}{кмоль \cdot град} = \mu R$ — киломольная газовая постоянная;

$0{,}981 \cdot 10^5 \frac{н/м^2}{кГ/см^2}$ — переводный коэффициент для давления;

44 *кг/кмоль* $= \mu$ — масса 1 *кмоль* CO_2.

Давление в конечном состоянии

$$p_2 = p_1 \frac{T_2}{T_1} = 22 \cdot 0{,}981 \cdot 10^5 \cdot \frac{606}{293} = 44{,}6 \cdot 10^5 \ н/м^2 \approx 45{,}5 \ кГ/см^2.$$

2. Согласно первому закону термодинамики

$$Q_v = U_2 - U_1$$

откуда

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

Пользуясь табл. 18 приложений, составляем таблицу значений внутренних энергий в зависимости от температуры:

t, °C	$c_{vm}\Big\|_0^t$, *ккал/кг·град*	$u = c_{vm}\Big\|_0^t t$, *ккал/кг*
0	0,1495	0
100	0,1617	16,17
200	0,1723	34,46
300	0,1815	54,45

Линейно интерполируя, находим значение u_1 (при $t_1 = 20^\circ C$):

$$u_1 = 3{,}23 \ ккал/кг = 3{,}23 \cdot 4\,187 \ дж/кг.$$

Рассчитываем u_2:

$$u_2 = \frac{Q_v}{m} + u_1 = \frac{Q_v \mu R T_1}{p_1 V_1 \mu} + u_1 = \frac{1\,100 \cdot 4\,187 \cdot 8\,314 \cdot 293}{22 \cdot 0{,}981 \cdot 10^5 \cdot 0{,}8 \cdot 44} +$$

$$+ 3{,}23 \cdot 4\,187 = 161\,100\ дж/кг = 38{,}48\ ккал/кг.$$

По известной теперь величине u_2 из подсчитанной нами таблицы (снова интерполируя линейно в интервале 200—300° С) находим:

$$t_2 = 220°\ С.$$

Подсчитываем конечное давление:

$$p_2 = p_1 \frac{T_2}{T_1} = 22 \cdot 0{,}981 \cdot 10^5 \frac{493}{293} = 36{,}3 \cdot 10^5\ н/м^2 = 37{,}0\ кГ/см^2.$$

6-2. В газгольдере объемом $V = 15\ м^3$ находится метан CH_4 при давлении $p_1 = 8 \cdot 10^5\ н/м^2$ и температуре $t_1 = 10°\ С$. Благодаря солнечной радиации температура газа в течение дня повысилась на $\Delta t = 15°\ С$

Как возросло давление газа в газгольдере и какое количество тепла воспринял газ? Теплоемкость метана считать не зависящей от температуры. Молекула метана нелинейна.

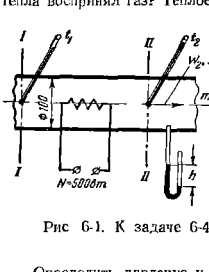


Рис 6-1. К задаче 6-4.

Ответ: $p_2 = 8{,}4 \cdot 10^5\ н/м^2 = 8{,}6\ кГ/см^2$; $Q_v = 1\,908\ кдж = 456\ ккал$.

6-3. В цилиндре карбюраторного двигателя внутреннего сгорания после сжатия горючей смеси оказывается давление $p_1 = 15\ кГ/см^2$ и температура $t_1 = 365°\ С$. В этот момент смесь поджигается при помощи электрической свечи, после чего происходит весьма быстрый процесс горения, протекающий практически при постоянном объеме

Определить давление и температуру в конце процесса, условно заменяя процесс горения смеси обратимым изохорическим процессом, в котором к рабочему телу подводится тепло $q_v = 110\ ккал/кг$.

Рабочее тело при этом считать обладающим свойствами воздуха. Теплоемкость c_v считать зависящей от температуры.

Ответ: $p_2 = 27{,}4 \cdot 10^5\ н/м^2 = 28{,}0\ кГ/см^2$; $t_2 = 917°\ С$.

6-4. Для измерения расхода азота в трубопровод диаметром 100 *мм* поставлен электрический нагреватель мощностью 500 *вт* (рис. 6-1). Омывая нагреватель, азот повышает свою температуру на $t_2 - t_1 = 3°\ С$.

Каков часовой расход азота m *кг/ч*, если U-образный манометр, установленный на трубопроводе, показывает разрежение $h = 200\ мм\ рт\ ст.$, а барометр — давление 750 *мм рт. ст.*? Какова скорость азота в сечении за нагревателем, если термометр за нагревателем показывает $t_2 = 65°\ С$?

Давление на участке $I-II$ считать неизменным.

Ответ: $m=578$ *кг/ч*; $w_2=28{,}0$ *м/сек*.

6-5. Воздух в количестве 5 $м^3/мин$ при температуре $t=20°$ С и давлении $p=1$ $кГ/см^2$ поступает в компрессор, где сжимается, затем протекает по трубкам холодильника, охлаждаемым водой.

Определить часовой расход охлаждающей воды, если на выходе из компрессора воздух имеет параметры: $p_1=8$ $кГ/см^2$ и $t_1=180°$ С. Температура воздуха за холодильником $t_2=35°$ С. Вода нагревается на $\Delta t=18°$ С. Потерями тепла пренебречь.

Ответ: $m_в=681$ *кг/ч*.

6-6. Через воздухоподогреватель котельного агрегата протекает воздух в количестве $V_0=11\,000$ $м^3_н/ч$. На входе его температура равна $t_1=45°$ С.

Какова температура t_2 воздуха на выходе из воздухоподогревателя, если топочные газы сообщают ему количество тепла, равное $Q_р=670$ *Мкал/ч*?

Определить величину работы расширения воздуха, которую он совершает в течение 1 *ч*.

Процесс подогрева воздуха считать изобарическим $p_{воз}=1$ $кГ/см^2$

Ответ: $t_2=239°$ С; $L_р=794$ *Мдж/ч*

6-7. Дымовые газы, входящие в воздухоподогреватель котельного агрегата, имеют объемный состав: $CO_2=10{,}8\%$; $O_2=6{,}6\%$; $N_{2\,атм}=80{,}7\%$; $H_2O=1{,}9\%$. Нагревая воздух, газы охлаждаются от $t_{1г}=350°$ С до $t_{2г}=160°$ С.

Определить температуру нагретого воздуха, если известно, что часовой расход дымовых газов $V_0=53\,000$ $м^3_н/ч$; часовой расход воздуха $m_в=51\,000$ *кг/ч*; температура воздуха на входе в воздухоподогреватель $t_{1в}=45°$ С

Воздухоподогреватель теряет в окружающую среду 4% от тепла, отнимаемого у газов.

Решение

Процессы нагревания воздуха и охлаждения газов можно считать изобарическими. Поэтому тепло, отданное газами и воспринятое воздухом, следует полагать равным убыванию (или приращению) энтальпий: $Q_г=I_{1г}-I_{2г}$; $Q_в=I_{2в}-I_{1в}$. Баланс тепла в процессе теплообмена следует записать:

$$0{,}96(I_{1г}-I_{2г})=I_{2в}-I_{1в},\ ккал/ч.$$

Так как состав дымовых газов задан в объемных долях, удобно пользоваться таблицами [Л. 6], в которых имеются данные по энтальпиям, отнесенным к 1 $м^3_н$.

Уравнение баланса можно переписать:

$$0{,}96V_0\,(i'_{1г}-i'_{2г})=m_в\,(i_{2в}-i_{1в})\ ккал/ч.$$

Здесь $i'_{1г}$ и $i'_{2г}$ $ккал/м^3_н$ — удельные энтальпии дымовых газов отнесенные к 1 $м^3_н$, $i_{1в}$ и $i_{2в}$, $ккал/кг$ — удельные энтальпии воздуха, отнесенные к 1 *кг*.

По принципу аддитивности энтальпий имеем для смеси газов:

$$i'_г=\sum_1^n i'_j r_j=i'_{CO_2}r_{CO_2}+i'_{O_2}r_{O_2}+i'_{N_2атм}r_{N_2атм}+$$

$$+i'_{H_2O}r_{H_2O},\ ккал/м^3_н$$

Составляем расчетную таблицу:

t, °C	i'_{CO_2}	i'_{O_2}	$i'_{N_2,атм}$	i'_{H_2O}	$(r_i)_{CO_2}$	$(r_i)_{O_2}$	$(r_i)_{N_2,атм}$	$(r_i)_{H_2O}$	$i'_г = \sum_1^n r_j i'_j$
160	67,48	50,86	49,63	58,01	7,29	3,36	40,05	1,10	51,8 *ккал/м*$^3_н$
350	159,0	114,4	109,7	130,1	17,17	7,55	88,53	2,47	115,7

Находим энтальпию воздуха $i_{2в}$, *ккал/кг*, определив по таблицам $i_{1в} = 10{,}81$ *ккал/кг* (при температуре $t_{1в} = 45°$ С):

$$i_{2в} = \frac{0{,}96V_0 (i'_{1г} - i'_{2г}) + m_в i_{1в}}{m_в} =$$

$$= \frac{0{,}96 \cdot 53\,000\,(115{,}7 - 51{,}8) + 51\,000 \cdot 10{,}81}{51\,000} = 74{,}6 \text{ ккал/кг}.$$

По величине $i_{2в}$ в таблицах, интерполируя, находим:

$$t_{2в} = 306° \text{ С}.$$

6-8. Средний состав дымовых газов, омывающих поверхности нагрева котельного агрегата, задан объемными долями:

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

Определить, сколько тепла отдает каждый килограмм газов при прохождении по газоходу, если на входе в него они имеют температуру $t_1 = 1\,100°$ С, а на выходе $t_2 = 180°$ С. Считать, что абсолютное давление газов в процессе теплообмена не меняется.

Ответ: $q_р = -1\,044$ *кдж/кг*

6-9. В цилиндре, площадь поперечного сечения которого равна 1 *дм*^{2}, под поршнем находится 1/2 *кмоль* азота N_2 при температуре $t_1 = 63°$ С. Поршень находится под постоянной внешней нагрузкой $F = 2$ *кн*. Газу извне сообщается тепло $Q = 1\,500$ *ккал*, вследствие чего он расширяется, отодвигая поршень.

Определить параметры p, v, t в конце процесса, изменение внутренней энергии ΔU, изменение энтальпии ΔI и величину работы расширения L совершенной газом.

Ответ: $p_2 = p_1 = 2 \cdot 10^5$ *н/м*^{2}, $v_2 = 0{,}499$ *м*^{3}*/кг*; $t_2 = 483°$ С; $\Delta U = 4\,534$ *кдж*, $\Delta I = 6\,280$ *кдж*, $L = 1\,746$ *кдж*.

6-10. Воздух в количестве 0,1 *м*^{3}*/сек* при температуре $t = 30°$ С и давлении $p = 1$ *бар* поступает в компрессор, где сжимается, а затем протекает между труб холодильника, в которых движется охлаждающая вода.

Определить часовой расход воды, если на выходе из компрессора воздух имеет параметры $p_1 = 8$ *бар* и $t_1 = 200°$ С. Температура воздуха за холодильником $t_2 = 40°$ С. Вода нагревается на $\Delta t = 20°$ С. Потерями тепла пренебречь.

Ответ: $m_в = 800$ *кг/ч*

6-11. 0,5 $м^3_н$ окиси углерода находится в состоянии при $p_1 = 25$ $кГ/см^2$ и $t_1 = 350°$ С. В изотермическом процессе к газу подведено тепло $Q = 20$ *ккал*.

Найти параметры p, v начального и конечного состояний, работу расширения, совершенную газом, изменение внутренней энергии и энтальпии.

Ответ: $v_1 = 0{,}0754$ $м^3/кг$, $v_2 = 0{,}1556$ $м^3/кг$; $p_2 = 12{,}1$ $кГ/см^2 = 11{,}9 \cdot 10^5$ $н/м^2$; $L = 83{,}74$ $кдж$, $\Delta U = 0$, $\Delta I = 0$

6-12. Во сколько раз изменится абсолютное значение работы изотермического сжатия 1 *кг* идеального газа, имеющего температуру $T°$ К и давление $p_1 = 1$ *бар*, если конечное давление p_2 в первом процессе равно 10 *бар*, а в других увеличивается в 10, 100 и 1 000 раз?

Как изменится величина 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

6-13. 3,5 $м^3_н$ азота, находящегося в первоначальном состоянии при $p_1 = 1{,}1 \cdot 10^5$ $н/м^2$ и $t = 25°$ С, сжимаются изотермически до давления $p_2 = 24{,}2$ *бар*. Найти удельные объемы в начальном и конечном состояниях, работу, затраченную на сжатие и тепло, отведенное от газа

Ответ: $v_1 = 0{,}804$ $м^3/кг$, $v_2 = 0{,}0365$ $м^3/кг$. $L = Q = -1\,198$ $кдж$.

6-14. Применив первый закон термодинамики, показать, что кривая, изображающая адиабату идеального газа в pv-координатах, проходит всегда круче, чем кривая изотермического процесса.

Решение

Для адиабатического процесса $dl = -du$. Поэтому при расширении идеального газа температура его всегда падает, а при сжатии — растет, так как $u = f(t)$.

Рассматривая два процесса — адиабатический и изотермический, в которых расширение происходит до одного и того же объема (рис. 6-2), можно заключить, что адиабатический процесс не может заканчиваться точкой $2''$, лежащей выше точки 2 на изотерме, потому что $t''_2 > t_2$. Равным образом точки конца адиабатического и изотермического расширения не могут совпадать. Следовательно, конечная точка адиабаты $2'$ должна лежать ниже конечной точки изотермы.

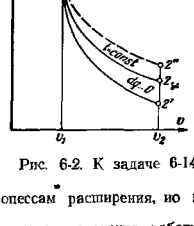


Рис. 6-2. К задаче 6-14

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

6-15. Во сколько раз изменится абсолютное значение работы адиабатического сжатия 1 *кг* идеального газа, для которого $k = 1{,}4$, имеющего начальную температуру $T_1°$ К и давление $p_1 = 1$ *бар*, если

конечное давление p_2 в первом процессе равно 10 *бар*, а в других увеличивается в 10, 100 и 1 000 раз?

Как изменится величина 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 во столько же раз возрастет значение работы.

6-16. При адиабатическом расширении 1 *кг* воздуха ($k=1{,}4=$ $=$const) температура его падает на 120° С

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

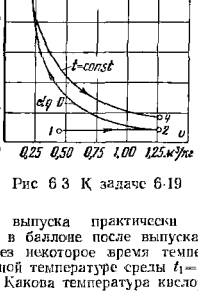


Рис 6 3 К задаче 6-19

Ответ: $l_{а\,т}=q_{ца}=86{,}1$ *кдж/кг*

6-17. Какова начальная температура t_1 азота, если его конечная температура после совершения процесса адиабатического сжатия $t_2=750°$ С? Известна степень сжатия $\varepsilon=v_1/v_2=10$ Теплоемкости c_p и c_v постоянны

Ответ: $t_1=134°$ С

6-18. В баллоне объемом 40 *л* находится сжатый кислород при $p_1=140$ *кГ/см²* 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 после выпуска оказывается равным $p_2=70$ *кГ/см²*. Через некоторое время температура кислорода снова становится равной температуре среды $t_1=20°$ С

Какова температура кислорода в баллоне сразу после выпуска? Какое количество кислорода вытекло из баллона? Чему равно давление после восстановления первоначальной температуры?

Какое количество кислорода вытекло бы, если бы выпуск производился весьма медленно, температура газа при этом не менялась бы, а конечное давление $p_2=70$ *кГ/см²*?

Ответ: После выпуска $t_2=-23°$ С, выпущено $\Delta G_{вд}=2{,}99$ *кГ*; $p_3=82{,}1$ *кГ/см²*; при «изотермическом» выпуске $\Delta G_{из}=3{,}61$ *кГ*

6-19. Воздух, взятый в количестве 1 *кг* при параметрах $p_1=$ $=2\cdot10^5$ *н/м²* и $t_1=37°$ С, последовательно меняет свое состояние следующим образом (рис. 6-3): сначала он изобарически расширяется до объема $V_2=2{,}85\cdot V_1$, затем адиабатически сжимается до давления $p_3=28\cdot10^5$ *н/м²* и, наконец, изотермически расширяется до $V_4=V_2$

Определить «недостающие» параметры во всех характерных точках, подсчитать подведенное или отведенное тепло, изменение внутренней энергии и энтальпии, а также работу деформации в каждом процессе Проверить уравнение первого закона термодинамики для совокупности процессов

Теплоемкости c_p и c_v принять не зависящими от температуры и рассчитать согласно молекулярно кинетической теории.

Ответ:

Номера точек	p, бар	v, м³/кг	t, °С	T °К
1	2	0,444	37	310
2	2	1,265	610	883
3	28	0,1921	1 602	1 875
4	4,26	1,265	1 602	1 875

Номера процессов	q	Δu	Δi	l
	кдж/кг			
1—2	575	164	575	411
2—3	0	711	996	—711
3—4	1 011	0	0	1 011
Σ	1 586	875	1 571	711

6-20. В двигателе Дизеля топливо, впрыскиваемое в цилиндр, самовоспламеняется при соприкосновении со сжатым воздухом, имеющим температуру, бо́льшую, чем температура воспламенения топлива.

Определить минимально 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 $p_1 = 0{,}97$ $кГ/см^2$, $t_1 = 60°$ С. Сжатие считать адиабатическим. Задачу решить, не учитывая зависимости теплоемкости от температуры и принимая $k = 1{,}4$.

Ответ: $\varepsilon = 12{,}1$, $p_2 = 31{,}8$ $кГ/см^2$.

6-21. Решить предыдущую (6-20) задачу, учитывая зависимость показателя адиабаты от температуры и применяя таблицы ВТИ [Л. 3].

Решение

По температурам $t_1 = 60°$ С и $t_2 = 630°$ С в таблицах находим:

$$\theta_{01} = 4873,\ \theta_{02} = 346{,}4,\ \pi_{01} = 2{,}0011,\ \pi_{02} = 76{,}323.$$

В виду того что

$$\varepsilon = \frac{V_1}{V_2} = \frac{\theta_{01}}{\theta_{02}} \text{ и } \frac{p_1}{p_2} = \frac{\pi_{01}}{\pi_{02}},$$

$$\varepsilon = \frac{4\,873}{346{,}4} = 14{,}07, \quad p_2 = p_1 \frac{\pi_{02}}{\pi_{01}} = 0{,}97 \frac{76{,}323}{2{,}0011} = 37{,}0\ кГ/см^2.$$

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

6-22. В соплах и на лопатках газовой турбины адиабатически расширяются $m=1\,500$ *кг/ч* двуокиси углерода CO_2. Параметры газа на входе в турбину: $p_1=7\cdot10^5$ *н/м*^{2}; $t_1=700°$ С. На выходе $p_2=0{,}98\cdot10^5$ *н/м*^{2}.

Определить параметры CO_2 на выходе, полезную внешнюю работу газа $L'=-m\int_{p_1}^{p_2} v\,dp$ (см. рис. 6-4) и теоретическую (т. е. без потерь) мощность турбины N_0. Расчет сделать с учетом зависимости теплоемкостей от t, применяя таблицы.

Ответ: $v_2=1{,}371$ *м*^{3}*/кг*; $t_2=437°$ С;

$$L'=466\ Мдж/ч;\ N_0=129\ квт.$$

6-23. В компрессор газотурбинной установки входит воздух, имея параметры $p_1=1$ *бар* и $t_1=20°$ С. Воздух сжимается адиабатически до давления $p_2=30$ *бар*. Определить температуру в конце адиабатического сжатия.

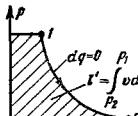


Рис. 6-4. К задаче 6-21.

Задачу решить с помощью таблиц ВТИ [Л. 3]

Ответ: $t_2=482°$ С.

6-24. 2 *кмоль* O_2 при параметрах $p_1=40\cdot10^5$ *н/м*^{2} и $t_1=620°$ С адиабатически расширяются до давления $p_2=12\cdot10^5$ *н/м*^{2}.

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

Задачу решить методом последовательного приближения по табл. 9 приложений и проверить решение по таблицам ВТИ [Л. 3].

Решение

Удельный объем в начальной точке

$$v=\frac{RT_1}{p_1}=\frac{8\,314\cdot893}{32\cdot40\cdot10^5}=0{,}0580\ м^3/кг.$$

Считаем, что адиабатический процесс подчиняется уравнению

$$pv^{k_{ср}}=\text{const},$$

где $k_{ср}$ есть некоторый средний показатель, равный средней арифметической величине из значений показателей адиабаты $k=c_p/c_v$, взятых по начальной и конечной температурам процесса:

$$k_{ср}=\frac{k_1+k_2}{2}.$$

$k_1=c_{p1}/c_{v1}$; истинные теплоемкости c_{p1} и c_{v1} находим по табл. 9 приложений, линейно интерполируя в стоградусном интервале температур.

При $t_1 = 620°$ С; $c_{p1} = 0{,}2561$ *ккал/кг*; $c_{v1} = 0{,}1940$ *ккал/кг*;

$$k_1 = \frac{0{,}2561}{0{,}1940} = 1{,}320.$$

В первом приближении, учитывая, что k возрастает с падением температуры, принимаем $k_2^{\text{I}} = 1{,}360$.

Тогда $k_{\text{ср}}^{\text{I}} = \dfrac{k_1 + k_2^{\text{I}}}{2} = \dfrac{1{,}320 + 1{,}360}{2} = 1{,}340.$

Определяем T_2^{I} в первом приближении:

$$T_2^{\text{I}} = T_1 \left(\frac{p_2}{p_1}\right)^{\frac{k_{\text{ср}}^{\text{I}} - 1}{k_{\text{ср}}^{\text{I}}}} = 893 \left(\frac{12}{40}\right)^{\frac{0{,}340}{1{,}340}} = 658° \text{ К}; \quad t_2^{\text{I}} = 385° \text{ С}.$$

По найденной t_2^{I} в таблицах находим c_{p2}^{II}, c_{v2}^{II} и подсчитываем k_2^{II} и $k_{\text{ср}}^{\text{II}}$ во втором приближении:

$$k_2^{\text{II}} = \frac{c_{p2}^{\text{II}}}{c_{p2}^{\text{II}}} = \frac{0{,}2435}{0{,}1814} = 1{,}342;$$

$$k_{\text{ср}}^{\text{II}} = \frac{k_1 + k_2^{\text{II}}}{2} = \frac{1{,}320 + 1{,}342}{2} = 1{,}331.$$

Температура во втором приближении

$$T_2^{\text{II}} = T_1 \left(\frac{p_2}{p_1}\right)^{\frac{k_{\text{ср}}^{\text{II}} - 1}{k_{\text{ср}}^{\text{II}}}} = 662° \text{ К}; \quad t_2^{\text{II}} = 389° \text{ С}.$$

Таким же способом находим T_2^{III} в третьем приближении, определяя:

$$k_2^{\text{III}} = \frac{c_{p2}^{\text{III}}}{c_{v2}^{\text{III}}} = \frac{0{,}2437}{0{,}1816} = 1{,}342; \quad k_{\text{ср}}^{\text{III}} = \frac{1{,}320 + 1{,}342}{2} = 1{,}331.$$

Удовлетворившись точностью расчета температуры ± 1 *град*, заканчиваем расчет и принимаем окончательно, что $t_2 = 389°$ С, так как $k_{\text{ср}}^{\text{III}} = k_{\text{ср}}^{\text{II}}$.

Подсчитываем удельный объем в конечной точке:

$$v_2 = v_1 \left(\frac{p_1}{p_2}\right)^{\frac{1}{k_{\text{ср}}^{\text{III}}}} = 0{,}0580 \left(\frac{40}{12}\right)^{\frac{1}{1{,}331}} = 0{,}1433 \text{ м}^3/\text{кг}.$$

Проверяем уравнение состояния:

$$v_2 = \frac{RT_2}{p_2} = \frac{8\,314 \cdot 662}{32 \cdot 12 \cdot 10^5} = 0{,}1433 \ м^3/кг.$$

Удельная величина работы расширения

$$l = \frac{R}{k_{ср}^{III} - 1}(T_1 - T_2) = \frac{8\,314\,(893 - 662)}{32 \cdot (1{,}331 - 1)} = 181{,}32 \ кдж/кг.$$

Изменение внутренней энергии 1 *кг* O_2:

$$u_2 - u_1 = c_{vm}\int_0^{t_2} t_2 - c_{vm}\int_0^{t_1} t_1 = 0{,}1680 \cdot 389 -$$

$$- 0{,}1756 \cdot 620 = -43{,}5 \ ккал/кг.$$

Изменение энтальпии

$$i_2 - i_1 = 89{,}6 - 147{,}4 = -57{,}8 \ ккал/кг.$$

Проверяем уравнение первого закона термодинамики $l = -\Delta u$:

$$l = \frac{181{,}32}{4{,}1868} = 43.3 \ ккал/кг.$$

Невязка составляет менее 0,5%, что допустимо.

Проверяем решение по таблицам ВТИ [Л 3]. При температуре t_1 находим $\pi_{01} = 326{,}53$. Тогда $\pi_{02} = \pi_{01}\frac{p_2}{p_1} = 326{,}53 \cdot \frac{12}{40} = 97{,}959$.

По величине π_{02} находим $t_2 = 339{,}2°$ С.

Изменение внутренней энергии

$u_2 - u_1 = 107{,}60 - 151{,}05 = -43{,}45$ *ккал/кг*.

Изменение энтальпии

$i_2 - i_1 = 148{,}68 - 206{,}48 = -57{,}80$ *ккал/кг*.

Работа $l = -(u_2 - u_1) = 43{,}45 \cdot 4{,}1868 = 181{,}92$ *кдж/кг*.

Расхождение между двумя значениями работ (по методике последовательного приближения и по методике ВТИ) составляет всего 0,3%.

Искомые величины для полного количества газа:

$L = -\Delta U = 64 \cdot 181{,}92 = 11\,643$ *кдж*.

$\Delta I = -64 \cdot 57{,}80 \cdot 4{,}1868 = -15\,488$ *кдж*.

6-25. В двигателе Дизеля воздух при давлении $p_1 = 1{,}02 \cdot 10^5$ *н/м*^{2} и температуре $t_1 = 40°$ С сжимается адиабатически. Степень сжатия $\varepsilon = 18$.

Определить конечное давление и конечную температуру. Задачу решить с помощью табл. 11 приложений, применяя метод последовательных приближений.

Ответ: $t_2 = 644°$ С; $p_2 = 53{,}8 \cdot 10^5$ *н/м²*.

6-26. В поршневом компрессоре сжимается воздух, имеющий давление $p_1 = 1$ *кГ/см²* и температуру $t_1 = 20°$ С. Процесс сжатия политропический с показателем политропы $n = 1{,}3$. Давление в конце сжатия $p_2 = 7$ *кГ/см²*.

Определить работу сжатия для 1 *кг* воздуха и количество отнятого тепла.

Ответ: $l = -159$ *кдж/кг*; $q = -9{,}5$ *ккал/кг*.

6-27. Поршневой компрессор производительностью $V_0 = 2\,100$ *м³/ч* засасывает воздух, имеющий параметры $p_1 = 0{,}98 \cdot 10^5$ *н/м²* и $t_1 = 25°$ С, и сжимает его до давления $p_2 = 9{,}90 \cdot 10^5$ *н/м²*. Процесс сжатия — политропический с показателем $n = 1{,}20$.

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

Ответ: $m_в = 4{,}3 \cdot 10^5$ *кг/ч*.

6-28. 1 *кг* азота N_2 в начальном состоянии имеет параметры $p_1 = 25 \cdot 10^5$ *н/м²* и $t_1 = 700°$ С. После политропического расширения (показатель политропы $n = 1{,}180$) давление его становится равным $p_2 = 1 \cdot 10^5$ *н/м²*.

Определить изменение внутренней энергии Δu_{1-2}, количество тепла, сообщенное газу в процессе q_{1-2} и работу расширения l_{1-2}.

Постоянные теплоемкости c_v и c_p условно считать равными средним теплоемкостям $c_{vm}|_{t_1}^{t_2}$ и $c_{vm}|_{t_1}^{t_2}$.

Каким получилось бы значение q_{1-2}, если бы c_v и c_p считать по молекулярно-кинетической теории без учета их зависимости от температуры?

Решение

Прежде всего находим конечную температуру t_2:

$$T_2 = T_1 \left(\frac{p_2}{p_1}\right)^{\frac{n-1}{n}} = 973 \left(\frac{1}{25}\right)^{\frac{0{,}180}{1{,}180}} = 596° \text{ K, или } t_2 = 323° \text{ C}.$$

Подсчитываем величину работы:

$$l_{1-2} = \frac{R}{n-1}(T_1 - T_2) = \frac{8{,}314}{0{,}18 \cdot 28}(700 - 323) = 622 \text{ кдж/кг}.$$

Изменение внутренней энергии

$$\Delta u_{1-2} = c_v (t_2 - t_1) = c_{vm}|_{t_1}^{t_2}(t_2 - t_1) = c_{vm}|_0^{t_2} t_2 - c_{vm}|_0^{t_1} t_1 =$$

$$= 0{,}1800 \cdot 323 + 0{,}1887 \cdot 700 = -74{,}0 \text{ ккал/кг}.$$

Здесь средние теплоемкости $c_{vm}|_0^t$ взяты из табл. 8 приложений. Тепло процесса

$$q_{1-2} = c_v \frac{n-k}{n-1}(t_2 - t_1) = c_{vm}|_{t_1}^{t_2} \frac{n-k}{n-1}(t_2 - t_1) = \Delta u_{1-2} \frac{n-k}{n-1}.$$

Так как $k=\frac{c_p}{c_v}=\frac{c_p\Delta t}{c_v\Delta t}$, а по условию $c_p=c_{pm}\big|_{t_1}^{t_2}$ и $c_v=c_{vm}\big|_{t_1}^{t_2}$, то $k=\frac{\Delta i_{1-2}}{\Delta u_{1-2}}$.

Величину Δi_{1-2} находим из таблицы:

$$\Delta i_{1-2}=i_2-i_1=80,9-181,7=-100,8 \text{ ккал/кг}.$$

Следовательно,

$$k=\frac{\Delta i_{1-2}}{\Delta u_{1-2}}=\frac{100,8}{74,0}=1,362,$$

а тепло процесса

$$q_{1-2}=-74,0\cdot\frac{1,180-1,362}{1,180-1}=74,8 \text{ ккал/кг}.$$

Проверяем, выполняется ли первый закон термодинамики для нашего процесса:

$$q_{1-2}=\Delta u_{1-2}+l_{1-2}=-74,0+\frac{622}{4,1868}=74,6 \text{ ккал/кг}.$$

Невязка в расчете, равная 74,8—74,6=0,2 *ккал/кг*, или $\sim$0,3%, допустима.

Если бы мы вели расчет, не учитывая влияние температуры на теплоемкости c_v и c_p, то тепло q_{1-2} должны были подсчитать, принимая

$$k=1,40, \text{ а } c_v=\frac{1,986}{2}\cdot\frac{5}{28} \text{ ккал/кг}\cdot\text{град}.$$

Тогда мы получили бы:

$$q'_{1-2}=c_v\frac{n-k}{n-1}=\frac{1,986}{2}\cdot\frac{5}{28}\cdot\frac{1,18-1,40}{1,18-1}(323-700)=81,7 \text{ ккал/кг}.$$

Расхождение $q'_{1-2}-q_{1-2}$=81,7—74,6=7,1 *ккал/кг*, равное примерно 10%, слишком велико. Следовательно, пренебрегать зависимостью теплоемкостей от температуры при расчете q (а так же и Δu) в политропическом процессе не следует, если температуры процесса достаточно велики.

6-29. При политропическом расширении газа его объем увеличивается на 20%, а абсолютная температура уменьшается на 12%.

Показать примерный ход процесса для двухатомного газа в координатах *pv* и подсчитать величину работы μl, если t_1=227° С.

Ответ: n=1,701; μl=712 *кдж/кмоль* (рис. 6-5).

6-30. В политропическом процессе расширения окиси углерода энергия, выделяемая газом в форме работы, составляется за счет подводимого тепла (25%) и за счет уменьшения внутренней энергии газа (75%).

Определить показатель политропы и теплоемкость процесса. Представить ход процесса в *pv*-диаграмме.

Ответ: n=1,30; c= —0,059*1 ккал/кг*·*град*=0,247 *кдж/кг*·*град* (рис. 6-6).

6-31. При сжатии воздуха подведено 12 *ккал/кг* тепла. В конце процесса температура воздуха увеличилась на 100° С.

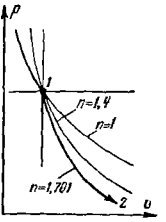


Рис 6-5. К задаче 6-29.

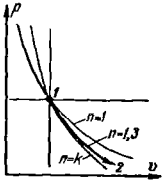


Рис. 6-6. К задаче 6-30.

Определить показатель политропы сжатия. Подсчитать процентное соотношение между работой, теплом и изменением внутренней энергии. Изобразить в *pv*-диаграмме примерный ход процесса.

Ответ: $n=2{,}316$; q — составляет 69,8% от величины Δu; l составляет 30,2% от величины Δu (рис. 6-7).

6-32. Некоторый процесс расширения кислорода характеризуется тремя равновесными состояниями, в которых параметры имеют следующие значения: 1) $p_1=20\cdot10^5$ *н/м*^{2}, $t_1=487°$ С; 2) $p_2=10\cdot10^5$ *н/м*^{2}, $v_2=0{,}427$ *м*^{3}*/кг*; 3) $v_3=0{,}300$ *м*^{3}*/кг*, $t_3=576°$ С.

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

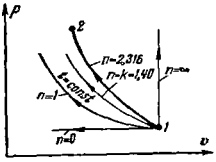


Рис. 6-7. К задаче 6-31.

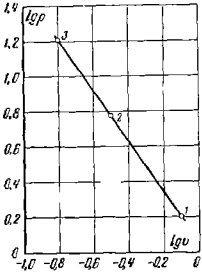


Рис 6-8. К задаче 6-33.

Ответ: Процесс политропический, $n=0{,}90$.

6-33. На рис. 6 8 показан некоторый политропический процесс *1-2-3* в координатах $\lg p-\lg v$.

Определить показатель политропы этого процесса.

Ответ: $n=1{,}443$.

7. ВТОРОЙ ЗАКОН ТЕРМОДИНАМИКИ

7-1. Определить изменение энтропии 3 *кг* азота в политропическом процессе при изменении температуры от $t_1=100^\circ$ С до $t_2=300^\circ$ С. Показатель политропы равен $n=1{,}2$. Теплоемкости принять по молекулярно-кинетической теории. Изобразить процесс в pV- и TS-диаграммах.

Ответ: $\Delta S=-0{,}956$ *кдж/°К*.

7-2. Средняя теплоемкость c_p алюминия в интервале от 0 до 300° С равна 0,228 *ккал/кг · град*.

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

Ответ: $S=16{,}90$ *ккал/°К*.

7-3. 50 *кг* льда, имеющего начальную температуру —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 равна $\lambda=79{,}4$ *ккал/кг*, теплоемкость льда $c_p=0{,}485$ *ккал/кг · град*. Теплоемкость воды принять равной 1 *ккал/кг · град*.

Ответ: 17,65 *ккал/°* К.

7-4. Построить в TS координатах изобары воздуха в пределах от 0 до 1 500° С, соответствующие 0,1; 1 и 10 *кГ/см²*, приняв значение энтропии воздуха равным нулю при $t=0^\circ$ С и $p=1$ *кГ/см²*. Построение произвести по точкам, отстоящим на 300° С друг от друга. Теплоемкость считать линейной функцией температуры.

7-5. *1 кг* азота и 1 *кг* водорода сжимаются изотермически при $t=15^\circ$ С от $1\cdot10^5$ до $10\cdot10^5$ *н/м²*.

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

Ответ:

$$\frac{\Delta S_{H_2}}{\Delta S_{N_2}}=13{,}9.$$

7-6. Определить изменение энтропии в процессе испарения 1 *кг* воды при давлении, равном 1 *ат* физ., если известно, что теплота парообразования составляет $r=539{,}0$ *ккал/кг*.

Ответ: $\Delta s=1{,}444$ *ккал/кг · °К*.

7-7. Определить изменение энтропии 1 *кг* CO_2 в процессе сжатия. Начальные параметры углекислоты $t_1=40^\circ$ С, $p_1=2\cdot10^5$ *н/м²*, конечные $t_2=253^\circ$ С, $P_2=45\cdot10^5$ *н/м²*. Расчет сделать в двух вариантах: а) рассчитывая теплоемкость углекислоты по молекулярно-кинетической теории; б) учитывая зависимость теплоемкости от температуры, применив для расчета табл. 18 приложений.

Решение

а) Принимая теплоемкость углекислоты по молекулярно-кинетической теории и учитывая, что молекула CO_2 имеет линейную структуру, имеем:

$$s_2-s_1=\frac{8{,}314\cdot7}{2\cdot44{,}01}2{,}303\lg\frac{526}{313}-\frac{8{,}314}{44{,}01}2{,}303\lg\frac{45}{2}=$$

$$=0{,}3435-0{,}5883=-0{,}2448\ \textit{кдж/кг · град}.$$

б) С помощью табл 18 изменение энтропии рассчитывается следующим образом:

$$s_2 - s_1 = s_2^{\text{табл}} - s_1^{\text{табл}} - R \ln \frac{p_2}{p_1}.$$

Величины $s_2^{\text{табл}}$ и $s_1^{\text{табл}}$ находятся соответственно по температурам t_2 и t_1. Переводя значение табличных энтропий в килоджоули, получаем:

$$s_2 - s_1 = (0,1432 - 0,0257) \cdot 4,1868 - $$
$$- 0,5883 = -0,0964 \ кдж/кг \cdot град.$$

Результаты расчетов а и б сильно отличаются друг от друга, потому что вычисление теплоемкости при помощи молекулярно-кинетической теории для CO_2 приводит к плохим результатам

Для расчета можно с успехом воспользоваться и таблицами ВТИ [Л 3] Формула будет выглядеть аналогично.

$$s_2 - s_1 = s_2^0 - s_1^0 - R \ln \frac{p_2}{p_1}.$$

7-8. Расчет вероятности термодинамического состояния имеет смысл производить для систем (газов), состоящих из большого числа частиц. Однако в учебных целях для ознакомления с этой величиной можно произвести расчет для малых чисел.

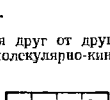


Рис 7-1. К задаче 7-8.

Пусть имеется объем, мысленно разделенный на 4 части, в котором находятся 8 молекул.

Определить вероятность термодинамического состояния w для трех случаев распределения молекул, указанных на рис. 7-1.

Решение

Вероятность термодинамического состояния рассчитывается по формуле

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

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

$$w_1 = \frac{N!}{N_1! N_2! N_3! N_4!} = \frac{8!}{2!2!2!2!} = 2\,520;$$

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, что 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 половине сосуда. При наблюдении за 16 молекулами один такой же случай будет зафиксирован в среднем на 90 090 наблюдений равномерного распределения молекул.

7-10. Температура газов, выходящих из земли, для некоторых горячих источников доходит до 180° С.

Определить максимальный термический к. п. д., который имел бы тепловой двигатель, превращающий тепло этого источника в работу. Температура среды равна 20° С.

Ответ: $\eta_t = 0{,}353$.

7-11. В паротурбинной установке средняя температура водяного пара в процессе нагревания его за счет сгоревшего топлива равна 350° С. Температура конденсации пара равна 28° С.

Определить термический к. п. д. ПТУ и теоретическую мощность установки. Известно, что в этой установке сжигается 50 *т/ч* топлива с теплотой сгорания $Q_н^р = 4\,000$ *ккал/кг*.

Ответ: $\eta_t = 0{,}517$; $N_{теор} = 120\,000$ *квт*.

7-12. Холодильная установка имеет холодопроизводительность 6 000 *ккал/ч* и создает температуру в охлаждаемом помещении $t = -10°$ С. Температура помещения, в котором стоит холодильная установка, равна 20° С. Приняв, что холодильная установка работает по обратному циклу Карно, определить холодильный коэффициент ε, количество тепла q_1, которое передает установка верхнему тепловому источнику (среде), и теоретическую мощность привода установки $N_{теор}$.

Определить, будет ли нагреваться или охлаждаться помещение после включения холодильной установки и количество тепла q'', *ккал/час*, которое будет подводиться (отводиться) к воздуху в комнате.

Ответ: $\varepsilon = 8{,}77$; $N_{теор} = 0{,}795$ *квт*; $q' = 27\,980$ *кдж/ч* = 6 680 *ккал/ч*; $q'' = 2\,860$ *кдж/ч* = 683 *ккал/ч*. Помещение будет нагреваться.

7-13. Определить энтропию 1 *кг* газовой смеси при давлении $p = 3$ *кГ/см²* и температуре $t = 300°$ С, состоящей из азота и аргона. Массовые доли азота и аргона равны $g_{N_2} = 0{,}37$, $g_{Ar} = 0{,}63$. Газы считать идеальными. Принять, что энтропия азота и аргона равна нулю при параметрах $p_0 = 1$ *кГ/см²* и $t_0 = 0°$ С. Пользоваться табл. 8 приложений.

Решение

Энтропия смеси равна сумме энтропий отдельных газов и энтропии смешения.

Энтропия 0,37 *кг/кг* см азота равна.

$$s_{N_2} = \left(s_2 - s_1 - R \ln \frac{p}{p_0}\right) g_{N_2} =$$

$$= \left(0{,}1854 - 0 - \frac{1{,}986}{28{,}016} \cdot 2{,}303 \lg 3\right) \cdot 0{,}37 = 0{,}0398 \text{ } ккал/кг \text{ см.°К}.$$

где $s_2 - s_1$ 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/кг* см. аргона равна:

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

$$= \left(\frac{1,986 \cdot 5}{2 \cdot 39,944} \lg \frac{573}{273} - \frac{1,986}{39,944} \lg 3 \right) 0,63 \cdot 2,303 =$$

$$= 0,0236 \text{ ккал/кг см.°К.}$$

Энтропия смешения рассчитывается:

$$\Delta s = g_{Ar} R_{Ar} \ln \frac{1}{r_{Ar}} + g_{N_2} R_{N_2} \ln \frac{1}{r_{N_2}} =$$

$$= 0,63 \cdot \frac{1,986}{39,944} \cdot 2,303 \lg \frac{1}{0,5443} + 0,37 \frac{1,986}{28,016} \times$$

$$\times 2,303 \lg \frac{1}{0,4557} = 0,0452 \text{ ккал/кг см.°К,}$$

где

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

$$r_{N_2} = 0,4557.$$

Энтропия 1 *кг* смеси при заданных параметрах равна:

$$s = s_{N_2} + s_{Ar} + \Delta s = 0,0398 + 0,0236 + 0,0452 =$$

$$= 0,1086 \text{ ккал/кг см.°К.}$$

7-14. Определить, насколько увеличится энтропия при смешении 3 *кг* N_2 и 2 *кг* CO_2. Газы считать идеальными. Температура и давление газов до смешения одинаковы.

Ответ: $\Delta S = 0,7725$ *кдж/°К.*

7-15. Смесь газов, состоящая из 30% азота и 70% водорода (по объему), находится при 20° С и 1,8 *кГ/см²*.

Вычислить энтропию 1 *кг* смеси; считать, что энтропия обоих компонентов при нормальных условиях равна нулю. При расчете учитывать, что теплоемкость газа переменна. Считать, что между азотом и водородом не происходит химической реакции.

Ответ: $s = 0,0608$ *ккал/кг · °К.*

7-16. 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 среды $t_{ср}=15°$ С. Газы считать идеальными.

Решение

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

$$\Delta l = T_{ср}\Delta s.$$

Изменение энтропии в процессе смешения рассчитывается:

$$\Delta s = g_1 R_1 \ln\frac{1}{r_1} + g_2 R_2 \ln\frac{1}{r_2}.$$

Здесь индексы 1 и 2 относятся к первому и второму газу соответственно, а g и r—весовые и объемные доли.

$$\Delta s = 0{,}2329\,\frac{1{,}986}{32}\cdot 2{,}303\lg\frac{1}{0{,}21} + 0{,}7671\times$$

$$\times\frac{1{,}986}{28{,}016}\cdot 2{,}303\lg\frac{1}{0{,}79} = 0{,}0354\ \textit{ккал/кг}\cdot°\text{К} =$$

$$= 0{,}1481\ \textit{кдж/кг}\cdot°\text{К},$$

где

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

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

Минимальная работа, необходимая для разделения газов, равна:

$$l = \Delta s T_{ср} = 0{,}1481\cdot 288 = 42{,}65\ \textit{кдж/кг}.$$

7-17. 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 записывается:

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

или

$$s_{p,t} = g_1 (s_1)_{p,t} + g_2 (s_2)_{p,t} + g_1 R_1 \ln\frac{1}{r_1} + g_2 R_2 \ln\frac{1}{r_2}. \qquad (2)$$

Здесь $(s_1)_{p,t}$ и $(s_2)_{p,t}$ — энтропии 1 *кг* первого и второго компонентов при параметрах смеси: p и t, — соответственно весовые и мольные (объемные) доли.

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

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

Проследим это доказательство.

Энтропия g_1, *кг*/*кг*, первого газа при параметрах $p_1^{\text{парц}}$, t запишется:

$$g_1 (s_1)_{p_1^{\text{парц}},\, t} = g_1 (s_1)_{p,t} - g_1 R_1 \ln \frac{p_1^{\text{парц}}}{p} =$$

$$= g_1 (s_1)_{p,t} + g_1 R_1 \ln \frac{p}{p_1^{\text{парц}}}. \tag{4}$$

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

$$p_1^{\text{парц}} = r_1 p. \tag{5}$$

Используя это соотношение, формулу (4) записываем так:

$$g_1 (s_1)_{p_1^{\text{парц}},\, t} = g_1 (s_1)_{p,t} + g_1 R_1 \ln \frac{1}{r_1} \tag{6}$$

и аналогично для второго газа

$$g_2 (s_2)_{p_2^{\text{парц}},\, t} = g_2 (s_2)_{p,t} + g_2 R_2 \ln \frac{1}{r_2}. \tag{7}$$

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 и для случая смешения газов.

7-18. 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. Подсчитать также изменение энтропии системы, предполагая дополнительно, что шар находится под водой и падает с высоты 15 *м*.

Теплоемкость стали принять равной 0,5129 *кдж/кг·град*. Теплоемкость воды равна 1 *ккал/кг·град*.

Ответ: $\Delta S=3{,}132$ *кдж/°К*. За счет падения шара с высоты 15 *м* энтропия увеличивается незначительно. В этом случае $\Delta S=3{,}136$ *кдж/°К*.

7-19. 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. $\Delta l=T_{ср}\Delta S=mgh$.

Отсюда

$$\Delta S=\frac{mgh}{T_{ср}}=\frac{1{,}2\cdot 9{,}81\cdot 14}{293}=0{,}562\ дж/°К.$$

7-20. Определить максимальную работоспособность l', которую имеют 100 *ккал* тепла при температуре пламени в котельном агрегате, т. е. примерно при $t=1\,500°$ С. Определить, чему будет равна максимальная работоспособность l'' этого же количества тепла, когда оно будет передано водяному пару при температуре $t=600°$ С. Температура среды равна 20° С.

Ответ: $l'=83{,}5$ *ккал*; $l''=66{,}4$ *ккал*.

7-21. В регенеративном теплообменнике газотурбинной установки воздух нагревается за счет выхлопных газов, выходящих из турбины. Воздух нагревается от температуры $t_1=140°$ С до температуры $t_2=270°$ С; соответственно этому выхлопные газы охлаждаются от $t_3=340°$ С до $t_4=210°$ С.

Определить потерю работоспособности ГТУ в результате такого теплообмена в расчете на 1 *кг* проходящего газа. Газ считать идеальным, обладающим свойством воздуха, а теплоемкость принять по молекулярно-кинетической теории. Температура окружающей среды 20° С. Считать, что теплообменник не имеет тепловых потерь.

Решение

Потеря работоспособности рассчитывается по формуле Гюи-Стодола $\Delta l=T_{ср}\Delta s$, где $T_{ср}$ — абсолютная температура среды, а Δs — изменение энтропии системы при рассматриваемом необратимом процессе.

Изменение энтропии системы будет складываться из уменьшения энтропии охлаждающегося в теплообменнике газа Δs_1 и увеличения энтропии нагревающегося воздуха Δs_2, т. е.

$$\Delta s=\Delta s_1+\Delta s_2.$$

Уменьшение энтропии газа (в расчете на 1 *кг* проходящего газа) равно:

$$\Delta s_1=c_p\ln\frac{T_2}{T_1}=\frac{1{,}986\cdot 7}{2\cdot 28{,}96}\cdot 2{,}303\lg\frac{483}{613}=-0{,}05721\ ккал/кг\cdot °К.$$

Увеличение энтропии воздуха равно:

$$\Delta s_2 = c_p \ln \frac{T_2}{T_1} = \frac{1,986 \cdot 7}{2 \cdot 28,96} \cdot 2,303 \lg \frac{543}{413} = 0,06567 \ ккал/кг \cdot °К.$$

Изменение энтропии системы равно:

$$\Delta s = \Delta s_1 + \Delta s_2 = -0,05721 + 0,06567 = +0,00846 \ ккал/кг \cdot °К,$$

т. е. энтропия системы увеличилась.

Потеря работоспособности подсчитывается:

$$\Delta l = 0,00846 \cdot 293 = 2,479 \ ккал/кг = 10,379 \ кдж/кг.$$

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

Увеличение энтропии системы хорошо видно на рис. 7-2. Так как тепло, отданное газом, равно теплу, воспринятому воздухом, то имеет место следующее равенство площадей:

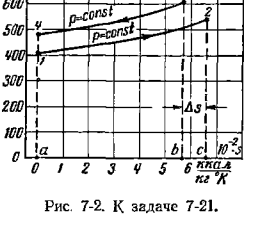


Рис. 7-2. К задаче 7-21.

пл. *34ab3* = пл. *12ca1*.

7-22. Определить потерю работоспособности вследствие теплообмена в регенеративном теплообменнике газотурбинной установки. Воздух в теплообменнике нагревается от температуры $t_1 = 160°$ С, а газы охлаждаются от температуры $t_2 = 400°$ С до $t_3 = 240°$ С. Тепловые потери теплообменника равны 10% от тепла, отдаваемого 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 работоспособности рассчитать на 1 *кг* проходящего газа (и воздуха).

Решение

Сначала необходимо рассчитать температуру t_4, до которой будет нагреваться воздух. Из уравнения теплового баланса

$$0,9 c_p (t_2 - t_3) = c_p (t_4 - t_1)$$

получаем:

$$t_4 = 0,9 (t_2 - t_3) + t_1 = 0,9 (400 - 240) + 160 = 304° \text{ С}.$$

Тепловые потери в расчете на 1 *кг* проходящего газа равны:

$$q = 0,1 c_p (t_2 - t_3) = 0,1 \cdot \frac{1,986 \cdot 7}{2 \cdot 28,96} (400 - 240) = 3,8403 \ ккал/кг.$$

В формуле Гюи-Стодола $\Delta l = T_{ср}\Delta s$; изменение энтропии системы Δs будет складываться из изменения энтропии газа Δs_1, воздуха Δs_2 и увеличения энтропии среды Δs_3 за счет передачи части тепла среде в результате теплопотерь.

Уменьшение энтропии газа Δs_1 равно:

$$\Delta s_1 = c_p \ln \frac{T_2}{T_1} = \frac{1,986 \cdot 7}{2 \cdot 28,96} \cdot 2,303 \lg \frac{513}{673} = -0,06515 \text{ ккал/кг} \cdot °\text{K}.$$

Увеличение энтропии воздуха Δs_2 равно:

$$\Delta s_2 = c_p \ln \frac{T_2}{T_1} = \frac{1,986 \cdot 7}{2 \cdot 28,96} \cdot 2,303 \lg \frac{577}{433} = +0,06889 \text{ ккал/кг} \cdot °\text{K}.$$

Увеличение энтропии среды равно:

$$\Delta s_3 = \frac{q}{T_{ср}} = \frac{3,8403}{288} = +0,01333 \text{ ккал/кг} \cdot °\text{K}.$$

Увеличение энтропии системы равно:

$$\Delta s = \Delta s_1 + \Delta s_2 + \Delta s_3 = -0,06515 + 0,06889 + 0,01333 = +0,01707 \text{ ккал/кг} \cdot °\text{K}.$$

Потеря работоспособности

$$\Delta l = T_{ср}\Delta s = 288 \cdot 0,01707 = 4,916 \text{ ккал/кг} = 20,582 \text{ кдж/кг}.$$

7-23. Определить потерю работоспособности, происходящую в тепловыделяющем элементе атомного реактора, где выделяющееся в процессе ядерной реакции тепло поглощается водой, протекающей при давлении 100 $кГ/см^2$. Вода нагревается от $t_1 = 190°$ С до $t_2 = 280°$ С; температура тепловыделяющего элемента постоянна по высоте его и равна $t_э = 380°$ С. Расчет потери вести на 100 *ккал* переданного тепла. Температура окружающей среды $t_{ср} = 20°$ С. Считать, что тепловые потери отсутствуют.

Решение

Потеря работоспособности равна $T_{ср}\Delta S$, где ΔS — изменение энтропии системы. При этом $\Delta S = \Delta S_1 + \Delta S_2$. Здесь ΔS_1 — изменение энтропии тепловыделяющего элемента, а S_2 — изменение энтропии воды в процессе ее нагревания.

$$\Delta S_1 = -\frac{Q}{T_э} = -\frac{100}{653} = -0,1531 \text{ ккал/°K},$$

$$\Delta S_2 = mc_p \ln \frac{T_2}{T_1} = 1 \cdot 2,303 \lg \frac{553}{463} \cdot 1,111 = 0,1970 \text{ ккал/°K},$$

где m — масса воды, поглотившая 100 *ккал* тепла. Она равна:

$$m = \frac{Q}{t_2 - t_1} = \frac{100}{280 - 190} = 1,111 \text{ кг}.$$

Увеличение энтропии системы:

$$\Delta S = 0{,}1970 - 0{,}1531 = 0{,}0439 \text{ ккал/°К}.$$

Потеря работоспособности равна:

$$\Delta L = T_{ср}\Delta S = 293 \cdot 0{,}0439 = 12{,}86 \text{ ккал}.$$

Процесс передачи тепла можно изобразить в TS-диаграмме (рис. 7-3), совместив начала отсчета энтропии. Так как тепловых потерь нет, а площадь под линией процесса в TS-диаграмме изображает тепло, то имеет место следующее равенство площадей: пл *34ob3* = пл *12ca1*.

7-24. В противоточном теплообменнике воздух охлаждается от температуры $t_1 = 240°$ С до $t_2 = 60°$ С. Охлаждение производится за счет воды, которая нагревается от температуры $t_3 = 15°$ С до $t_4 = 32°$ С.

Определить изменение энтропии системы вода — воздух в течение 1 *ч*. Расход охлаждающей воды равен $m_{вод} = 250$ *кг/ч*. Теплоемкость воздуха принять постоянной, равной 0,21 *ккал/кг · град*; c_p воды равна 1 *ккал/кг · град*. Считать, что теплообменник не имеет тепловых потерь.

Ответ: $\Delta S = 4{,}16$ *ккал/°К · ч* $= 17{,}42$ *кдж/°К · ч*.

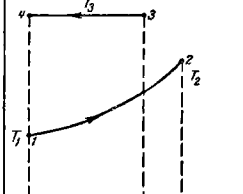


Рис. 7-3. К задаче 7-23.

7-25. Определить потерю работоспособности, происходящую в процессе конденсации водяного пара в конденсаторе паровой турбины. Процесс конденсации пара происходит при давлении $p = 0{,}04$ *кГ/см²*. Температура окружающей среды равна $t_{ср} = -5{,}0°$ С. Расчет произвести на 1 *кг* конденсирующегося пара. Считать, что в конденсатор поступает сухой насыщенный пар.

Решение

Изменение энтропии системы в рассматриваемом процессе равно:

$$\Delta s = \Delta s_{пара} + \Delta s_{ср};$$

$$\Delta s_{пара} = -\frac{581{,}1}{28{,}6 + 273{,}2} = -1{,}925 \text{ ккал/кг·°К},$$

где теплота парообразования при давлении $p = 0{,}04$ *кГ/см²* равна $r = 581{,}1$ *ккал/кг*, а температура конденсации, соответствующая $p = 0{,}04$ *кГ/см²*, равна $t = 28{,}6°$ С. Так как отведенное тепло передается окружающей среде, то увеличение энтропии среды рассчитывается:

$$\Delta s_{ср} = +\frac{581{,}1}{268{,}2} = +2{,}167 \text{ ккал/кг·°К}.$$

Изменение энтропии системы

$$\Delta s = 2{,}167 - 1{,}925 = 0{,}242 \ \ккал/кг \cdot °К.$$

Потеря работоспособности равна:

$$\Delta l = 268{,}2 \cdot 0{,}242 = 64{,}8 \ \ккал/кг = 271{,}6 \ \кдж/кг.$$

7-26. Кислород O_2, имея начальные параметры $p_1 = 40 \cdot 10^5$ $н/м^2$ и $t_1 = 620°$ С, изменяет свое состояние в изоэнтропическом процессе так, что его давление $p_2 = 12 \cdot 10^6$ $н/м^2$.

Найти конечную температуру t_2, считая теплоемкости зависящими от температуры и не зависящими от давления. Для расчета пользоваться табл. 9 приложений, применив метод «конечной энтропии».

Решение

Изменение энтропии 1 *кмоль* любого идеального газа в произвольном процессе можно записать:

$$\mu s_2 - \mu s_1 = \int_{T_1}^{T_2} \mu c_p \frac{dT}{T} - \mu R \ln \frac{p_2}{p_1}.$$

В этом выражении интеграл представляет собой изменение энтропии 1 *кмоль газа* в процессе $p = const$ и, следовательно, может быть получен непосредственно из таблиц, так как в них приведены энтропии газов, изменяющиеся в процессе $p = 1$ $кГ/см^2 = const$, а изменение энтропии идеального газа в любом изобарическом процессе одно и то же, если начальные и конечные температуры одинаковы.

Следовательно,

$$\int_{T_1}^{T_2} \mu c_p \frac{dT}{T} = \mu s_2^{табл} - \mu s_1^{табл},$$

а расчетная формула, справедливая для любого процесса, перепишется

$$\mu s_2 - \mu s_1 = \mu s_2^{табл} - \mu s_1^{табл} - \mu R \ln \frac{p_2}{p_1}.$$

По условиям задачи — процесс изоэнтропический, поэтому

$$\mu s_2^{табл} - \mu s_1^{табл} - \mu R \ln \frac{p_2}{p_1} = 0.$$

Отсюда

$$\mu s_2^{табл} = \mu s_1^{табл} + \mu R \ln \frac{p_2}{p_1}.$$

Зная $\mu s_2^{табл}$, прямо из таблиц находится искомая конечная температура t_2.

Проделаем этот расчет:

$$\mu s_2^{\text{табл}} = 8{,}819 + 1{,}986 \cdot 2{,}303 \lg \frac{12}{40} = 6{,}427 \ \textit{ккал/кмоль} \cdot °\text{K};$$

$$t_2 = f(6{,}427) = 389{,}3° \text{ C}.$$

Условия этой задачи те же, что и условия задачи 6-24. Там, в чисто учебных целях, был проделан громоздкий расчет методом «среднего k». Как мы видим, задача решается очень просто и совершенно строго методом «конечной энтропии». Поэтому его и следует применять в практических расчетах.

7-27. 1 *кмоль* CO_2 при начальных параметрах $p_1 = 10^5$ *н/м*^{2} и $t_1 = 37°$ C сжимается изоэнтропически до тех пор, пока его давление не становится равным $p_2 = 30 \cdot 10^5$ *н/м*^{2}.

Определить конечную температуру процесса.

Ответ: $t_2 = 333°$ C.

7-28. Воздух в состоянии при $p_1 = 6 \cdot 10^6$ *н/м*^{2} и $t_1 = 700°$ C расширяется изоэнтропически до тех пор, пока его удельный объем не становится равным $v_2 = 4{,}657$ *м*^{3}*/кг*.

Определить температуру t_2 воздуха в конечном состоянии. Пользоваться табл. 11 приложений, применив метод «конечной энтропии».

Решение

Изменение энтропии идеального газа в любом процессе:

$$\mu s_2 - \mu s_1 = \int_{T_1}^{T_2} \mu c_v \frac{dT}{T} + \mu R \ln \frac{v_2}{v_1}.$$

Заменив по уравнению Майера $\mu c_v = \mu c_p - \mu R$, получим:

$$\mu s_2 - \mu s_1 = \int_{T_1}^{T_2} \mu c_p \frac{dT}{T} - \int_{T_1}^{T_2} \mu R \frac{dT}{T} + \mu R \ln \frac{v_2}{v_1}$$

или

$$\mu s_2 - \mu s_1 = \mu s_2^{\text{табл}} - \mu s_1^{\text{табл}} - \mu R \ln \frac{T_2}{T_1} + \mu R \ln \frac{v_2}{v_1}.$$

Находим конечную табличную энтропию, учитывая, что $\Delta(\mu s) = 0$:

$$\mu s_2^{\text{табл}} = \mu s_1^{\text{табл}} + \mu R \ln \frac{T_2}{T_1} - \mu R \ln \frac{v_2}{v_1}.$$

По величине $\mu s_2^{\text{табл}}$ можно было бы из таблиц найти искомую t_2. Однако дело осложняется тем, что в правую часть расчетной формулы также входит искомая T_2. Поэтому, решать это трансцендентное уравнение следует, применяя метод последовательных приближений.

Проделаем численный расчет.

Перепишем нашу расчетную формулу

$$\lg \frac{v_2}{v_1} = \lg T_2 - \frac{\mu s_2^{\text{табл}}}{2{,}303 \mu R} + \frac{\mu s_1^{\text{табл}}}{2{,}303 \mu R} - \lg T_1$$

Удельный объем в начале процесса

$$v_1 = \frac{RT_1}{p_1} = \frac{8\,314 \cdot 973{,}15}{28{,}96 \cdot 6 \cdot 10^5} = 0{,}4657 \ м^3/кг.$$

Следовательно,

$$\lg \frac{v_2}{v_1} = \lg \frac{4{,}657}{0{,}4657} = 1.$$

Зададимся теперь двумя произвольными значениями t_2 (во избежание слишком большой ошибки можно предварительно подсчитать $T_2 = T_1 (v_1/v_2)^{k-1}$, приняв $k = 1{,}4$):

$$1)\ t_2 = 100^\circ\ C \quad и \quad 2)\ t_2 = 200^\circ\ C$$

и подсчитаем для них соответственные величины $\lg (v_2/v_1)$, взяв $\mu s_2^{табл}$ и $\mu s_1^{табл}$ из таблиц по температурам t_2 и t_1.

$$1)\ \lg \frac{v_2}{v_1} = \lg 373{,}15 - \frac{2{,}164}{2{,}303 \cdot 1{,}986} + \frac{9{,}189}{2{,}303 \cdot 1{,}986} -$$

$$- \lg 310{,}15 = 2{,}5719 - 0{,}4661 + 1{,}9792 - 2{,}9882 = 1{,}0968.$$

$$2)\ \lg \frac{v_2}{v_1} = \lg 473{,}15 - \frac{3{,}834}{2{,}303 \cdot 1{,}986} + 1{,}9792 - 2{,}9882 = 0{,}8402.$$

Истинное, нужное нам значение $\lg (v_2/v_1)$ должно быть равным единице. Имеем, следовательно, такие соотношения:

t_2, °C	$\lg (v_2/v_1)$
100	1,0968
$t_{2,искомое}$	1,0000
200	0,8402

Искомую действительную $t_{2,искомое}$ можно найти при помощи линейной интерполяции:

$$t_{2,искомое} = \frac{1{,}0968 - 1{,}0000}{1{,}0968 - 0{,}8402} \cdot 100 + 100 = 138^\circ\ C.$$

7-29. Водород H_2, имея начальные параметры $p_1 = 0{,}97 \cdot 10^5$ $н/м^2$ и $t_1 = 27{,}0^\circ$ С, изоэнтропически сжимается до тех пор, пока его удельный объем не становится равным $v_2 = 1{,}800$ $м^3/кг$.

Определить конечную температуру t_2 при помощи табл 12 приложений, используя метод «конечной энтропии».

Ответ: $t_2 = 389^\circ$ С.

8. РЕАЛЬНЫЕ ГАЗЫ

8-1. Вычислить значения констант в уравнении Ван-дер-Ваальса с помощью параметров критического состояния двуокиси углерода CO_2, которые равны:

$$p_{кр} = 73{,}8 \cdot 10^5 \ н/м^2; \quad t_{кр} = 31{,}04°C; \quad v_{кр} = 0{,}00214 \ м^3/кг.$$

Указание. В уравнении Ван-дер-Ваальса необходимо вычислить две константы: a и b. Постоянная $R = \frac{8\,314}{\mu}$ *дж/кг·град* не может быть взята произвольно. Любой другой выбор приведет к тому, что уравнение Ван-дер-Ваальса не перейдет в уравнение состояния идеального газа $pv = RT$ при $p \to 0$.

Постоянные a и b вычисляются путем совместного решения следующих трех уравнений, которые связывают a и b с критическими параметрами:

$$p_{кр} = \frac{a}{27b^2}; \quad v_{кр} = 3b; \quad T_{кр} = \frac{8a}{27bR}.$$

Так как в этих уравнениях содержатся только два неизвестных, решение получается неопределенным, в зависимости от того, какая пара критических параметров используется для расчета, получаются различные значения констант a и b.

Ответ:

Критические параметры, выбранные для расчета	a, $н \cdot м^4/кг^2$	b, $м^3/кг$
$v_{кр}$ и $p_{кр}$	101,4	0,000713
$v_{кр}$ и $T_{кр}$	140,4	0,000713
$p_{кр}$ и $T_{кр}$	190,9	0,000984

8-2. В баллоне объемом $V = 40 \ дм^3$ находится двуокись углерода при давлении $p = 39{,}23 \cdot 10^5 \ н/м^2$.

Определить массу газа в баллоне, если температура газа равна $t = 20°$ С. Расчет произвести при помощи уравнений а) Клапейрона и б) Ван-дер-Ваальса. В случае «б» использовать величины констант a и b, подсчитанные в задаче 8-1 по $p_{кр}$ и $T_{кр}$.*

Определить соответствующие погрешности по сравнению с массой, вычисленной по табличному значению удельного объема, равному $v_{табл} = 0{,}01063 \ м^3/кг$.

Решение

а) Из уравнения Клапейрона определяем удельный объем

$$v = \frac{RT}{p} = \frac{8\,314 \cdot 293{,}15}{44{,}01 \cdot 39{,}23 \cdot 10^5} = 0{,}01411 \ м^3/кг.$$

---

* 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 $t_{кр}$.

Искомая масса газа

$$m = \frac{40 \cdot 10^{-3}}{0{,}01411} = 2{,}836 \text{ кг}.$$

б) По уравнению Ван-дер-Ваальса удельный объем находится методом последовательного приближения. Приняв в первом приближении величину удельного объема v равной величине, подсчитанной по уравнению Клапейрона, определяем значение давления $p = RT/(v-b) - a/v^2$, приняв согласно условию, что $a = 190{,}9$ $н \cdot м^4/кг^2$, $b = 0{,}000984$ $м^3/кг$;

$$p = \frac{8\,314 \cdot 293{,}15}{44{,}01\,(0{,}01411 - 0{,}00098)} - \frac{190{,}9}{0{,}01411^2} = 32{,}63 \cdot 10^5 \text{ н/м}^2.$$

Мы получили значение p, меньшее, чем заданное в условиях задачи. Поэтому принимаем другое, меньшее значение $v = 0{,}01200$ $м^3/кг$, и снова подсчитываем величину p, которая оказывается равной $p = 37{,}00 \cdot 10^5$ $н/м^2$. Задаемся в третий раз величиной $v = 0{,}01100$ $м^3/кг$, тогда $p = 39{,}49 \cdot 10^5$ $н/м^2$.

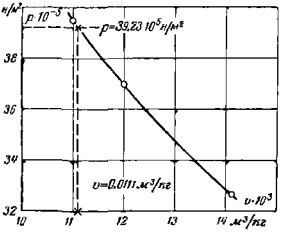


Рис 8-1. К задаче 8-2.

Мы вычислили три точки изотермы $t = 20^\circ$ С по Ван-дер-Ваальсу. Строим этот отрезок изотермы в координатах p-v и по графику (рис. 8-1) находим нужное нам значение удельного объема $v = 0{,}0111$ $м^3/кг$. Проверка уравнения показывает, что эта величина правильная.

Определяем искомую массу вещества по Ван-дер-Ваальсу и по $v_{табл}$:

$$m_{В\text{-}В} = \frac{40 \cdot 10^{-3}}{0{,}01110} = 3{,}604 \text{ кг};$$

$$m_{табл} = \frac{40 \cdot 10^{-3}}{0{,}01063} = 3{,}763 \text{ кг}.$$

Погрешности, допущенные при вычислениях:

$$\delta_{ид} = \frac{2{,}836 - 3{,}763}{3{,}763} \cdot 100 = -24{,}6\%;$$

$$\delta_{в\text{-}в} = \frac{3{,}604 - 3{,}763}{3{,}763} \cdot 100 = -4{,}2\%.$$

8-3. Вычислить коэффициенты a и b уравнения Ван-дер-Ваальса, исходя из критических параметров для кислорода: $p_{кр}=49{,}7$ *кГ/см*^{2}; $t_{кр}=-118{,}82°$ С

Ответ: $a=14{,}1$ *м*^{4}*/кГ*; $b=0{,}001029$ *м*^{3}*/кГ*.

8-4. Вычислить значения констант уравнения Ван дер-Ваальса с помощью критических параметров для воды, равных: $p_{кр}=225{,}65 \cdot 10^1$ *кГ/м*^{2}; $v_{кр}=0{,}00326$ *м*^{3}*/кг*; $t_{кр}=374{,}15°$ С

Использовать все три возможных сочетания критических параметров

Ответ:

Критические параметры, выбранные для определения констант	a, *м*^{4}*/кГ*	b, *м*^{3}*/кГ*
$v_{кр}$ и $p_{кр}$	71,99	0,001087
$v_{кр}$ и $T_{кр}$	111,7	0,001087
$p_{кр}$ и $T_{кр}$	173,4	0,001087

8-5. Определить с помощью уравнения Ван-дер-Ваальса давление водяного пара, если при этом его температура $t=400°$ С, и удельный объем $v=0{,}00306$ *м*^{3}*/кг*.

Расчет провести для трех вариантов соответственно трем вариантам возможных пар коистант для уравнения Ван-дер-Ваальса (см. ответ задачи 8-4).

Сравнить с действительным значением давления, которое равно при этих параметрах 300 *кГ/см*^{2}.

Ответ: $p_1=836{,}9$, $p_2=414$; $p_3=457$ *кГ/см*^{2}.

8-6. Ниже даны табличные [Л 4] значения удельных объемов водяного пара при следующих температурах и давлениях:

p, *кГ/см*^{2}	50	100	300	600	800
t, °С	500	350	400	400	600
v, *м*^{3}*/кг*	0,06999	0,02307	0,00306	0,00165	0,00345

Рассчитать значения удельных объемов при этих же параметрах, пользуясь теорией подобия (с помощью zn-диаграммы, рис 8-2), и вычислить ошибку по сравнению с действительными значениями.

Критические параметры для воды даны в задаче 8-4.

Ответ: Ошибка составляет $\delta_1=2{,}91$; $\delta_2=0{,}5$; $\delta_3=17{,}0$, $\delta_4=19{,}9$; $\delta_5=2{,}7\%$.

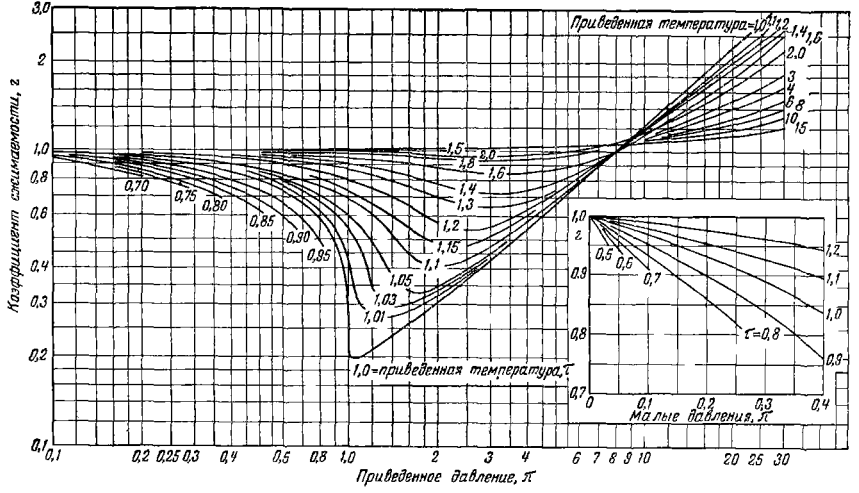


Рис. 8-2. К задачам 8-6, 8-7, 8-8.

8-7. Удельные объемы паров этилового спирта в зависимости от температуры и давления даны в таблице.

p, $кГ/см^2$	50	100	300	350
t, °С	250	300	350	350
v, $м^3/кг$	0,01437	0,00648	0,00245	0,002287

Пользуясь диаграммой zn, рассчитать значения удельных объемов паров этилового спирта; вычислить ошибку по сравнению с действительными значениями. Критическая температура этилового спирта равна $t_{кр}=250{,}8°$ С; критическое давление $p_{кр}=72{,}5$ $кГ/см^2$.

Ответ: $\delta_1=7{,}4$; $\delta_2=23{,}5$; $\delta_3=4{,}9$, $\delta_4=0{,}1\%$

8-8. Пользуясь теорией подобия (с помощью zn-диаграммы), подсчитать значения удельных объемов двуокиси углерода CO_2 при соответствующих параметрах и сравнить их с действительными значениями, приведенными в таблице

p, $кГ/см^2$	100	180	200
t, °С	80	100	180
v, $м^3/кг$	0,00363	0,00241	0,00363

Найти относительную ошибку в процентах.

Ответ: $\delta_1=3{,}25$, $\delta_2=7{,}0$, $\delta_3=4{,}96\%$.

8-9. С помощью дифференциального уравнения термодинамики $(du/dv)_T=-p+T\,(\partial p/\partial T)_v$ доказать, что внутренняя энергия идеального газа не зависит от объема.

8-10. Показать с помощью дифференциального уравнения термодинамики $(\partial c_v/\partial v)_T=T\,(\partial^2 p/\partial T^2)_v$, что теплоемкость c_v идеального газа не зависит от объема.

8-11. Показать, что теплоемкость c_v для реального газа, подчиняющегося уравнению Ван-дер-Ваальса, *не зависит от объема.*

8-12. С помощью уравнения Ван-дер Ваальса определить производную $(du/dv)_T$ и выяснить ее физический смысл.

Ответ: $(du/dv)_T=a/v^2$, т. е. равна величине внутреннего молекулярного давления вандерваальсовского газа

8-13. Теплоемкость c_p воды при $t=20°$ С и $p=1$ $кГ/см^2$ равна 4,1822 $кдж/кг\cdot град$.

Составить формулу зависимости теплоемкости воды от давления в интервале от 1 до 150 $кГ/см^2$, основываясь на табличных данных по удельным объемам, приведенных ниже:

Температура, °С	Давление p, $кГ/см^2$				
	1	25	50	100	150
10	0,0010003	0,0009992	0,0009981	0,0009958	0,0009936
20	0,0010018	0,0010007	0,0009997	0,0009975	0,0009954
30	0,0010044	0,0010033	0,0010022	0,0010001	0,0009981

Решение

Известно соотношение

$$\left(\frac{\partial c_p}{\partial p}\right)_T = -T\left(\frac{\partial^2 v}{\partial T^2}\right)_p,$$

из которого после интегрирования в пределах от $p_1 = 1$ кГ/см^2 до p получаем выражение для c_p при $T = \text{const}$:

$$c_p = c_{p=1} - T\int_{p=1}^{p}\left(\frac{\partial^2 v}{\partial T^2}\right)_p dp.$$

Из теории приближенных вычислений известно, что

$$\frac{\partial^2 v}{\partial T^2} \approx \frac{\Delta^2 v}{\Delta T^2} = \frac{\Delta^2 v}{\Delta t^2},$$

т. е. что вторую производную можно приближенно заменить отношением вторых табличных разностей, таблицу которых мы, следовательно, и должны составить:

t, °C	$p=1$ кГ/см^2			$p=25$ кГ/см^2		
	$10^7\,v$	$10^7\,(\Delta v/\Delta t)$	$10^7\,(\Delta^2 v/\Delta t^2)$	$10^7\,v$	$10^7\,(\Delta v/\Delta t)$	$10^7\,(\Delta^2 v/\Delta t^2)$
10	10 003	15/10	11/100	9 992	15/10	11/100
20	10 018	26/10		10 007	26/10	
30	10 044			10 033		

t, °C	$p=50$ кГ/см^2			$p=100$ кГ/см^2		
	$10^7\,v$	$10^7\,(\Delta v/\Delta t)$	$10^7\,(\Delta^2 v/\Delta t^2)$	$10^7\,v$	$10^7\,(\Delta v/\Delta t)$	$10^7\,(\Delta^2 v/\Delta t^2)$
10	9 931	16/10	9/100	9 958	17/10	9/100
20	9 997	25/10		9 975	26/10	
30	10 022			10 001		

t, °C	$p=150$ кГ/см^2		
	$10^7\,v$	$10^7\,(\Delta v/\Delta t)$	$10^7\,(\Delta^2 v/\Delta t^2)$
10	9 936	18/10	9/100
20	9 954	27/10	
30	9 981		

Из этой таблицы видно, что производная $(\partial^2 v/\partial T^2)_p$ является малой величиной и может быть принята постоянной и не зависящей от давления. Можно принять ее равной:

$$(\partial^2 v/\partial T^2)_p \approx 10^{-8}\ м^3/кг \cdot град^2.$$

Подставляем это значение в формулу для c_p, в которой величины p будем брать в $кГ/см^2$, и производим интегрирование:

$$c_p = c_{p=1} - 293{,}15 \cdot 0{,}00980665 \cdot 10^{-8} \cdot 10^4 (p-1).$$

Здесь

$c_{p=1} = 4{,}1822$ *кдж/кг · град*;

$293{,}15 = T$, °К;

0,00980665 *кдж/кГ · м* — переводный коэффициент.

После преобразований получаем окончательно:
$c_p = 4{,}1825 - 2{,}8748 \cdot 10^{-4} p$, *кдж/кг · град*.

Подсчитаем по этой формуле c_p при $p = 150$ $кГ/см^2$:
$c_p = 4{,}1825 - 2{,}8748 \cdot 10^{-4} \cdot 150 = 4{,}1394$ *кдж/кг · град*.

По экспериментальным данным («Теплоэнергетика», № 10, 1959): $c_p = 4{,}1407$ *кдж/кг · град*. Таким образом, полученная формула оказывается для данного интервала температур и давлений весьма точной ($\delta \approx 0{,}03\%$).

8-14. Для водяного пара известны следующие значения удельного объема и энтальпии:

t, °С	$p = 191{,}29 \cdot 10^5$ $н/м^2$		$p = 196{,}2 \cdot 10^5$ $н/м^2$	
	v, $м^3/кг$	i, *кдж/кг*	v, $м^3/кг$	i, *кдж кг*
500	0,01560	3246,6	0,01513	3 240
550	0,01741	3 400	0,01691	3 390

Определить приближенно величину производной $(\partial u/\partial v)_T$ для температур 500 и 550° С в заданном интервале давлений.

Указание: принять, что $(\partial u/\partial v)_T \approx (\Delta u/\Delta v)_T$.

Ответ: При $t = 500°$ С $(\partial u/\partial v)_T = 125 \cdot 10^5$ $н/м^2$;

при $t = 550°$ С $(\partial u/\partial v)_T = 180 \cdot 10^5$ $н/м^2$

8-15. Энтальпия водяного пара при давлении $p = 100$ $кГ/см^2$ и температуре $t = 500°$ С равна $i = 806{,}1$ *ккал/кг*.

Определить, пользуясь приведенной ниже таблицей удельных объемов v, $м^3/кг$, будет ли энтальпия при $t = 500°$ С = const увеличиваться или уменьшаться с повышением давления.

t, °С	Давление p, $кГ/см^2$		
	100	105	110
490	0,03292	0,03120	0,02963
500	0,03352	0,03177	0,03018
510	0,03411	0,03234	0,03073

Решение

Известно, что $(\partial i/\partial p)_T = [v - T(\partial v/\partial T)_p]$

Заменим $(\partial v/\partial T)_p$ отношением первых разностей:

$$\left(\frac{\partial v}{\partial T}\right)_p \approx (\Delta v/\Delta t)_p,$$

для чего составим таблицу первых разностей удельных объемов по температуре при постоянном давлении:

t, °C	Давление p, кГ/см²					
	100		105		110	
	$10^3 v$	$10^3 (\Delta v/\Delta t)_p$	$10^3 v$	$10^3 (\Delta v/\Delta t)_p$	$10^3 v$	$10^3 (\Delta v/\Delta t)_p$
490	3 292	60/10	3 120	57/10	2 963	55/10
500	3 352	59/10	3 177	57/10	3 018	55/10
510	3 411		3 234		3 073	

В интервале давлений 100—105 кГ/см²:

$$(\partial i/\partial p)_T = 0{,}03352 - 773{,}15 \cdot 60 \cdot 10^{-6} = -0{,}01286.$$

В интервале 105—110 кГ/см²:

$$(\partial i/\partial p)_T = 0{,}03177 - 773{,}15 \cdot 57 \cdot 10^{-6} = -0{,}01229.$$

Мы видим, что в интервале давлений, заданном нашей таблицей, энтальпия уменьшается, так как производная $(\partial i/\partial p)_T$ отрицательна.

8-16. Вывести формулу для теплоемкости c_v газа, подчиняющегося уравнению состояния Бертло.

Решение

Известно дифференциальное уравнение

$$\left(\frac{\partial c_v}{\partial v}\right)_T = T\left(\frac{\partial^2 p}{\partial T^2}\right)_v,$$

из которого можно определить величину c_v для некоторой постоянной температуры:

$$c_v = c_{v,\infty} + T\int_{v=\infty}^{v}\left(\frac{\partial^2 p}{\partial T^2}\right)_v dv.$$

Здесь нижний предел ($v=\infty$) соответствует идеальному состоянию газа.

Производную $(\partial^2 p/\partial T^2)_v$ согласно условиям задачи необходимо взять при помощи уравнения состояния Бертло, которое имеет следующий вид:

$$\left(p + \frac{a}{Tv^2}\right)(v - b) = RT,$$

или

$$p = \frac{RT}{v-b} - \frac{a}{Tv^2}.$$

В этом уравнении величины a и b представляют собой ван-дерваальсовские константы.

Берем последовательно первую и вторую производные:

$$\left(\frac{\partial p}{\partial T}\right)_v = \frac{R}{v-b} + \frac{a}{T^2v^2};$$

$$\left(\frac{\partial^2 p}{\partial T^2}\right)_v = -\frac{2a}{T^3v^2}$$

и подставляем значение второй производной в выражение подынтегральной функции:

$$c_v = c_{v,\infty} - T\int_{v=\infty}^{v} \frac{2a}{T^3v^2}\,dv = c_{v,\infty} - \frac{2a}{T^2}\int_{v=\infty}^{v} v^{-2}dv =$$

$$= c_{v,\infty} + \frac{2a}{T^2}\left[v^{-1}\right]_{\infty}^{v} = c_{v,\infty} + \frac{2a}{T^2v}.$$

Таким образом, для любой температуры искомая формула должна быть записана так:

$$c_v = c_{v,\infty}(T) + \frac{2a}{T^2v},$$

где $c_{v,\infty}(T)$ есть теплоемкость газа в идеальном состоянии, зависящая от температуры.

8-17. Составить формулу для теплоемкости c_p и рассчитать значения энтальпий водяного пара при температуре $t=600^\circ$ С и давлениях $p=1$, 100 и 200 *кГ/см²*, пользуясь уравнением Бертло. Сравнить расчетные величины со следующими табличными [Л. 4] данными:

	Давление p, *кГ/см²*		
	1	100	200
i_{600}, *ккал/кг*	833,0	806,1	775,0

Указание. Уравнению состояния Бертло (задача 8-16) часто придают следующий вид, выражая константы Ван-дер-Ваальса через критические параметры:

$$pv = RT\left[1 + \frac{9pT_{кр}}{128p_{кр}T}\left(1 - 6\,\frac{T_{кр}^2}{T^2}\right)\right].$$

Для решения задачи необходимо воспользоваться выражением для частной производной

$$\left(\frac{\partial i}{\partial p}\right)_T = \left[v - T\left(\frac{\partial v}{\partial T}\right)_p\right],$$

в которое подставляется величина $(\partial v/\partial T)_p$, найденная из приведенного выше уравнения Бертло.

Значения $p_{кр}$ и $T_{кр}$ взять из условий задачи (8-4).

Ответ:

$$i = i_0(T) + \frac{9RpT_{кр}}{128p_{кр}}\left(1 - \frac{187^2_{кр}}{T^2}\right).$$

Результаты расчетов

Энтальпия при t=500° С, *кдж/кг*	Давление p, *кГ/см²*		
	1	100	200
$i_{расч}$	3 488	3 381	3 272
$i_{табл}$	3 488	3 375	3 245
Относительная погрешность $\delta = (i_{расч} - i_{табл})\,100/i_{табл}$, %	0	0,2	0,8

8-18. При обработке экспериментальных данных по термодинамическим свойствам 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;

$\pi = \dfrac{p}{p_{кр}}$ — приведенное давление;

$\tau = \dfrac{T}{T_{кр}}$ — приведенная температура;

$z_{кр} = \dfrac{p_{кр}v_{кр}}{RT_{кр}}$ — критический коэффициент сжимаемости.

В зависимости от величины $z_{кр}$ вещества можно разбить на следующие четыре группы:

I) $z_{кр} = 0{,}24 \div 0{,}26$;

II) $z_{кр} = 0{,}26 \div 0{,}28$;

III) $z_{кр} = 0{,}28 \div 0{,}30$;

IV) $z_{кр} \leqslant 0{,}23$.

Считают, что вещества, принадлежащие к одной из этих групп, термодинамически подобны, находятся в соответственных состояниях и подчиняются уравнению состояния

$$\varphi = f(\pi, \tau),$$

свойственному данной группе. В этой функциональной зависимости величина $\varphi = v/v_{кр}$ есть приведенный удельный объем, равный обратной величине приведенной плотности.

В табл. 23 приложений даны величины приведенных плотностей (в зависимости от π и τ) для всех четырех групп.

Рассчитать удельный объем $v'_{250^\circ C}$ жидкого четыреххлористого углерода CCl_4 при температуре насыщения $t_s = 250^\circ$ С, если известно, что при $p_s = 1$ *кГ/см*^{2} CCl_4 имеет температуру насыщения, равную 77° С, и удельный объем $v'_1 = 0{,}001276$ *м*^{3}*/кг*. Экспериментальное значение $(v'_{250^\circ C})_э = 0{,}00190$ *м*^{3}*/кг*. Критические параметры CCl_4 следующие: $p_{кр} = 46{,}50$ *кГ/см*^{2}; $t_{кр} = 283.2^\circ$ С и $v_{кр} = 0{,}00179$ *м*^{3}*/кг*.

Решение

Находим величину критического коэффициента сжимаемости:

$$z_{кр} = \frac{p_{кр} v_{кр}}{R T_{кр}} = \frac{46{,}50 \cdot 10^4 \cdot 0{,}00179 \cdot 154}{848 \cdot 556{,}4} = 0{,}272.$$

Как видно, CCl_4 относится ко второй группе веществ

Находим для $t_s = 250^\circ$ С:

$$\tau_{s,\ 250^\circ C} = \frac{T_s}{T_{кр}} = \frac{250 + 273}{283 + 273} = 0{,}940.$$

По табл. 23 приложений находим приведенную плотность $1/\varphi'_{250^\circ C} = 1{,}797$. Аналогично находим критическую плотность $1/\varphi'_1$ для $t_s = 77^\circ$ С:

$$\tau_{s,1} = \frac{77 + 273}{283 + 273} = 0{,}629; \quad \frac{1}{\varphi_1} = 2{,}688.$$

Так как удельные объемы прямо пропорциональны приведенным объемам, можно заключить, что искомый удельный объем

$$v'_{250^\circ C} = v'_1 \frac{\varphi'_{250^\circ C}}{\varphi'_1} = \frac{0{,}001276 \cdot 2{,}688}{1{,}797} = 0{,}0191 \ \text{м}^3/\text{кг}.$$

Таким образом, ошибка в расчете по сравнению с экспериментальной величиной составляет всего 0,5%.

8-19. Рассчитать, пользуясь таблицами приведенных плотностей (приложения, табл. 23), удельный объем паров этилового спирта C_2H_5OH при температуре 200° С и давлении 150 *кГ/см*^{2}, если известно, что при этом же давлении и температуре $t = 150^\circ$ С удельный объем $v = 0{,}01448$ *м*^{3}*/кг*. Значение v_{200} по экспериментальным данным равно $0{,}01622$ *м*^{3}*/кг*. Критические параметры этилового спирта следующие $p_{кр} = 72{,}5$ *кГ/см*^{2}; $t_{кр} = 250{,}8^\circ$ С; $v_{кр} = 0{,}00363$ *м*^{3}*/кг*.

Определить погрешность в расчете.

Ответ: $v_{200} = 0{,}01652$ *м*^{3}*/кг*; $\delta = 1{,}8\%$.

8-20. Рассчитать удельный объем жидкого аммиака на линии насыщения при $t=50^\circ$ С, пользуясь табл. 23 приложений.

Известно, что при $p=6{,}27$ *кГ/см*^{2} температура насыщения равна 10° С, а удельный объем $v'=0{,}0016$ *м*^{3}*/кг*. Сравнить расчетную величину с табличными данными, по которым $v'=0{,}00177$ *м*^{3}*/кг*.

Критические параметры: $T_{кр}=405{,}5$ °К; $v_{кр}=0{,}00426$ *м*^{3}*/кг*; $p_{кр}=111{,}5$ *кГ/см*^{2}.

Ответ: $v'_{50^\circ\,C}=0{,}00176$ *м*^{3}*/кг*; $\delta=0{,}6\%$.

8-21. Определить удельный объем водяного пара при $p=1$ *кГ/см*^{2} и $t=250^\circ$ С, пользуясь табл. 23 приложений, если известно, что при $p=1$ *кГ/см*^{2} и $t=150^\circ$ С удельный объем его $v_{1,150}=1{,}975$ *м*^{3}*/кг*.

Сравнить полученное значение с табличной величиной, равной 2,45 *м*^{3}*/кг*.

Ответ: $v=2{,}22$ *м*^{3}*/кг*; $\delta=9{,}4\%$.

8-22. Рассчитать по уравнению Клапейрона-Клаузиуса величину изменения удельного объема ртутного пара при испарении, если давление насыщения $p_s=0{,}10$ *кГ/см*^{2}; $r=71{,}41$ *ккал/кг*, а зависимость давления насыщения от температуры задана следующей таблицей:

p_s, *кГ/см*^{2}	0,08	0,10	0,12
t_s, °С	241,0	249,6	256,7

Ответ: $\Delta v=2{,}07$ *м*^{3}*/кг*.

8-23. При помощи уравнения Клапейрона-Клаузиуса определить теплоту парообразования r водяного пара при $t_s=210^\circ$ С и сравнить ее с табличной величиной $r_{табл}=1\,900$ *кдж/кг*. Производную dp_s/dT_s найти приближенно методом конечных разностей (см. задачи 8-13—8-15) на основании следующей табличной зависимости давления насыщения от температуры насыщения:

t_s, °С	208	209	210	211	212
$p_s\cdot 10^{-5}$, *н/м*^{2},	18,33	18,71	19,09	19,47	19,87

Ответ: $r=1\,900$ *кдж/кг*.

8-24. Уравнение состояния для 1 *кг* идеального ассоциирующего газа[1] имеет следующий вид:

$$pv = RT\left(1 - \frac{Cp}{T^{\frac{5+2m}{2}}}\right).$$

Здесь

R — газовая постоянная, отнесенная к 1 *кг*;

m — число „потерянных вращений", величина постоянная;

C — также постоянная величина.

Воспользовавшись этим уравнением, вывести выражение для разности теплоемкостей $c_p - c_v$.

[1] Идеальный ассоциирующий газ — это такой газ, у которого вандерваальсовское взаимодействие между молекулами приводит только к образованию комплексов молекул в результате их ассоциации. Поэтому в уравнении состояния такого газа отсутствуют поправки на a и b. Уравнение выведено *М. П.* Вукаловичем и *И. И.* Новиковым в предположении, что при ассоциации образуются только двойные комплексы.

Решение

Существует известное термодинамическое соотношение

$$c_p - c_v = -T\frac{(\partial v/\partial T)_p^2}{(\partial v/\partial p)_T} = T\left(\frac{\partial v}{\partial T}\right)_p^2\left(\frac{\partial p}{\partial v}\right)_T.$$

Воспользовавшись уравнением состояния, определим необходимые частные производные. Для нахождения $(\partial v/\partial T)_p$ дифференцируем уравнение состояния по T при $p = \text{const}$:

$$p\left(\frac{\partial v}{\partial T}\right)_p = R + \frac{3+2m}{2}\cdot\frac{CpR}{T^{\frac{5+2m}{2}}},$$

откуда

$$\left(\frac{\partial v}{\partial T}\right)_p = \frac{R\left(1+\dfrac{3+2m}{2}\cdot\dfrac{Cp}{T^{\frac{5+2m}{2}}}\right)}{p}.$$

Для определения $(\partial p/\partial v)_T$ дифференцируем уравнение по v при $T = \text{const}$:

$$v\left(\frac{\partial p}{\partial v}\right)_T + p = -\frac{CR}{T^{\frac{3+2m}{2}}}\left(\frac{\partial p}{\partial v}\right)_T.$$

Следовательно,

$$\left(\frac{\partial p}{\partial v}\right)_T = -\frac{p}{v + \dfrac{CR}{T^{(3+2m)/2}}}.$$

Подставляем значения производных в уравнение для разности теплоемкостей:

$$c_p - c_v = \frac{TR^2\left(1+\dfrac{3+2m}{2}\cdot\dfrac{Cp}{T^{(5+2m)/2}}\right)^2}{p^2}\cdot\frac{p}{v+\dfrac{CR}{T^{(3+2m)/2}}},$$

или

$$c_p - c_v = \frac{R^2T\left(1+\dfrac{3+2m}{2}\cdot\dfrac{Cp}{T^{(5+2m)/2}}\right)^2}{pv + R\dfrac{Cp}{T^{(3+2m)/2}}}.$$

Из исходного уравнения состояния следует, что

$$pv = RT - \frac{CpR}{T^{(3+2m)/2}},$$

значит,

$$c_p - c_v = \frac{R^2T\left(1 + \frac{3+2m}{2}\cdot\frac{Cp}{T^{(5+2m)/2}}\right)^2}{RT}$$

или окончательно

$$c_p - c_v = R\left(1 + \frac{3+2m}{2}\cdot\frac{Cp}{T^{(5+2m)/2}}\right)^2.$$

8-25. Воспользовавшись уравнением состояния, приведенным в предыдущей задаче, получить в общем виде выражение для теплоемкости c_v идеального ассоциирующего газа.

Указания. 1) Использовать дифференциальное уравнение $(\partial c_v/\partial v)_T = T(\partial^2 p/\partial T^2)_v$.

2) В уравнении

$$pv = RT\left(1 - \frac{Cp}{T^{(5+2m)/2}}\right)$$

член $Cp/T^{(5+2m)/2}$ мал; поэтому без особой погрешности давление p можно выразить из уравнения Клапейрона в виде $p = RT/v$. Тогда уравнение состояния примет вид:

$$pv = RT\left(1 - \frac{CR}{vT^{(3+2m)/2}}\right).$$

Это уравнение и следует использовать для нахождения производных.

Ответ: $c_v = c_{v,\infty}(T) + \frac{1+2m}{2}\cdot\frac{3+2m}{2}\cdot\frac{CpR}{T^{(5+2m)/2}}$.

8-26. Пользуясь уравнением состояния идеального ассоциирующего газа

$$pv = RT\left(1 - \frac{Cp}{T^{(5+2m)/2}}\right)$$

и дифференциальным уравнением

$$\left(\frac{\partial c_p}{\partial p}\right)_T = -T\left(\frac{\partial^2 v}{\partial T^2}\right)_p,$$

вывести формулу для расчета теплоемкости c_p. По этой формуле рассчитать теплоемкость c_p перегретого водяного пара при $p = 1$ *кГ/см*^{2} и температурах:

T_3, 400, 600, 800 и 1 000° К, а также при $p = 30$ *кГ/см*^{2} и температурах T_3, 600, 800 и 1 000° К. Построить в масштабе график $c_T = f(T)$ при $p = \text{const}$ по табличным данным и нанести на него рас-

считанные точки. Определить погрешности рассчитанных величин в процентах и объяснить причину этих погрешностей.

Ответ:

$$c_p = c_{p,0}(T) + \frac{5+2m}{2} \cdot \frac{3+2m}{2} \cdot \frac{CRp}{T^{(5+2m)/2}}.$$

Результаты расчета

Величины	Температура T, °К				
	$T_в$	400	600	800	1 000
	$p = 1$ кГ/см²				
c_p, ккал/кг·град	0,474	0,471	0,485	0,514	0,548
$c_{p,\text{табл}}$, ккал/кг·град	0,493	0,480	0,482	0,514	0,546
δ, %	−4,8	−1,9	+0,6	0	+0,4
	$p = 30$ кГ/см²				
c_p, ккал/кг·град	0,639	—	0,574	0,536	0,556
$c_{p,\text{табл}}$, ккал/кг·град	0,856	—	0,574	0,538	0,557
δ, %	25,4	—	0,0	−0,5	−0,2

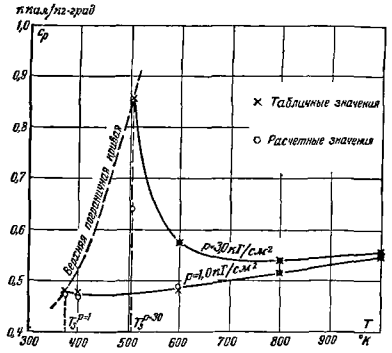


Рис. 8-3. К задаче 8-26.

При температурах 600°К и более высоких расхождения весьма малы. Вблизи от пограничной кривой они значительны и на самой пограничной линии оказываются максимальными (рис. 8-3). Это обстоятельство объясняется главным образом тем, что исходное

уравнение состояния учитывает объединение молекул только в двойные комплексы, тогда как в действительности при состоянии перегретого пара, близком к насыщению, эти комплексы могут содержать и значительно большее число молекул. Поэтому на разрушение этих комплексов затрачивается большая энергия.

9. СВОЙСТВА ВОДЫ И ВОДЯНОГО ПАРА; ПРОЦЕССЫ ИЗМЕНЕНИЯ ЕГО СОСТОЯНИЯ[1]

9-1. Состояние H_2O определяются параметрами.

а) $p = 60$ *кГ/см*^{2}; $t = 320°$ С,

б) $p = 4$ *кГ/см*^{2}, $v = 0{,}015$ *м*^{3}*/кг*;

в) $t = 170°$ С; $v = 0{,}00105$ *м*^{3}*/кг*;

г) $p = 182$ *кГ/см*^{2}; $t = 356{,}26°$ С.

Каковы качественно эти состояния (жидкость, кипящая жидкость, влажный пар, сухой насыщенный пар, перегретый пар)?

Ответ: а) перегретый пар, б) влажный пар, в) жидкость; г) состояние неопределенно, кипящая жидкость, влажный пар с любой степенью сухости или сухой насыщенный пар.

9-2. Состояние водяного пара задано следующими параметрами давление $p = 85$ *кГ/см*^{2} и плотность $\rho = 0{,}120$ *г/см*^{3}.

Определить температуру t, внутреннюю энергию u, энтальпию i и энтропию s 1 *кг* пара

Ответ: $t = 297{,}86°$ С; $u = 1\,732$ *кдж/кг*;

$i = 1\,802$ *кдж/кг*; $s = 4{,}055$ *кдж/кг*·°К.

9-3. В сосуде объемом $V = 0{,}035$ *м*^{3} содержится 0,1 *кг* водяного пара при давлении $p = 6$ *кГ/см*^{2}.

Определить величину внутренней энергии пара

Ответ: $U = 262$ *кдж*.

9-4. По трубе течет водяной пар при $p = 20$ *кГ/см*^{2} и $x = 0{,}96$ со скоростью $w = 40$ *м/сек*. Расход пара $m = 5\,000$ *кг/ч*.

Определить внутренний диаметр трубы.

Ответ: $d = 66$ *мм*.

9-5. В сосуде объемом $V = 500$ *см*^{3} 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 нею — водяной пар под давлением $p = 92$ *кГ/см*^{2}. Масса воды $m_в = 5\,900$ *кг*. Объем барабана $V = 8$ *м*^{3}.

Какова масса пара, находящегося над зеркалом испарения если пар считать сухим насыщенным?

Ответ: $m_п = 44{,}6$ *кг*

---

[1] При решении задач авторы пользовались таблицами *термодинамических свойств воды и водяного пара* [Л. 4]

9-7. Определить среднюю теплоемкость c_{m} водяного пара при $v=0{,}07$ *м³/кг* в интервале температур от $t_1=380°$ С до $t_2=610°$ С.

Ответ: $c_{m}\Big|_{t_1}^{t_2}=1{,}771$ *кдж/кг·град.*

9-8. Определить среднюю теплоемкость c_{pm} водяного пара при $p=50$ *кГ/см²* в интервале температур от 400 до 650° С

Ответ: $c_{pm}\Big|_{t_1}^{t_2}=2{,}353$ *кдж/кг·град.*

9-9. Известно, что при переходе через пограничную кривую теплоемкость c_v вещества меняется скачком. Определить величину *скачка теплоемкости водяного пара* $c_v^{нф}-c_v^{оф}$ при переходе через пограничную кривую на изохоре $v=0{,}006$ *м³/кг.*

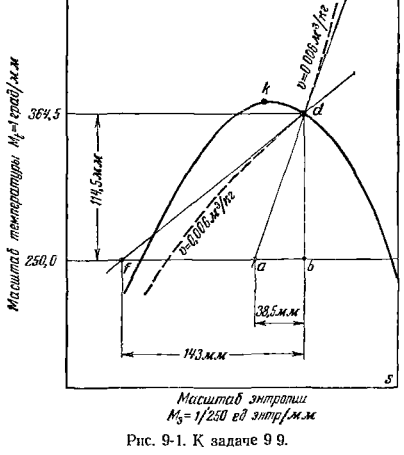


Рис. 9-1. К задаче 9 9.

$c_v^{нф}$ — теплоемкость c_v на пограничной кривой при подходе со стороны двухфазного состояния; $c_v^{оф}$ — то же со стороны однофазного состояния. Задачу решить при помощи *Ts*-диаграммы (рис. 9-1).

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

Ответ: $c_v^{дф} - c_v^{оф} = 13{,}44 - 3{,}60 = 9{,}84$ *кдж/кг·град.*

9-10. Определить объем резервуара, заполненного влажным паром, имеющим степень сухости $x=0{,}65$, если масса пара $m=160$ *кг*, а температура в резервуаре $t=280°$ С.

Ответ: $V=3{,}21$ *м*³.

9-11. Вакуумметр, установленный на конденсаторе паровой турбины, показывает разрежение $p_{вак}=720$ *мм рт. ст.*, а ртутный барометр, находящийся в машинном зале,— давление $B=998$ *мбар*

Определить объем поступающего в конденсатор пара (имеющего степень сухости $x=0{,}872$) в течение 1 *сек*, если часовой расход пара, проходящего через установку, равен $D=540$ *т/ч*. Во сколько раз объем пара превышает объем конденсата?

Ответ: $V_п=4\,713$ *м*³*/сек*; $v_п/v_к=31\,298$.

9-12. Найти в общем виде разность между значением энтальпии жидкости на нижней пограничной кривой $i'=i'(p)$ и теплом q'_p, которое нужно подвести к 1 *кг* воды, чтобы нагреть ее при постоянном давлении p от температуры в тройной точке $t_{тр}$ до температуры насыщения t_s.

Вычислить величины этой разности для $p=20$ и 200 *кГ/см*². Определить, какую долю в процентах составляет искомая разность от величин i'.

Решение

Полный дифференциал энтальпии i равен:

$$di = c_p dt + \left(\frac{\partial i}{\partial p}\right)_T dp,$$

следовательно,

$$i - i_0 = \int_{t_0}^{t} c_p dt + \int_{p_0}^{p} \left(\frac{\partial i}{\partial p}\right)_T dp.$$

В этом выражении $i_0=0$, если точка начала отсчета энтальпии взята при параметрах p_0 и t_0. Для воды эти параметры приняты равными $p_0=p_{тр}$ и $t_0=t_{тр}$, т. е. равными параметрам в тройной точке. Следовательно, энтальпия i' равна:

$$i' = \int_{t_{тр}}^{t_s} c_p dt + \int_{p_{тр}}^{p=p_s} \left(\frac{\partial i}{\partial p}\right)_{T=T_{тр}} dp.$$

Первый интеграл представляет собой величину q'_p. Следовательно, искомая разность равна:

$$i' - q'_p = \int_{p_{тр}}^{p} \left(\frac{\partial i}{\partial p}\right)_{T=T_{тр}} dp.$$

Рассматривая выражение для полного дифференциала, мы видим, что последний интеграл равен величине энтальпии жидкости при температуре $t=t_{тр}$ и давлении p (рис. 9-2), т. е.

$$\int_{p_{тр}}^{p} \left(\frac{\partial i}{\partial p}\right)_{T=T_{тр}} dp = i\,(p,\ t_{тр}).$$

Допуская очень малую ошибку, можно принять, что $t_{тр}=0{,}01°\,C \approx 0°\,C$. Тогда искомая в задаче разность находится прямо из таблиц при $t=0°\,C$ и различных давлениях.

По таблицам находим: при $p=20$ *кГ/см²* величина $i'-q'_p=0{,}5$ *ккал/кг*, что составляет от $i'=215{,}9$ *ккал/кг* всего лишь 0,2%. При $p=200$ *кГ/см²* искомая разность равна 4,7 *ккал/кг*, т. е. 1,1% от величины $i'=431{,}3$ *ккал/кг*.

Таким образом, при невысоких давлениях можно считать приближенно, что $i' \approx q'_p$

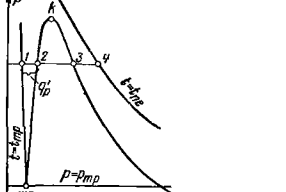


Рис. 9-2. К задаче 9-12.
«тр»—$i=0$; $1-i=i(p,\ t_{тр})$; $2-i=i'\,(p)$; $3-i=i'(p)$; $4-i=i(p,\ t_{пе})$.

9-13. Пользуясь таблицами, определить величины разности между энтальпией i' и внутренней энергией u' на нижней пограничной кривой при давлениях $p=20$ и 200 *кГ/см²*.

Какой процент составляет эта разность от величины i'?

Ответ: при 20 *кГ/см²* $i'-u'=0{,}55$ *ккал/кг*, или 0,25% от i'; при 200 *кГ/см²* $i'-u'=9{,}31$ *ккал/кг*, т. е. 2,16% от i'.

9-14. На сколько отличаются величины энтальпий перегретого пара $i_{пе}=i_{пе}(p,\ t_{пе})$ от величин $q_p=i_{пс}-i(p,\ t_{тр})$ при давлении $p=20$ *кГ/см²* и температуре $t_{пе}=500°\,C$, а также при $p=200$ *кГ/см²* и той же температуре?

Ответ: $\delta_1=0{,}06\%$; $\delta_2=0{,}61\%$. На рис. 9-2 $q_p=i_4-i_1$.

9-15. При помощи *is*-диаграммы определить теплоту парообразования r при абсолютном давлении $p=20$ *кГ/см²*. Сравнить результат с табличным значением.

Указание: На изобаре $p=20$ *кГ/см²* выбрать точку, отвечающую некоторой произвольной степени сухости x (рис 9-3, точка A).

Для этого состояния выразить энтальпию влажного пара i_x через r и i''. Значения i_x и i'' определить по *is*-диаграмме.

9-16. Хорошо известен следующий опыт: на брусок льда положена проволока, к концам которой привешены два тяжелых груза (рис. 9-4). Через некоторое время проволока проходит сквозь брусок, который, тем не менее, остается цельным.

Объяснить это явление. Определить температуру в точках соприкосновения проволоки со льдом, если эта проволока имеет квадратное (1×1 *мм*) сечение, ширина поверхности бруска равна 100 *мм*, масса каждого груза $m=250$ *кг*, а температура воздуха в помещении $t=0°\,C$. Теплота плавления льда при $t=0°\,C$ равна

$r=334$ *кдж/кг*, удельные объемы воды и льда на кривых фазовых переходов вода — лед при $t=0°$ С равны $v_в=0{,}9999\cdot10^{-3}$ *м³/кг* и $v_л=1{,}0907\cdot10^{-3}$ *м³/кг*.

Указание: применить уравнение Клапейрона Клаузиуса, заменив производную отношением конечных приращений давления и температуры.

Ответ: $t=-3{,}6°$ С.

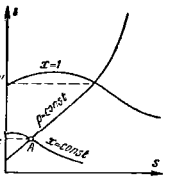


Рис. 9-3. К задаче 9-15.

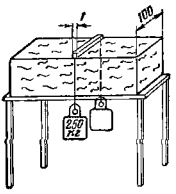


Рис. 9-4 К задаче 9-16.

9-17. Из опыта получена зависимость $p_s=f(t_s)$ между давлением и температурой насыщения водяного пара, которая описывается кривой (рис 9-5). Найти графоаналитическим методом величину теплоты парообразования r при $p_s=0{,}6$ *кГ/см²* Сравнить полученное значение r с табличным.

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 давление $p_s=0{,}6$ *кГ/см²*

Очевидно, что

$$\frac{dp_s}{dt_s}=\operatorname{tg}\alpha=\frac{\text{отрезок } AB}{\text{отрезок } CB}=$$

$$=\frac{0{,}6\cdot10^4}{25}\ кГ/м^2\cdot{}^\circ\text{град}.$$

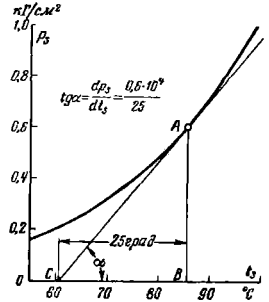


Рис 9-5. К задаче 9-17

По графику определяем значение температуры $T_s=86+273=359°$ К. Значение v'' подсчитываем приближенно по уравнению Клапейрона (ошибка при этом для такого малого давления составляет примерно 1,5%):

$$v''\approx\frac{848\cdot359}{18\cdot0{,}6\cdot10^4}=2{,}82\ м^3/кг.$$

Значением v' можно пренебречь, так как удельный объем воды приблизительно равен 0,001 $м^3/кг$, а эта величина составляет всего лишь 2,5% от величины погрешности определения v''.

Таким образом,

$$r = \frac{0{,}6 \cdot 10^4 \cdot 359 \cdot 2{,}82}{427 \cdot 25} = 568 \text{ ккал/кг}.$$

По таблицам при $p = 0{,}6$ $кГ/см^2$ $r = 548.0$ $ккал/кг$. Следовательно, ошибка в определении r оказалась равной $\delta = (568 - 548)\frac{100}{548} = 3{,}6\%$.

9-18. Какова величина перегрева воды $\Delta t_п$, окружающей пузырек пара, образовавшегося на нагреваемой стенке сосуда, если давление на свободную поверхность воды равно $p = 1$ $кГ/см^2$, высота уровня равна $h = 300$ $мм$ и радиус кривизны пузырька $r = 0{,}005$ $мм$ (рис. 9-6)? Коэффициент поверхностного натяжения на границах поверхностей вода — пар в пузырьке можно подсчитать по эмпирической формуле Бачинского [Л 17]:

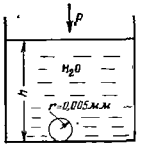


Рис 9-6. К задаче 9-18.

$$\sigma = 0{,}007! \left(\frac{\rho' - \rho''}{1\,000}\right)^4, \; кГ/м,$$

в которой ρ' и ρ'', $кг/м^3$ — соответственно плотности жидкости и сухого насыщенного пара.

Ответ: $\Delta t_п = 6$ $град$.

9-19. Для исследования термодинамических свойств веществ на линии насыщения применяется калориметр, устроенный по следующему принципу (рис. 9-7).

Адиабатически изолированный сосуд, в котором в равновесии находятся кипящая жидкость и над нею сухой насыщенный пар, снабжен пароотводной трубкой с вентилем 1 и водоотводной трубкой с вентилем 2.

Открывая нужные вентили, можно выпускать из сосуда либо пар, либо воду, либо то и другое одновременно. Давление $p = p_0$.

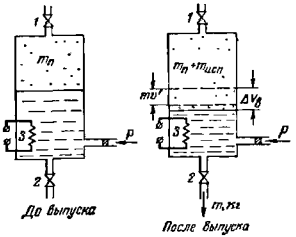


Рис. 9-7. К задачам 9-19, 9-21.

в сосуде поддерживается все время строго постоянным. Для сохранения равновесного состояния к системе подводят энергию в виде тепла. 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 если при закрытом вентиле 1 из калориметра за время $\tau = 10$ *мин* удаляется $m = 0{,}8$ *кг* жидкой кипящей воды?

Абсолютное давление в калориметре $p = 20$ *кГ/см*^{2}.

Решение

Введем некоторые дополнительные обозначения:

$m_п$ — количество сухого насыщенного пара до выпуска, *кг*;

$m_в$ — количество кипящей воды до выпуска, *кг*;

$m_{исп}$ — количество испаренной за τ, *мин*, воды, *кг*;

$V_{исп}$ — объем этой воды, *м*^{3};

$\Delta m_в$ — уменьшение первоначальной массы воды за счет выпуска и испарения, *кг*;

$\Delta V_в$ — объем, соответствующий этому уменьшению, *м*^{3}.

Составим уравнение материального баланса вещества в калориметре.

$$m_в + m_п = m_в - \Delta m_в + m_п + m_{исп} + m$$

или

$$\Delta m_в = m_{исп} + m,$$

но $\Delta m_в = \Delta V_в / v'$, а в свою очередь $\Delta V_в = m_{исп} v''$.

Следовательно, $\Delta m_в = m_{исп} \cdot v''/v'$. Уравнение баланса примет вид:

$$m_{исп} \frac{v''}{v'} = m_{исп} + m.$$

Находим из этого уравнения величину $m_{исп}$:

$$m_{исп} = \frac{'m}{\frac{v''}{v'} - 1} = m \frac{v'}{v'' - v'}.$$

Величина $v'/(v''-v')$ в последнем уравнении определяет то количество килограммов воды, которое в целях сохранения равновесного состояния нужно испарить, если из калориметра удалять 1 *кг* H_2O в виде кипящей жидкости.

Энергия, потребная для этого, будет равна.

$$\beta = r \frac{v'}{v'' - v'}, \ дж/кг,$$

где r, *дж/кг* — теплота парообразования при $p_в = p$.

Искомая мощность нагревателя

$$N = \frac{\beta m}{60\tau}, \ вт.$$

Находим из таблиц величины v', v'' и r при $p_в=20$ *кГ/см²*: $v'=0{,}0011749$ *м³/кг*; $v''=0{,}1015$ *м³/кг* и $r=452{,}6$ *ккал/кг*. Подставляя их в выражение для мощности и учитывая, что 1 *ккал*$=10^3\times$ $\times 4{,}1868$ *дж*, получаем:

$$N=\frac{0{,}8\cdot 452{,}6\cdot 4{,}1868\cdot 10^2\cdot \dfrac{0{,}0011749}{0{,}1015-0{,}0012}}{10\cdot 60}=29{,}6\ вт.$$

9-20. Из калориметра, описанного в задаче 9-19 (рис 9-8), при закрытом вентиле 2 удаляется 1 *кг* сухого насыщенного пара.

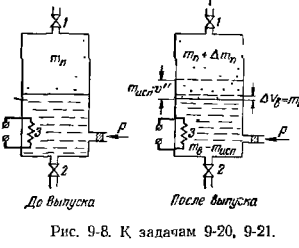


Рис. 9-8. К задачам 9-20, 9-21.

Какое количество $m_{исп}$, *кг*, воды нужно испарить с помощью нагревателя, чтобы в калориметре при неизменном давлении $p=$ $=20$ *кГ/см²* сохранилось равновесие?

Какова потребная мощность нагревателя, если при тех же условиях удаляется $m=0{,}8$ *кг* пара в течение $\tau=10$ *мин*?

Ответ:

$$m_{исп}=1\cdot\frac{v''}{v''-v'}=1{,}012\ кг;$$

$$N=\gamma\frac{m}{60\tau}=2{,}56\ квт,\ \text{где}\ \gamma=r\frac{v''}{v''-v'}.$$

Величина γ определяет ту энергию, которую необходимо подвести, чтобы сохранить равновесие в калориметре, если из него удаляется 1 *кг* H_2O в виде сухого насыщенного пара.

9-21. Для определения теплоты парообразования воды были проведены два опыта с калориметром, описанным в задаче 9-19. В первом из них при постоянно поддерживаемом равновесном состоянии выпускалась вода и после охлаждения взвешивалась. Во втором — выпускался сухой насыщенный пар, и конденсат его также взвешивался. Измерялось время опыта, давление в калориметре

и мощность на клеммах нагревателя. Средние величины, полученные из опыта, приведены ниже:

Наименование опыта	Абсолютное давление, p, $кГ/см^2$	Время опыта τ, мин	Количество выпущенного вещества m, $г$	Падение напряжения на клеммах нагревателя ΔU, $в$	Сила тока, протекавшего через нагреватель, I, $а$
Опыт с выпуском кипящей воды	60,0	15	785	9,18	6,2
Опыт с выпуском сухого насыщенного пара	60,0	16	360	90,75	6,8

На основании опытных данных определить величину теплоты парообразования.

Ответ: $r=\gamma-\beta=1\,580$ *кдж/кг*$=377$ *ккал/кг*.

9-22. Какое количество тепла q_v, *кдж/кг*, нужно отвести от 1 *кг* водяного пара, имеющего параметры $p_1=110$ $кГ/см^2$ и $x_1=0{,}90$, если при постоянном объеме его паросодержание уменьшается до $x_2=0{,}10$?

Задачу решить, не прибегая к Ts диаграмме.

Ответ: $q_v=-1\,415$ *кдж/кг*.

9-23. Водяной пар охлаждается в закрытом сосуде и изменяет свое состояние от p_1 и t_1 до комнатной температуры $t=20°$ С.

Каково будет конечное состояние вещества, если а) $p_1=100$ $кГ/см^2$; $t_1=600°$ С; б) $p_1=300$ $кГ/см^2$, $t_1=520°$ С?

Ответ: В обоих случаях образуется влажный пар. $p_a^{кон}=p_б^{кон}=p_{s,\,t=20°\,C}=0{,}02383$ $кГ/см^2$; $x_а=0{,}066\%$; $x_б=0{,}015\%$.

9-24. В начале растопки парового котла состояние пароводяной смеси определяется параметрами $p_1=20$ $кГ/см^2$ и $x_1=0{,}02$.

За какое время при закрытых вентилях на линии питательной воды и на паровой магистрали давление пара в котле возрастет до $p_2=50$ $кГ/см^2$, если топочные газы отдают рабочему телу $Q=4\,000$ *ккал/мин* тепла, а масса пароводяной смеси $m=10^4$ *кг*?

Ответ: За 2 ч 45 *мин*.

9-25. 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. 9-9.

Используя этот график и таблицы свойств воды и водяного пара, определить массу помещенной в сосуд воды, если объем сосуда составлял 300 $см^3$.

Ответ: $m=212$ *г*.

9-26. В пароперегреватель котельного агрегата поступает водяной пар в количестве 16 *т/ч*. Определить сообщаемое пару часовое количество тепла Q, необходимое для перегрева пара до $t_{пе}=560°$ С, если степень сухости пара перед входом в пароперегре-

ватель $x_1=0{,}98$, а абсолютное давление пара в пароперегревателе $p=130$ *кГ/см²*.

Выразить Q в *ккал/ч* и в *Мвт* Изобразить процесс в *Ts*- и *is*-диаграммах Задачу решать, пользуясь таблицами

Ответ: $Q=3\,133\cdot10^3$ *ккал/ч*=3,46 *Мвт* (рис. 9-10).

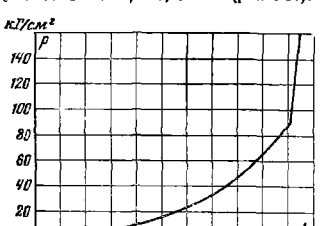


Рис 9-9. К задаче 9-25

9-27. К *питательной воде, вводимой в прямоточный* котел при давлении $p_1=240$ *кГ/см²* и температуре $t_1=350°$ С в количестве $D=900\cdot10^3$ *кг/ч*, подводится от топочных газов $Q=1\,609$ *Гдж/ч* тепла.



Рис. 9-10. К задаче 9-26.

Определить температуру пара на выходе из котла, его энтальпию и внутреннюю энергию. Падением давления при протекании воды и пара по трубам котла пренебречь.

Представить процесс в *Ts*-, *is*- и *pv* диаграммах

Ответ: $t_2=570°$ С; $i_2=3\,414$ *кдж/кг*, $u_2=3\,079$ *кдж/кг*.

9-28. Питательная вода при давлении $p=140$ *кГ/см²* и при температуре $t=300°$ С поступает в котельный агрегат, где превращается в перегретый пар с температурой $t=570°$ 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:

$$T_{ср} = \frac{\int_1^2 dq}{s_2 - s_1}.$$

Так как по условию $p = \text{const}$, можно записать, что $dq_p = di$. Следовательно,

$$T_{ср} = \frac{i_2 - i_1}{s_2 - s_1}.$$

На рис 9-11 изображен рассматриваемый процесс *1—2* и показана изотерма $T = T_{ср}$. Очевидно, что на этом чертеже пл $12s_2s_1 = $ пл. $34s_2s_1$.

Ответ: $t_{ср} = 365°$ С.

9-29. Теплоэлектроцентраль (ТЭЦ) отдает на производственные нужды заводу $D_{пр} = 20\,000$ *кг/ч* пара при $p = 7{,}0$ *кГ/см²* и $x = 0{,}95$



Рис. 9-11. К задаче 9-28

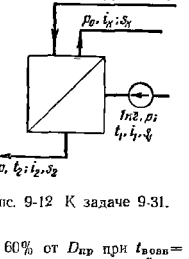


Рис. 9-12 К задаче 9-31.

Завод возвращает конденсат в количестве 60% от $D_{пр}$ при $t_{возв} = 70°$ С. Потеря конденсата покрывается химически очищенной водой, имеющей температуру $t = 90°$ С.

Сколько килограммов топлива в час нужно было бы сжечь в топке котла, работающего с к. п. д. $\eta_{ку} = 0{,}80$, если бы этот котел специально вырабатывал пар, нужный заводу, и если теплота сгорания топлива $Q_н^р = 30\,000$ *кдж/кг*?

Ответ: $B = 1{,}94$ *т/ч*.

9-30. 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 с давлением $p = 30$ *кГ/см²* и температурой $t_1 = 480°$ С, которую нужно снизить до $t_2 = 460°$ С?

Вода на входе имеет давление такое же, как и давление пара, а температура ее $t_в = 20°$ С.

Ответ: 0,0138 *кг/кг* пара.

9-31. В поверхностном подогревателе (рис 9-12) производится регенеративный подогрев питательной воды греющим паром, отобранным из турбины при $p_0 = 6{,}6$ *кГ/см²* 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 $p = 100$ *кГ/см²*, имеет на входе $t_1 = 110°$ С и на выходе $t_2 = 155°$ С.

Определить количество пара α, *кг/кг*, необходимое для подогрева 1 *кг* питательной воды.

Найти увеличение энтропии системы, происходящее из-за необратимости процесса теплообмена. Потерями на трение пренебречь.

Ответ: $\alpha = 0{,}0974$ *кг/кг*; $\Delta s_c = 0{,}0074$ *ккал/кг · °К*.

9-32. Водяной пар, находящийся в состоянии при $p_1 = 64$ *кГ/см²* и $t_1 = 440°$ С, изоэнтропически расширяется до тех пор, пока его температура не оказывается равной $t_2 = 200°$ С.

Определить средний показатель k для этого процесса, если он условно описывается уравнением $pv^k = \text{const}$.

Решение

Так как водяной пар не подчиняется уравнению $pv = RT$, показатель $k \neq c_p/c_v$ и поэтому в уравнении $pv^k = \text{const}$ величина k является лишь некоторым условным показателем степени, меняющимся на протяжении процесса.

Среднее значение k можно вычислить, зная начальные и конечные параметры, из соотношения

$$p_1 v_1^k = p_2 v_2^k,$$

откуда

$$k = \frac{\lg (p_1/p_2)}{\lg (v_2/v_1)}.$$

Для того чтобы определить параметры p_2 и v_2, необходимо сначала найти энтропию $s_1 = s_2 = 1{,}5898$ *ккал/кг · °К*. Так как $s_2 > s''_{p=64} = 1{,}4016$ *ккал/кг · °К*, пар в точке 2 является перегретым. Из таблиц перегретого пара видно, что при температуре $t_2 = 200°$ С значение энтропии $s_2 = 1{,}5898$ соответствует давлению p_2, лежащему между $p = 10{,}5$ и $11{,}0$ *кГ/см²*. Линейно интерполируя, находим, что $p_2 = 10{,}88$ и $v_2 = 0{,}1923$ *м³/кг*. Следовательно,

$$k = \frac{\lg (64/10{,}88)}{\lg (0{,}1923/0{,}04882)} = 1{,}293.$$

Здесь $0{,}04882 = v_1$, *м³/кг*.

Значительно проще, но менее точно находятся параметры, нужные для вычисления k, по *is*-диаграмме.

9-33. Сухой насыщенный пар при $p_1 = 15$ *кГ/см²* расширяется по обратимой адиабате до тех пор, пока его удельный объем v_2 не становится равным 0,50 *м³/кг*.

Пользуясь *is*-диаграммой, определить средний показатель k влажного пара для этого процесса. Указать метод аналитического (с помощью таблиц) решения этой задачи.

Ответ: $k=1{,}127$. Для аналитического расчета необходимо совместно решить два уравнения:

$$s''_{p=15}=s_2=s'_2+(s''_2-s'_2)\,x_2;$$

$$v_2=v'_2+(v''_2-v'_2)\,x_2.$$

Давление p_2, которому соответствуют значения v'_2, v''_2, s'_2 и s''_2, обращающие оба уравнения в тождества (эти величины объемов и энтропий берутся из таблиц кипящей воды и сухого насыщенного пара при p_2), находится методом последовательного приближения.

9-34. Полезная внешняя работа тела при изменении его состояния равна $l_{пол}=-\int_{p_1}^{p_2} v\,dp$. При изоэнтропическом расширении этот интеграл равен „теплоперепаду", т. е. разности энтальпий i_1-i_2.

Определить теоретическую мощность турбины, если часовой расход пара D, протекающего через нее, составляет 640 *т/ч*. На входе в турбину пар имеет параметры $p_1=130$ *кГ/см²* и $t_1=565°$ С. Давление в конденсаторе турбинной установки $p_2=0{,}04$ *кГ/см²*. Процесс расширения пара в турбине считать обратимым, т. е. изоэнтропическим. Задачу решить, пользуясь только таблицами.

Решение

Полная внешняя работа в единицу времени, т. е. искомая мощность, составляет

$$N=D(i_1-i_2).$$

Задача, таким образом, сводится к нахождению табличных значений энтальпий пара в начальном и конечном состоянии. Энтальпия i_1 находится непосредственно по заданным начальным параметрам. Для определения i_2 воспользуемся условием изоэнтропичности процесса, которое определяется равенством

$$s_1=s_2.$$

Находим нужные нам начальные величины $i_1=838{,}3$ *ккал/кг* и $s_1=1{,}5919$ *ккал/кг*·°К.

Энтропия сухого насыщенного пара при $p_2=0{,}04$ *кГ/см²* равна $s''_2=2{,}0255$, а энтропия кипящей жидкости $s'_2=0{,}0998$ *ккал/кг*·°К. Сопоставляя эти три значения энтропий, заключаем, что в конечном состоянии пар оказывается влажным.

Определяем степень сухости x_2:

$$x_2=\frac{s_2-s'_2}{s''_2-s'_2}=\frac{s_1-s'_2}{s''_2-s'_2}=\frac{1{,}5919-0{,}0998}{2{,}0255-0{,}0998}=0{,}775.$$

Теперь легко найти энтальпию i_2 в конечном состоянии:

$$i_2=i'_2+r_2x_2.$$

Из таблиц находим (при $p_2=0{,}04$ *кГ/см²*), $i'_2=28{,}67$ и $r_2=581{,}1$ *ккал/кг*

Следовательно,

$$i_2=28{,}67+581{,}1\cdot 0{,}775=479{,}0 \text{ ккал/кг}.$$

Вычисляем, наконец, искомую мощность в *квт*, учитывая, что 1 *ккал*=4,1868 *кдж*:

$$N=4{,}1868\cdot 640\cdot 10^3\,(838{,}3-479{,}0)\cdot\frac{1}{3\,600}=$$

$$=267\cdot 10^3 \text{ квт}=267 \text{ Мвт}.$$

9-35. В результате прожога стенки барабанного котла произошел взрыв. Барабан имел объем $V=8{,}5$ *м³*, 0,6 объема было заполнено водой, а остальная часть — сухим насыщенным паром. Давление в барабане 10 *кГ/см²* Давление в топке 1 *кГ/см²*.

Определить объем пара в конце процесса взрыва и работу расширения пара в этом процессе, если считать, что он протекал изоэнтропически

Ответ: $V_2=1\,100$ *м³*, $L=258$ *Мдж*.

9-36. 1 *кг* водяного пара, имея параметры $p_1=130$ *кГ/см²* и $t_1=565°$ С изоэнтропически расширяется до давления $p_2=0{,}04$ *кГ/см²*.

Рассчитать процесс, т. е. найти «недостающие» параметры (*t*, *v*, *i*, *s*, *x*) в начале и в конце процесса, определить величину работы расширения и изменение внутренней энергии.

Расчет сделать, пользуясь только таблицами, и проверить его при помощи *is*-диаграммы

Ответ: $v_1=0{,}02810$ *м³/кг*; $i_1=3\,510$ *кдж/кг*;

$$s_1=s_2=6{,}665 \text{ кдж/кг}\cdot{}^\circ\text{K};\ v_2=27{,}48 \text{ м}^3/\text{кг};$$

$$t_2=28{,}6^\circ \text{ C};\ x_2=0{,}775;\ i_2=2\,005 \text{ кдж/кг};$$

$$l=-(u_2-u_1)=1\,264 \text{ кдж/кг}.$$

9-37. Пар, имеющий параметры $p_1=34$ *кГ/см²* и $x_1=98\%$, изоэнтропически сжимается до $p_2=85$ *кГ/см²*.

Найти температуру и энтальпию пара в конечном состоянии. Определить величину работы сжатия и изменение внутренней энергии 1 *кг* пара

Задачу решить, пользуясь только таблицами.

Ответ:

$$t_2=348{,}3^\circ \text{ C};\ i_2=2\,966 \text{ кдж/кг};$$

$$l=-\Delta u=-158{,}7 \text{ кдж/кг}.$$

9-38. Покрытый тепловой изоляцией резервуар объемом $V=10$ *м³* наполовину заполнен водой при температуре насыщения и наполовину сухим насыщенным паром Давление в резервуаре $p_1=94$ *кГ/см²*. Быстро открывая задвижку *l* (рис. 9-13), выпускают пар в атмосферу до тех пор, пока давление в резервуаре не становится равным $p_2=60$ *кГ/см²*, после чего задвижку закрывают. Ка-

кой объем будет занимать пар, оставшийся в барабане, после закрытия задвижки?

Процесс изменения состояния H_2O в резервуаре считать изоэнтропическим.

Ответ: $V_{п.\ 2}=5{,}82\ м^3$.

9-39. Вода в состоянии насыщения при температуре $t_1=t_s=28{,}64°$ С подается в насос, который изоэнтропически сжимает ее в одном случае до 30 $кГ/см^2$ и во втором до 300 $кГ/см^2$. Определить энтальпию и внутреннюю энергию 1 $кг$ воды в конце процесса сжатия в обоих случаях.

Ответ: 1) $i_2=123{,}2$ $кдж/кг$; $u_2=120{,}2$ $кдж/кг$;

2) $i_2=149{,}5$ $кдж/кг$; $u_2=120{,}2$ $кдж/кг$.

9-40. 1 $кг$ водяного пара сжимается изотермически. При этом состояние пара меняется так, что начальные его параметры $p_1=32$ $кГ/см^2$ и $t_1=360°$ С, а конечные — соответствуют состоянию кипящей жидкости. Определить параметры в конце процесса и количество отведенного тепла.

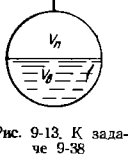


Рис. 9-13. К задаче 9-38

Ответ: $p_2=190{,}42$ $кГ/см^2$; $v_2=0{,}001894$ $м^3/кг$; $i_2=420{,}7$ $ккал/кг$, $s_2=0{,}9345$ $ккал/кг\cdot°К$; $q=-428$ $ккал/кг$.

9-41. В цилиндре под поршнем находится пароводяная смесь при давлении $p_1=92$ $кГ/см^2$ и степени сухости $x_1=0{,}125$. Первоначальный объем смеси $V_1=10\ м^3$. К содержимому цилиндра изотермически подводится тепло в количестве $Q=6\cdot10^6$ $кдж$. Определить начальные и конечные параметры состояния вещества (p, t, v, i, s), изменение его внутренней энергии и работу, произведенную при расширении.

Представить процесс в Is-диаграмме.

Решение

Начальные параметры находятся при помощи таблиц. По таблицам параметров на пограничных линиях находим при $p_1=92$ $кГ/см^2$. $t_1=t_2=303{,}49°$ С или $T_1=T_2=576{,}64°$ К

Удельный объем смеси

$$v_1=(1-x_1)v'_1+x_1v''_1=0{,}875\cdot0{,}001418+0{,}125\cdot0{,}02042=$$

$$=0{,}00380\ м^3/кг.$$

Энтальпия

$$i_1=i'_1+r_1x_1=325{,}9+329{,}1\cdot0{,}125=307{,}0\ ккал/кг$$

$$s_1=s'_1+\frac{r_1x_1}{T_1}=0{,}7854+\frac{329{,}1\cdot0{,}125}{577}=0{,}8561\ ккал/кг\cdot°К.$$

Остальные параметры на пограничных линиях и значения при $p_1=92$ $кГ/см^2$.

Определим теперь энтропию в конечной точке процесса. Для изотермического процесса имеем:

$$s_2 = s_1 + \frac{Q}{mT},$$

где m — масса вещества в цилиндре, равная

$$m = V_1/v_1, \ кг.$$

Следовательно,

$$s_2 = 0{,}856 + \frac{6 \cdot 10^6 \cdot 0{,}00380}{4{,}1868 \cdot 10 \cdot 576{,}64} = 1{,}800 \ ккал/кг \cdot °К.$$

Остальные параметры в конце процесса находим по is-диаграмме. При $t = 303{,}5°$ С и $s_2 = 1{,}800$ *ккал/кг* · °К определяем: $p_2 = 4{,}4$ *кГ/см²*; $i_2 = 733{,}5$ *ккал/кг*; $v_2 = 0{,}61$ *м³/кг*. Более точно эти параметры можно определить по таблицам, интерполируя дважды — по вертикали и по горизонтали.

Находим теперь изменение внутренней энергии ΔU:

$$\Delta U = m(u_2 - u_1) = m[(i_2 - p_2v_2) - (i_1 - p_1v_1)] = m[(i_2 - i_1) -$$

$$- (p_2v_2 - p_1v_1)] = \frac{10}{0{,}00380}\left[(733{,}5 - 367{,}0) - \right.$$

$$\left. - \frac{10^4}{427}(4{,}4 \cdot 0{,}61 - 92 \cdot 0{,}00380)\right] = 0{,}819 \ Гкал = 3{,}43 \ Гдж.$$

Работа расширения определяется из уравнения первого закона термодинамики.

$L = Q - \Delta U = 6 \cdot 10^6 - 3{,}43 \cdot 10^6 = 2{,}57 \cdot 10^6$ *кдж* = 2,57 *Гдж* = 0,614 *Гкал*.

9-42. К 1 *кг* воды при давлении $p_1 = 200$ *кГ/см²* и температуре $t_1 = 320°$ С изотермически подводится $q = 1\,710$ *кдж/кг* тепла. Определить параметры (p_2, v_2, i_2, s_2) в конце процесса, изменение внутренней энергии и работу расширения.

Ответ: $p_2 = 51{,}9 \cdot 10^3$ *н/м²*; $v_2 = 0{,}04615$ *м³/кг*;

$i_2 = 2\,974$ *кдж/кг*; $s_2 = 6{,}279$ *кдж/кг* · °К;

$\Delta u = 1\,320$ *кдж/кг*; $l = 390$ *кдж/кг*.

10. ВЛАЖНЫЙ ВОЗДУХ

При решении задач этого раздела следует пользоваться id-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 влажный 15° С. Найти влагосодержание d, относительную влажность φ, энтальпию i, а также температуру точки росы для этого воздуха.

Ответ: $d = 9{,}2$ *г/кг* с. в.; $\varphi = 62\%$; $i = 10{,}4$ *ккал/кг* с. в.; $t_р = 12{,}6°$ С.

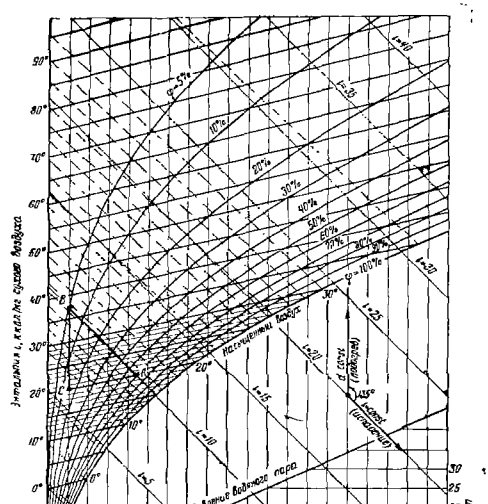


Рис. 10-1.

id-диаграмма влажного воздуха, при $p=745$ *мм рт. ст.*

10-2. Состояние влажного воздуха задано параметрами: $t=25°$ С и $\varphi=0{,}6$. С помощью таблиц водяного пара определить парциальное давление водяных паров в воздухе.

Ответ: $p_п=0{,}0190 \cdot 10^5$ *н/м*^{2}.

10-3. Состояние влажного воздуха при температуре 20° С определяется с помощью гигрометра, которым измерена температура точки росы, равная 10° С.

Определить относительную влажность φ, влагосодержание d и энтальпию i влажного воздуха.

Ответ: $\varphi=52\%$; $d=7{,}8$ *г/кг* с. в.; $i=9{,}5$ *ккал/кг* с. в.

10-4. В сушильной установке производится подсушка топлива с помощью воздуха при атмосферном давлении. От начального состояния с температурой $t_1=20°$ С и относительной влажностью $\varphi=40\%$ воздух предварительно подогревается до температуры 80° С и далее направляется в сушилку, где в процессе осушивания топлива охлаждается до 35° С. Рассчитать необходимое количество тепла q для испарения 1 *кг* влаги, параметры воздуха на выходе из сушильной камеры и количество воды, которое отбирает каждый килограмм сухого воздуха от топлива. Считать, что тепловые потери отсутствуют, а топливо уже подогрето до 80° С

Ответ: $q=812$ *ккал* на 1 *кг* испаренной влаги. 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., $\varphi=66\%$, $i=22{,}9$ *ккал/кг* с. в.

10-5. Начальное состояние воздуха задано параметрами: $t=20°$ С, $d=8$ *г/кг* с. в., $p=745$ *мм рт. ст.* Воздух сжимается адиабатически до давления 6 *кГ/см*^{2} и затем охлаждается.

Определить, при какой температуре начнется выделение влаги из этого воздуха. Для решения задачи воспользоваться *id*-диаграммой и таблицами водяного пара

Решение

По *id*-диаграмме находим, что относительная влажность $\varphi=54\%$. Следовательно, парциальное давление водяных паров равно: $p=\varphi p_s=0.54\cdot 0{,}02383=0{,}01287$ *кГ/см*^{2}, где значение давления насыщения p_s взято из таблиц водяного пара. Так как парциальное давление водяных паров будет увеличиваться пропорционально общему давлению влажного воздуха, то парциальное давление водяного пара при 6 *кГ/см*^{2} будет равно:

$$p=\frac{0{,}01287\cdot 735{,}6\cdot 6}{745}=0{,}076\ кГ/см^2.$$

Это давление водяного пара соответствует температуре насыщения 40,3° 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, $p=2{,}6$ *кГ/см*^{2}, $d=30$ *г/кг* с. в.

Решение

Находим газовую постоянную влажного воздуха $R_{вл\,в}=g_{с.в}R_{с.в}+g_{в.п}\cdot R_{в.п}$, где индексы «с.в.» и «в.п.» относятся к *сухому воздуху* и *водяному пару*.

$$R_{вл.в}=\frac{1}{1+d}R_{с.в}+\frac{d}{1+d}R_{в.п}=\frac{1}{1{,}030}\cdot\frac{8\,314}{28{,}96}+$$

$$+\frac{0{,}030}{1{,}030}\cdot\frac{8\,314}{18{,}016}=292{,}15\ дж/кг\cdot град.$$

Плотность влажного воздуха определяется из уравнения Клапейрона

$$\rho = \frac{p}{RT} = \frac{2,6 \cdot 98066,5}{292,15 \cdot 593,15} = 1,471 \ кг/м^3.$$

10-8. Для осушивания воздуха его продувают через слой вещества, поглощающего влагу (алюмогель, силикагель). Начальное состояние воздуха задано параметрами $t_1 = 15°$ С, $d_1 = 8$ *г/кг* с в. Определить температуру воздуха на выходе из подсушивающего устройства, если воздух при этом имеет влагосодержание $d_2 = 2$ *г/кг* с в. Теплообмен с окружающей средой отсутствует.

Ответ: $t_2 = 31°$ С.

10-9. Эффект охлаждения при омывании влажной ткани воздухом можно использовать для создания примитивного холодильника.

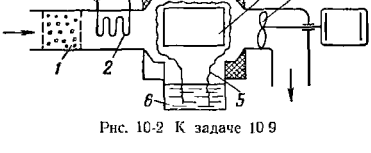


Рис. 10-2 К задаче 10 9

Этот эффект можно усилить предварительной осушкой воздуха. На рис. 10-2 дана схема такого холодильника, который представляет собою трубу, где последовательно расположены: *1* — вещество, поглощающее влагу (алюмогель, силикагель и т п); *2* — трубчатый холодильник, по которому протекает водопроводная вода; *3* — холодильная камера; *4* — вентилятор

Холодильная камера обернута тканью *5*, свободный конец которой помещен в резервуар с водой *6*. Холодильная камера имеет тепловую изоляцию.

Рассчитать наинизшую температуру, которая может быть получена в таком холодильнике, если известно: воздух имеет параметры $t = 20°$ С, $\varphi = 60\%$; после прохождения через поглотитель влаги относительная влажность воздуха уменьшается до 5%; водопроводный холодильник охлаждает воздух до 20° С. Задачу решить с помощью *id*-диаграммы

Решение

Начальное состояние воздуха отмечено на *id* диаграмме точкой *A* (рис. 10 1). Процесс подсушки воздуха при прохождении его через поглотитель и при отсутствии тепловых потерь пойдет по линии $t = \text{const}$ и закончится в точке *B* при $\varphi = 5\%$ (температура при этом повысится до 37° С). Процесс охлаждения воздуха в водопроводном холодильнике пойдет по линии $d = \text{const}$ и закончится при $t = 20°$ С (точка *C*). Воздух состояния *C* омывает влажную ткань При этом температура в камере понизится до температуры изотермы тумана, проходящей через точку *C*, т е. в холодильнике может быть достигнута температура, равная 8° С.

Следует заметить, что действительный процесс подсушки воздуха пойдет с тепловыми потерями и температура в этом процессе будет повышаться мало; если же эти тепловые потери усилить оребрением теплоотдающей поверхности, то водопроводный холодильник в такой конструкции будет практически не нужен.

10-10. Построить *id*-диаграмму влажного воздуха для давлений воздуха от 1 до 15 *кГ/см*², т. е построить в *id*-координатах линии $\varphi = 100\%$ для различных давлений.

Решение

Диаграмму можно построить, принимая, что влажный воздух до 15 *кГ/см*² является идеальным газом. В этом случае энтальпия i влажного воздуха зависит только от температуры и влагосодержаний пара $d_п$ и воды $d_ж$ в воздухе и рассчитывается по обычной формуле

$$i = 0{,}24t + 10^{-3}d_п\,(597 + 0{,}46t) + 10^{-3}d_ж t. \qquad (1)$$

Положение линий $\varphi = const = 100\%$ определяется соотношением

$$d_п = 622\,\frac{p_s}{p - p_s}, \qquad (2)$$

где p_s — давление насыщения при данной температуре,

p — давление влажного воздуха.

Произведя расчеты по этим двум формулам, можно построить требуемую диаграмму, которая была впервые опубликована в [Л. 12] и приведена также здесь (рис. 10-3).

На построенной диаграмме показаны изотермы области тумана, наклон которых определяется обычным соотношением

$$\left(\frac{\partial i}{\partial d_ж}\right)_t = 0{,}001t. \qquad (3)$$

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.

$$\frac{p_1}{\varphi_1} = \frac{p_2}{\varphi_2}. \qquad (4)$$

Учитывая, что в диаграмме имеются лишь линии $\varphi = 100\%$, формулу (4) перепишем следующим образом:

$$\varphi_п = \frac{p}{p_{\varphi=100\%}}, \qquad (5)$$

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; эта формула написана также на *id*-диаграмме (рис. 10-3).

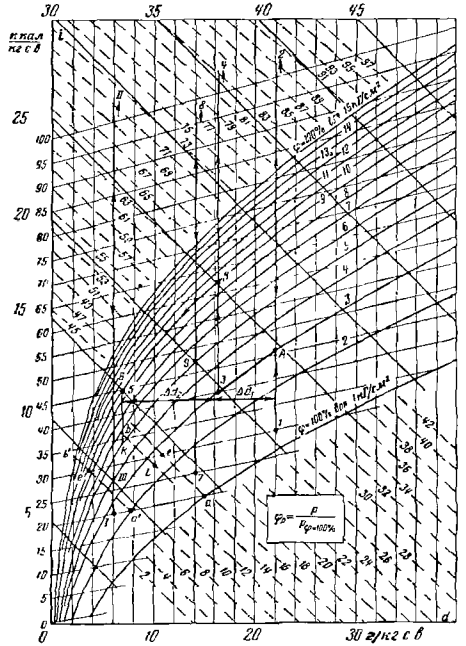


Рис. 10-3.

id-диаграмма влажного воздуха для давлений от 1 до 15 *кГ/см²* (кривые $\varphi = 100\%$ для различных давлений)

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 *id*-диаграммы (*рис.* 10-3)*.

* Эта и все последующие задачи этого раздела решаются с помощью *id*-диаграммы (рис 10-3)

Решение

Прежде всего необходимо нанести на диаграмму изотерму «мокрого» термометра $t=20°$ С при 1 *кГ/см²* Для этого (см. рис. 10-3) из точки *a* (из точки пересечения изотермы $t=20°$ С и линии $\varphi=100\%$ для 1 *кГ/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 $p_{\varphi=100\%} = 2{,}5$ *кГ/см²* (соответствует точке *e*).

Можно легко убедиться, что по обычной *id*-диаграмме получается такой же результат.

Для атмосферного давления проще пользоваться обычной диаграммой.

10-12. В трубе, по которой протекает воздух при давлении 2 *кГ/см²*, находятся сухой и «мокрый» термометры; показания их равны соответственно 30 и 20° С

Требуется определить влагосодержание *d* и относительную влажность φ проходящего воздуха.

Решение

На *id*-диаграмме необходимо провести изотерму тумана при $t=20°$ С и $p=2$ *кГ/см²* (рис 10 3) Эта линия будет проходить параллельно пунктирной с температурой $t=20°$ С и начинаться она будет в точке *a'* (в точке пересечения изотермы $t=20°$ С и линии $\varphi=100\%$ для 2 *кГ/см²*) — линия *a'b'*. Аналогично задаче 10-11 находим точку *e'*, которая соответствует состоянию воздуха Влагосодержание здесь равно $d=3{,}5$ *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, имеющий параметры $t=20°$ С, $p=1$ *кГ/см²*, $d=6$ *кг/кг* с. в., сжимается в компрессоре до давления 4 *кГ/см²* и охлаждается затем в трубах

Определить, при какой температуре начнется выпадение воды?

Решение

На рис. 10-3 начальное состояние обозначено точкой *I*. Процесс сжатия воздуха будет изображаться линией *I-II* при $d=$const. Температура при сжатии повышается; конечная точка при сжатии выйдет, вероятно, за пределы диаграммы. Последующий процесс охлаждения будет идти также по прямой $d=6$ *г/кг* с. в.=const сверху вниз. Выпадение влаги начнется тогда, когда в процессе охлаждения будет достигнуто состояние насыщения воздуха при $d=6$ *г/кг* с. в. и $p=4$ *кГ/см²*, т е на линии $\varphi=100\%$ для 4 *кГ/см²* — точка *III*.

По диаграмме находим, что выпадение влаги начнется при $t=27{,}5°$ С. Из диаграммы видно, что если бы в данном случае воздух сжимался до 10 $кГ/см^2$, то выпадение влаги началось бы уже при 45° С.

10-14. Влажный воздух при начальных параметрах $p_1=6$ $кГ/см^2$, $t_1=55°$ С и $d_1=10$ $г/кг$ с. в. направляется по трубопроводу к потребителю, постоянно охлаждаясь по мере движения в трубах

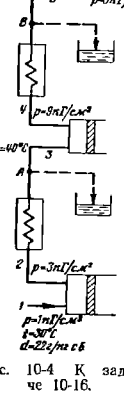


Рис. 10-4 К задаче 10-16.

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 $p_{изб}=2$ $кГ/см^2$?

Ответ: $t_2=44°$ С и $t_{2'}=32°$ С

10-15. Воздух с параметрами $t_1=15°$ С; $p=1$ $кГ/см^2$ и $d_1=10$ $г/кг$ с. в. сжимается с отводом тепла Параметры воздуха в конце процесса сжатия $t_2=60°$ С; $p_2=7$ $кГ/см^2$

Определить относительную влажность в конце процесса сжатия

Ответ: $\varphi_2=65\%$.

10-16. На рис 10-4 изображена схема сжатия воздуха в двухступенчатом компрессоре с промежуточными холодильниками и отбором влаги, а также с последующим дросселированием воздуха Параметры воздуха указаны на схеме Необходимо проследить по диаграмме 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 10-3). При охлаждении воздуха в первом холодильнике (давление воздуха 3 $кГ/см^2$) начнется 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 $кГ/см^2$.

Если вся выпадающая влага будет удаляться из воздуха, то дальнейшее охлаждение воздуха до 40° С пойдет по линии $\varphi=100\%$ для 3 $кГ/см^2$ (отрезок *A—3*) и во вторую ступень компрессора будет подаваться насыщенный воздух ($\varphi=100\%$) при $p=3$ $кГ/см^2$ и $t=40°$ С (состояние *3*). Аналогично этому для второй ступени компрессора процесс сжатия изображен на диаграмме линией *3—4*, охлаждение — линией $d=$const Выпадение влаги начнется в точке *B*, т. е. при температуре 63°С, а из холодильника вто-

рой ступени воздух выйдет при $t=45°$ С, $\varphi=100\%$ и $p=9$ *кГ/см²*— состояние *5*.

Для уменьшения относительной влажности воздух дросселируется до 5 *кГ/см²* (состояние *6*). При этом на *id*-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

$$\varphi_{\text{в}}=\frac{p}{p_{\varphi=100\%}}=\frac{5}{9}=0{,}56,\ \text{т. е. } \varphi=56\%.$$

Из диаграммы (рис. 10-3) видно, что если выходящий из компрессорной станции 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 будет удалено* воды $\Delta d_1=$ $=22-16{,}2=5{,}8$ *г*, а после второго холодильника будет отсепарировано $\Delta d_2=16{,}2-6{,}8=9{,}4$ *г* на каждый килограмм сухого воздуха.

10-17. Параметры воздуха перед сжатием его в компрессоре таковы: $p_1=1$ *кГ/см²*, $t_1=25°$ С, $d=14$ *г/кг* с. в. Воздух сжимается до 5 *кГ/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 $p=2$ *кГ/см²*. Необходимо определить относительную влажность воздуха после дросселя, а также температуру, *при которой начнет* выпадать вода из этого воздуха

Решение

Процесс сжатия воздуха (рис 10 3) изобразится вертикальной линией *7—8*, процесс охлаждения — линией *8—9*, выпадение влаги начнется в точке *9*, где при давлении 5 *кГ/см²* будет достигнута относительная влажность $\varphi=100\%$. Дальнейшее охлаждение пойдет 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 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 равна 35° С. Изотерма области тумана (она же изотерма мокрого термометра) при давлении $p=5$ *кГ/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 $p=5$ *кГ/см²*. Точка *L* отвечает, очевидно, искомому состоянию воздуха. Дросселирование воздуха не изменит положения точки *L* на *id*-диаграмме, однако после дросселирования до давления 2 *кГ/см²* воздух станет ненасыщенным, так как точка *L* окажется выше линии $\varphi=100\%$ для 2 *кГ/см²*. В данном случае при дросселировании влажного воздуха, в котором вода на-

ходится в виде тумана, температура воздуха понижается. Так, в состоянии L при $p=2$ $кГ/см^2$ температура воздуха равна 28° С (см. рис. 10.3). Относительная влажность в этом состоянии рассчитывается, как и в предыдущих задачах

$$\varphi_p = \frac{p}{p_{\varphi=100\%}} = \frac{2}{2{,}4} = 0{,}83.$$

Принято, что через точку L проходит линия $\varphi=100\%$ для давления $p=2{,}4$ $кГ/см^2$. Как видно из диаграммы, воздух в состоянии L, охлаждающийся в трубах при 2 $кГ/см^2$, будет выделять влагу при $t=25°$ С.

11. ТЕРМОДИНАМИКА ГАЗОВЫХ ПОТОКОВ

11-1. Через суживающееся сопло вытекает кислород, находящийся в резервуаре, давление и температура в котором постоянны и равны $p_1=60$ $кГ/см^2$ и $t_1=100°$ С. Давление в той среде, куда вытекает газ, равно $p_{ср}=36$ $кГ/см^2$.

Определить скорость истечения и расход кислорода, если площадь выходного сечения $f_2=20$ $мм^2$. Расчет произвести, используя а) техническую систему и б) международную систему единиц СИ. Газ подчиняется уравнению $pv=RT$, теплоемкость не зависит от температуры[1]. Входной скоростью пренебречь. Процесс изменения состояния текущего газа — изоэнтропический.

Решение

а) Прежде всего необходимо узнать, каков режим истечения газа, будет ли в выходном сечении дозвуковая или звуковая скорость.

Для этого сравниваем отношение давлений $\beta=p_{ср}/p_1$ с критическим отношением давлений $\beta_{кр}=p_{кр}/p_1=\left[\frac{2}{k+1}\right]^{k/(k-1)}$. Для кислорода $k=1{,}40$ и $\beta_{кр}=0{,}528$. Следовательно, имеем.

$$\frac{p_{ср}}{p_1} = \frac{36}{60} > \beta_{кр} = 0{,}528.$$

Таким образом, мы выяснили, что на выходе из сопла скорость оказывается дозвуковой, и давление p_2 в выходном сечении равно давлению среды $p_{ср}$.

Определяем скорость истечения.

$$c_2 = \sqrt{2g\frac{k}{k-1}RT_1\left[1-\left(\frac{p_2}{p_1}\right)^{\frac{k-1}{k}}\right]} =$$

$$= \sqrt{2 \cdot 9{,}81 \frac{1{,}4}{1{,}4-1} \cdot \frac{848}{32} 373 \left[1-\left(\frac{36}{60}\right)^{\frac{1{,}4-1}{1{,}4}}\right]} = 304\ м/сек.$$

[1] Эти два условия приняты во всех задачах этого раздела, кроме задач, в которых рассматривается течение водяного пара.

Секундный весовой расход газа.

$$G = f\sqrt{2g\frac{k}{k-1}\frac{p_1}{v_1}\left[\left(\frac{p_2}{p_1}\right)^{\frac{2}{k}} - \left(\frac{p_2}{p_1}\right)^{\frac{k+1}{k}}\right]} =$$

$$= 20\cdot10^{-6}\sqrt{2\cdot9{,}81\frac{1{,}4}{1{,}4-1}\cdot\frac{60\cdot10^4}{0{,}01647}\left[\left(\frac{36}{60}\right)^{\frac{2}{1.4}} - \left(\frac{36}{60}\right)^{\frac{1.4+1}{1.4}}\right]} =$$

$$= 0{,}256\ кГ/сек$$

Здесь

$$v_1 = \frac{RT_1}{p_1} = \frac{848\cdot373}{32\cdot60\cdot10^4} = 0{,}01647\ м^3/кГ$$

б) При пользовании системой СИ формула для подсчета скорости истечения принимает вид

$$c_2 = \sqrt{2\frac{k}{k-1}RT_1\left[1 - \left(\frac{p_2}{p_1}\right)^{\frac{k-1}{k}}\right]},\ м/сек,$$

где $R = 8\,314/32$ *дж/кг·град*

Следовательно,

$$c_2 = \sqrt{2\cdot\frac{1{,}4}{1{,}4-1}\cdot\frac{8\,314}{32}\ 373\left[1 - \left(\frac{36}{60}\right)^{0{,}2857}\right]} = 304\ м/сек.$$

Расчет массового расхода сделаем иным способом. Определим удельный объем в выходном сечении

$$v_2 = v_1\left(\frac{p_1}{p_2}\right)^{\frac{1}{k}} = 0{,}01647\left(\frac{60}{36}\right)^{\frac{1}{1.4}} = 0{,}02375\ м^3/кг.$$

Массовый расход находим по формуле неразрывности:

$$m = \frac{f_2c_2}{v_2} = \frac{20\cdot10^{-6}\cdot304}{0{,}02375} = 0{,}256\ кг/сек$$

11-2. Двухатомный газ, для которого $R = 294{,}3$ *дж/кг·град*, имея на входе в суживающееся сопло параметры $p_1 = 63{,}7\cdot10^5\ н/м^2$ и $T_1 = 300°$ К, вытекает через сопло в среду с давлением $p_{ср} = 35{,}4\cdot10^5\ н/м^2$

Определить скорость истечения и секундный расход газа, если диаметр отверстия равен 5 *мм*. Истечение считать адиабатическим, потерей на трение и входной скоростью пренебречь.

Ответ: $c_2=310$ *м/сек*; $m=0{,}257$ *кг/сек*.

11-3. Как изменяется скорость и секундный расход газа (задача 11-2), если он вытекает в среду с давлением $p_{ср}=0{,}981\cdot10^5$ *н/м*²?

Решение

В этом случае $\beta=\dfrac{0{,}981}{63{,}7}<\beta_{кр}=0{,}528$, поэтому на выходе из сопла установится критическое давление $p_{кр}=\beta_{кр}p_1$, скорость истечения будет звуковой, а расход максимальным.

Скорость

$$c_2=\sqrt{2\frac{k}{k+1}RT_1}=\nu\sqrt{RT_1},\ м/сек.$$

Расход

$$m=f_2\sqrt{2\frac{k}{k+1}\left(\frac{2}{k+1}\right)^{\frac{2}{k-1}}\frac{p_1}{v_1}}=f_2\psi\sqrt{\frac{p_1}{v_1}},\ кг/сек.$$

Вычислим значения постоянных коэффициентов ν и ψ для идеальных газов различной атомности и результаты вычислений сведем в таблицу:

Газ	k	ν	ψ
Одноатомный	1,67	1,118	0,726
Двухатомный	1,40	1,080	0,685
Трех- и многоатомный	1,33	1,068	0,674

Находим величину расхода:

$$m=5^2\cdot10^{-6}\cdot0{,}785\cdot0{,}685\sqrt{\frac{63{,}7\cdot10^5}{0{,}01386}}=0{,}288\ кг/сек.$$

Значение скорости истечения

$$c_2=1{,}080\sqrt{294{,}3\cdot300}=321\ м/сек.$$

Проверяем, действительно ли эта скорость является звуковой. Скорость звука в выходном сечении равна:

$$a_2=\sqrt{kRT_2},$$

где $T_2=T_1\beta_{кр}^{(k-1)/k}=300\cdot0{,}528^{0{,}286}=250$ °К.

Следовательно,

$$a_2=\sqrt{1{,}40\cdot294{,}3\cdot250}=321\ м/сек.$$

11-4. Определить размеры характерных сечений сопла Лаваля, если давление воздуха на входе в сопло $p_1=6{,}87\cdot10^5$ *н/м*², температура на входе в сопло $t_1=27°$ С. Наружное давление $p_{ср}=0{,}981\cdot10^5$ *н/м*². Расход воздуха $m=7\,200$ *кг/ч*. Как изменяется скорость и расход, если температура воздуха на входе в сопло станет равной 177° С? Как нужно изменить сопло, чтобы расход остался прежним?

Ответ: $f_{мин}=1\,250$ *мм*²; $f_2=2\,300$ *мм*²; $c_2=497$ *м/сек*.

При $t_1=177°$C расход будет равен 5 904 *кг/ч*. Чтобы сохранить его прежним, следует минимальное сечение увеличить до $f'_{мин}=1\,525$ *мм*².

11-5. Воздух с начальной скоростью $c_1=250$ *м/сек* при давлении $p_1=10$ *кГ/см*² и температуре $t_1=350°$C вытекает через суживающийся насадок в среду с давлением $p_{ср}=2{,}5$ *кГ/см*². Площадь выходного сечения $f_2=1\,500$ *мм*².

Определить расход воздуха и скорость истечения.

Решение

Учесть начальную скорость потока можно, воспользовавшись параметрами торможения, считая, что скорость потока c_1 возникает в результате расширения газа от некоторых параметров p_0, v_0, соответствующих параметрам торможения (при $c_0=0$) до начальных параметров p_1 и v_1. При этом формулы для подсчета критической скорости и секундного расхода (режим по условию задачи звуковой) сохраняют свой обычный вид.

$$c_{кр}=c_2=\nu\sqrt{p_0v_0},\ м/сек;$$

$$m_{макс}=m=f_2'\sqrt{\frac{p_0}{v_0}},\ кг/сек.$$

Параметры p_0 и v_0 определяются следующим образом. Из уравнения энергии потока при адиабатическом течении

$$i_0+\frac{c_0^2}{2}=i_1+\frac{c_1^2}{2}$$

следует при $c_0=0$ (учитывая, что для идеального газа $i=c_pT$, где теплоемкость c_p есть постоянная величина, равная согласно уравнению Майера $c_p=kR/k-1$):

$$T_0=T_1+\frac{c_1^2}{2c_p}=T_1+\frac{c_1^2}{2}\cdot\frac{k-1}{kR},$$

откуда

$$\frac{T_0}{T_1}=1+\frac{c_1^2}{2}\cdot\frac{k-1}{kRT_1}.$$

Так как в случае обратимого адиабатического процесса $T_0/T_1=(p_0/p_1)^{(k-1)/k}$, то

$$\frac{p_0}{p_1}=\left(1+\frac{k-1}{2}\cdot\frac{c_1^2}{kRT_1}\right)^{\frac{k}{k-1}}$$

Отношение удельных объемов

$$\frac{v_1}{v_0}=\left(\frac{p_0}{p_1}\right)^{\frac{1}{k}}=\left(1+\frac{k-1}{2}\cdot\frac{c_1^2}{kRT_1}\right)^{\frac{1}{k-1}}.$$

Из двух последних соотношений находим p_0 и v_0, учитывая, что $v_1 = RT_1/p_1$:

$$p_0 = 10 \cdot 0{,}980665 \cdot 10^5 \left(1 + \frac{1{,}4-1}{2} \frac{250^2 \cdot 28{,}96}{1{,}4 \cdot 8\,314 \cdot 623}\right)^{\frac{1{,}4}{1{,}4-1}} =$$

$$= 11{,}63 \cdot 10^5 \ н/м^2;$$

$$v_0 = \frac{8\,314 \cdot 623}{28{,}96 \cdot 10 \cdot 0{,}980665 \cdot 10^5} \frac{1}{\left(1 + \frac{1{,}4-1}{2} \frac{250^2 \cdot 28{,}96}{1{,}4 \cdot 8\,314 \cdot 623}\right)^{\frac{1}{1{,}4-1}}} =$$

$$= 0{,}1615 \ м^3/кг.$$

Теперь можно найти c_2 и m, взяв значения ν и ψ из таблицы, приведенной в решении задачи 11-3.

$$c_2 = 1{,}080 \sqrt{11{,}63 \cdot 10^5 \cdot 0{,}1615} = 468 \ м/сек;$$

$$m = 1\,500 \cdot 10^{-6} \cdot 0{,}685 \sqrt{\frac{11{,}63 \cdot 10^5}{0{,}1615}} = 2{,}76 \ кг/сек.$$

11-6. Найти диаметр выходного сечения суживающегося сопла, через которое протекает азот в количестве $m = 3{,}5$ *кг/сек*. Параметры на входе $p_1 = 10^6$ *н/м²* и $t_1 = 217°$ С. Давление среды $p_{ср} = 10^5$ *н/м²*. Определить скорость истечения, пренебрегая входной скоростью и потерями на трение.

Ответ: $d = 50$ *мм*; $c_2 = 412$ *м/сек*.

11-7. Рассчитать сопло Лаваля и найти скорость истечения воздуха из него. Расход воздуха $m = 2{,}9$ *кг/сек*, давление и температура газа на входе $p_1 = 8$ *кГ/см²* и $t_1 = 427°$ С. Давление среды $p_{ср} = 1$ *кГ/см²*. Сечения сопла круглые, угол раствора конусообразной расширяющейся части $\gamma = 12°$. Входной скоростью и потерями на трение пренебречь.

Ответ: $d_{мин} = 48$ *мм*, $d_2 = 63$ *мм*; длина расширяющейся части 70 *мм*. Скорость $c_2 = 600$ *м/сек*.

11-8. Определить скорость воздуха во всасывающем клапане двигателя внутреннего сгорания, если разрежение в цилиндре 0,05 *кГ/см²*, внешнее давление $p_1 = 1{,}02$ *кГ/см²* и температура $t_1 = 25°$ С. Скоростной коэффициент $\varphi = 0{,}95$.

Ответ: $c = 93{,}5$ *м/сек*.

11-9. Рассчитать сопло Лаваля и найти скорость истечения из него кислорода O_2. Расход его $m = 3{,}0$ *кг/сек* Постоянное давление на входе $p_1 = 12 \cdot 10^5$ *н/м²*, температура $t_1 = 227°$ С. Давление среды $p_{ср} = 0{,}95 \cdot 10^5$ *н/м²*. Коэффициент скорости $\varphi = 0{,}95$ считается одним и тем же для всех сечений. Входная скорость не учитывается. Угол раствора $\gamma = 10°$.

Решение

Сначала найдем действительную скорость истечения $c_{2д}$ и рассчитаем выходное сечение. Теоретическая (без потерь на трение) скорость равна:

$$c_2 = \sqrt{2\frac{k}{k-1}RT_1\left[1-\left(\frac{p_2}{p_1}\right)^{\frac{k-1}{k}}\right]} =$$

$$= \sqrt{2\frac{1,4}{1,4-1}\frac{8\,314}{32}\cdot 500\left[1-\left(\frac{0,95}{12}\right)^{\frac{1,4-1}{1,4}}\right]} = 684\ м/сек.$$

Действительная скорость истечения

$$c_{2д} = \varphi c_2 = 0,95 \cdot 684 = 650\ м/сек.$$

Для того чтобы рассчитать площадь выходного сечения сопла, необходимо знать удельный объем в точке $2д$, который может быть найден из уравнения состояния $v_{2д} = RT_{2д}/p_2$. Неизвестную температуру $T_{2д}$ можно найти, руководствуясь следующими соображениями. Мы имеем право записать уравнение сохранения энергии для адиабатического потока в таком виде:

$$i_2 + \frac{c_2^2}{2} = i_{2д} + \frac{c_{2д}^2}{2},$$

так как и левая и правая части этого уравнения порознь равны энтальпии полного торможения i_0. Это уравнение можно переписать:

$$c_p T_2 + \frac{c_2^2}{2} = c_p T_{2д} + \frac{\varphi^2 c_2^2}{2}.$$

Отсюда находим:

$$T_{2д} = T_2 + \frac{(1-\varphi^2)\,c_2^2}{2c_p} = T_2 + \frac{k-1}{k}\cdot\frac{\zeta c_2^2}{2R}.$$

Здесь $\zeta = 1-\varphi^2$, а $c_p = \frac{k}{k-1}R$. Температура T_2 в конце изоэнтропического расширения подсчитывается обычным путем:

$$T_2 = T_1\,(p_2/p_1)^{(k-1)/k}.$$

Таким образом,

$$T_{2к} = 500\left(\frac{0,95}{12}\right)^{0,2857} + \frac{1,4-1}{1,4}\frac{(1-0,95^2)\cdot 684^2\cdot 32}{2\cdot 8\,314} =$$

$$= 252 + 25 = 277\ °\text{K}.$$

Удельный объем

$$v_{2д} = \frac{RT_{2д}}{p_2} = \frac{8\,314\cdot 277}{32\cdot 0,95\cdot 10^5} = 0,758\ м^3/кг.$$

Выходное сечение

$$f_2 = \frac{mv_{2д}}{c_{2д}} = \frac{3,0 \cdot 0,758}{650} = 0,00350 \ м^2.$$

Диаметр выходного сечения

$$d_2 = \sqrt{\frac{4f_2}{\pi_1}} = \sqrt{\frac{0,00350}{0,785}} = 0,0668 \ м \approx 67 \ мм.$$

Теперь необходимо рассчитать минимальное сечение сопла. Как известно, в минимальном сечении скорость вследствие потерь на трение не достигает скорости звука.

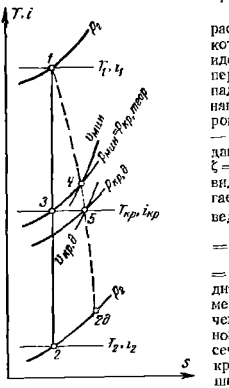


Рис. 11-1. К задаче 11-9.

Рассмотрим Ts-диаграмму процесса расширения газа в сопле (рис. 11-1), в которой для нашего случая течения идеального газа с не зависящей от температуры теплоемкостью изотермы совпадают с изоэнтальпами. На диаграмме нанесена изоэнтропа $1-3-2$ и пунктиром — необратимая аднабата $1-4-5-2д$, построенная на основании заданного коэффициента потери энергии $\zeta = 1 - \varphi^2$. Рассматривая диаграмму, мы видим, что звуковая скорость достигается в точке 5, для которой справедливо соотношение $a_* = \sqrt{kRT_{кр}} = \sqrt{2\frac{k}{k+1}RT_1} = \sqrt{2(i_1 - i_5)} = \sqrt{2(i_1 - i_{5д})}$. Через эту точку проходит изобара $p_{кр.д}$, соответствующая меньшему давлению, чем $p_{кр\ теор}$, т.е. чем критическое давление для идеального процесса ($p_{кр.теор} = \beta_{кр} p_1$). Пересечение изобары $p_{кр.д}$ с пунктирной кривой действительного процесса расширения дает точку 4, соответствующую состоянию газа в минимальном сечении сопла. Другими словами, пройдя минимальное сечение, в котором звуковая скорость еще не достигается, газ продолжает расширяться и на некотором небольшом расстоянии от пережима сопла при давлении $p_{кр.д}$ получает скорость, равную местной скорости звука (точка 5).

На основании сказанного выше скорость в минимальном сечении (состояние 4) равна:

$$c_{мин} = \varphi_v \sqrt{RT_1} = 0,95 \cdot 1,080 \sqrt{\frac{8\,314}{32} \cdot 500} = 370 \ м/сек.$$

Здесь $\nu = 1,080$ (см. задачу 11-3).

Удельный объем $v_{мин}$ в точке 4 находится по формуле $v_{мин} = RT_{мин}/p_{мин}$, в которой

$$p_{мин} = p_{кр.теор} = \beta_{кр} p_1 = 0,528 \cdot 12 \cdot 10^5 \ н/м^2,$$

а температура $T_{мин}$ находится аналогично тому, как находилась $T_{кр}$:

$$T_{мин} = T_{кр} + \frac{k-1}{k}\frac{\zeta a_*^2}{2R} = T_{кр} + \frac{k-1}{k}\cdot\frac{\zeta k R T_{кр}}{2R} =$$

$$= T_1\beta_{кр}^{\frac{k-1}{k}} + \frac{k-1}{2}\zeta T_1\beta^{\frac{k-1}{k}} = T_1\beta^{\frac{k-1}{k}}\left(1 + \frac{k-1}{2}\zeta\right).$$

Подсчитываем $T_{мин}$:

$$T_{мин} = 500 \cdot 0{,}528^{0{,}2857}\left[1 + \frac{1{,}4-1}{2}(1 - 0{,}95^2)\right] = 425\ °K.$$

Удельный объем

$$v_{мин} = \frac{RT_{мин}}{p_{мин}} = \frac{8\,314 \cdot 425}{32 \cdot 0{,}528 \cdot 12 \cdot 10^5} = 0{,}1743\ м^3/кг.$$

Площадь минимального сечения

$$f_{мин} = \frac{mv_{мин}}{c_{мин}} = \frac{3{,}0 \cdot 0{,}1743}{370} = 0{,}001413\ м^2.$$

Диаметр

$$d_{мин} = \sqrt{\frac{0{,}001413}{0{,}785}} = 0{,}0424\ м \approx 42\ мм.$$

Наконец, рассчитываем длину расширяющейся части:

$$l = \frac{d_2 - d_{мин}}{2\,\mathrm{tg}\,\gamma/2} = \frac{67 - 42}{2 \cdot 0{,}0878} = 142\ мм.$$

11-10. Рассчитать суживающееся сопло. Рабочее тело — азот N_2, секундный расход его $m = 4{,}2$ *кг/сек*. Постоянное давление на входе в сопло $p_1 = 31 \cdot 10^5$ *н/м²* и температура $t_1 = 627°$ С. Наружное давление $p_{нр} = 0{,}95 \cdot 10^5$ *н/м²*. Коэффициент скорости $\varphi = 0{,}96$.

Найти изменение энтропии азота в процессе необратимого адиабатического расширения, отнесенное к 1 *кг* текущего газа.

Ответ: $c_2 = 496$ *м/сек*; $d_2 = 39$ *мм*;
$\Delta s = 16{,}5$ *дж/кг·°К*.

11-11. На рис. 11-2 изображен прибор для бескомпрессорного сжатия. Найти теоретическое давление p_2, до которого будет сжат

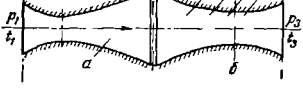


Рис. 11-2. К задаче 11-11.
а — адиабатическое сверхзвуковое сопло, *б* — сверхзвуковой диффузор с отводом тепла

воздух, выходящий из диффузора, если параметры перед соплом равны $p_1=10$ *кГ/см²* и $t_1=250°$ С. Расширяющаяся часть рассчитана так, что в сечении 2 устанавливается давление 1 *кГ/см²*. Процесс сжатия происходит в диффузоре, причем его можно считать обратимым политропическим с показателем политропы $n=1{,}2$. Процесс расширения изоэнтропический.

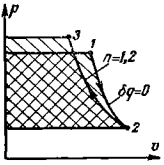


Рис 11-3 К задаче 11-11

Указание. Процессы расширения и сжатия можно представить в *pv* диаграмме (рп 11-3). Вследствие равенства работ площади, ограниченные кривыми процессов, равновелики. Поэтому достаточно аналитически выразить абсолютные значения работ расширения и сжатия, приравнять их друг другу и, пользуясь полученным уравнением, вычислить p_3.

Ответ: $p_3=13{,}7$ *кГ/см²*.

11-12. Скорость распространения звука в любой непрерывной среде (твердой, жидкой или газообразной) определяется выражением, справедливым при применении системы СИ

$$a=\sqrt{-v^2\left(\frac{\partial p}{\partial v}\right)_s},$$

Считая атмосферный воздух смесью двухатомных идеальных газов, определить скорость распространения звука в нем при давлении $p=760$ *мм рт ст* и температуре $t=20°$ С.

Ответ: $a=343{,}4$ *м/сек*.

11-13. Подсчитать мощность, необходимую на создание в аэродинамической трубе диаметром 12 *см* скорости потока, равной скорости звука при 10° С и 0,7 *кГ/см²*, считая к п д винтомоторного агрегата равным 45%.

Ответ: $N=364$ *квт*.

11-14. Определить, насколько температура на поверхности ракеты, движущейся со скоростью 1 000 *м/сек*, выше температуры окружающей среды по причине торможения воздуха. Воздух считать *идеальным газом*, теплоемкость принять постоянной.

Ответ: $\Delta t=500°$ С.

11-15. Воздух на входе в суживающееся сопло с минимальным сечением $f_{мин}=10$ *мм²* имеет параметры $p_1=10$ *кГ/см²*, $t=300°$ С. Отношение давлений $p_{ср}/p_1<\beta_{кр}$. Как изменится расход, если к суживающемуся соплу присоединить расширяющийся насадок и получить, таким образом, сопло Лаваля? Каковым должно быть давление на выходе из этого сопла Лаваля, если оно работает в расчетном режиме и если отношение площадей выходного и минимального сечений $f_2/f_{мин}=1{,}5$? Какова скорость истечения из этого сопла? Потерями на трение и величиной входной скорости c_1 пренебречь.

Указание. При истечении из суживающегося сопла на выходе будет звуковая скорость $c_{кр}$, так как $p_{ср}/p_1<\beta_{кр}$. Эта же скорость сохранится и в минимальном сечении сопла Лаваля, а следовательно, расход через него останется таким же, каков расход че-

рез суживающееся сопло. Для определения p_2 на выходе из сопла Лаваля необходимо написать уравнение для подсчета расхода

$$m = m_{\text{макс}} = f_2 \sqrt{2\frac{k}{k-1}\frac{p_1}{v_1}\left[\left(\frac{p_2}{p_1}\right)^{\frac{2}{k}} - \left(\frac{p_2}{p_1}\right)^{\frac{k+1}{k}}\right]}$$

и определить, пользуясь им, величину p_2/p_1 (для решения рекомендуется графический метод)

Ответ: $p_2 = 1{,}58 \cdot 10^5$ *н/м²*, $c_2 = 684$ *м/сек*; $m = 0{,}01657$ *кг/сек*

11-16. Сопло Лаваля с минимальным сечением $f_{\text{мин}} = 10$ *мм²* и $f_2 = 1{,}5\, f_{\text{мин}}$ работает при следующих условиях: рабочее тело — воздух, $p_1 = 10^6$ *н/м²*, $t_1 = 300^\circ$ С, $p_{\text{ср}} = 7 \cdot 10^5$ *н/м²*.

Определить секундный расход, пренебрегая потерями на трение и величиной входной скорости c_1.

Решение

Сопло работает в неблагоприятных для него условиях нерасчетного режима, который характеризуется условием $p_2 < p_{\text{ср}}$. Под p_2 понимается давление на выходе из сопла при расчетном режиме.

В этом случае при некотором давлении среды p'_2 на выходе из сопла (если оно имеет небольшой угол раствора) возникает прямой скачок уплотнения. Если давление среды увеличивается, скачок передвигается в глубь сопла (см. рис. 11-4, линии $N_2L_2M_2$, $N_1L_1M_1$). После скачка давление оказывается меньшим $p_{\text{ср}}$ и поэтому при дальнейшем течении газа давление продолжает возрастать, принимая на выходе величину, равную давлению среды. Скорость после скачка становится дозвуковой и далее начинает убывать. Таким образом, на участках L_2M_2, L_1M_1 и т. д. расширяющаяся часть сопла работает как диффузор.

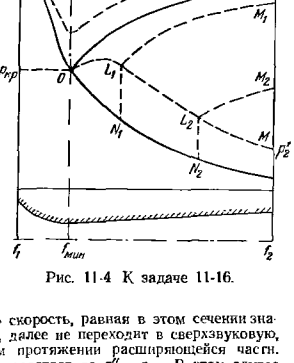


Рис. 11-4. К задаче 11-16.

При некотором давлении среды $p_{\text{ср}} = p''_2$ скачок уплотнения входит в минимальное сечение и там исчезает. При этом в минимальном сечении оказывается 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 $p''_2 = p_{\text{ср}}$. 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.

Для того чтобы решить поставленную задачу, необходимо определить величину давления p''_2, после чего можно будет судить, будет ли при заданных условиях расход максимальным или меньшим, чем $m_{\text{макс}}$. Для этого нужно приравнять величину максимального расхода к величине расхода в выходном сечении (на основании уравнения неразрывности), т. е. написать:

$$f_{\text{мин}}\sqrt{2\frac{k}{k+1}\frac{p_1}{v_1}\left(\frac{2}{k+1}\right)^{\frac{2}{k-1}}} =$$

$$= f_2\sqrt{2\frac{k}{k-1}\frac{p_1}{v_1}\left[\left(\frac{p''_2}{p_1}\right)^{\frac{2}{k}} - \left(\frac{p''_2}{p_1}\right)^{\frac{k+1}{k}}\right]}.$$

Из этого соотношения можно определить $p''_2/p_1 = \beta$. Возводя левую и правую части в квадрат и сокращая на $2p_1/v_1$, получаем:

$$\frac{k-1}{k+1}\left(\frac{2}{k+1}\right)^{\frac{2}{k-1}} = \left(\frac{f_2}{f_{\text{мин}}}\right)^2\left(\beta^{\frac{2}{k}} - \beta^{\frac{k+1}{k}}\right) =$$

$$= \left(\frac{f_2}{f_{\text{мин}}}\right)^2 \beta^{\frac{2}{k}}\left(1 - \beta^{\frac{k-1}{k}}\right).$$

В этом уравнении $k = 1{,}4$ и $f_2/f_{\text{мин}} = 1{,}5$. Уравнение решается подбором или графически. В результате решения получаем:

$$\beta = \frac{p''_2}{p_1} = 0{,}8806.$$

Таким образом, $p''_2 = 0{,}8806$, $p_1 = 8{,}806 \cdot 10^5$ *н/м*². Так как по условию $p_{\text{ср}} = 7 \cdot 10^5$ *н/м*², заключаем, что в минимальном сечении оказываются звуковая скорость, максимальный расход и $p_{\text{мин}} = p_{\text{кр}}$. На некотором расстоянии от минимального сечения происходит прямой скачок уплотнения, переводящий режим течения из сверхзвукового в дозвуковой [1].

Изменение давления вдоль сопла качественно может быть описано, например, кривой $AON_1L_1M_1$.

---

[1] Место возникновения скачка, его величину и положение точки M (т. е. кривую OL_1L_2M) мы не определяем. Этими вопросами занимается газовая динамика (см., например, [Л. 11]).

Расход через сопло равен:

$$m = m_{макс} = f_{мин}\psi\sqrt{\frac{p_1}{v_1}} = 10^{-6}\cdot 0{,}685\sqrt{\frac{10^8}{0{,}1644}} = 0{,}01689 \text{ кг/сек}.$$

Здесь $v_1 = RT_1/p_1 = 8\,314\cdot 573/28{,}96\cdot 10^6 = 0{,}1644$ м³/кг.

11-17. Начальные параметры водяного пара, поступающего к соплам турбины, следующие: $p_1 = 44{,}15\cdot 10^5$ н/м², $t_1 = 350°$ С, давление за соплами $p_2 = 24{,}52\cdot 10^5$ н/м². Расход пара составляет 0,5 кг/сек на одно сопло.

Определить площадь выходного сечения сопла. Представить процесс расширения в *is*-диаграмме.

Ответ: $f_2 = 98$ мм².

11-18. Паровая турбина имеет два сопла с выходными сечениями $f = 4$ см² каждое. К соплам подводится пар при давлении $p_1 = 98{,}1\cdot 10^5$ н/м² и температуре $t_1 = 600°$ С.

В результате адиабатического расширения давление падает до $p_2 = 58{,}86\cdot 10^5$ н/м².

Определить секундный расход пара и теоретическую мощность, которую можно получить от турбины, пренебрегая трением струи в канале сопла и начальной скоростью.

Ответ: $m = 2{,}232$ кг/сек [на одно сопло];
$N = 695$ квт.

11-19. По трубе течет водяной пар, параметры которого таковы: $p_1 = 15$ кГ/см²; $x_1 = 0{,}98$; $c_1 = 300$ м/сек.

Найти параметры полного адиабатического торможения потока пара.

Указание. Отложить в *is*-диаграмме от точки *1* вверх по изоэнтропе величину $\Delta i = c_1^2/2 = 4186{,}8$ ккал/кг. Полученная точка соответствует параметрам торможения (рис. 11-5).



Рис. 11-5. К задаче 11-19.

Ответ: $p_0 = 19{,}0$ кГ/см² = $18{,}6\cdot 10^5$ н/м²; $t_0 = 208{,}8°$ С; $i_0 = 668{,}1$ ккал/кг = 2 797 кдж/кг.

11-20. Водяной пар, имея начальную скорость $c_1 = 200$ м/сек при давлении $p_1 = 20$ кГ/см² и температуре $t_1 = 400°$ С, вытекает через суживающееся сопло в среду с давлением $p_2 = 6$ кГ/см².

Определить расход и выходную скорость пара. Площадь выходного сечения принять равной 1 000 мм². Потерями на трение пренебречь.

Ответ: $c_2 = 595$ м/сек; $m = 2{,}4$ кг/сек.

11-21. По трубе течет водяной пар с начальной скоростью $c_1 = 300$ м/сек при параметрах $p = 14{,}9\cdot 10^5$ н/м² $t = 300°$ С.

Определить, насколько действительная температура пара отличается от температуры, фиксируемой термометром, имея в виду, что термометр показывает температуру торможения.

Ответ: $\Delta t = 20$ град.

11-22. Рассчитать основные размеры сопла Лаваля, если водяной пар с начальным давлением $p_1 = 20$ кГ/см² и температурой $t_1 = 350°$ С адиабатически расширяется до давления $p_2 = 0{,}981\cdot 10^5$ н/м². Расход пара составляет $m = 0{,}5$ т/ч.

Ответ: $f_{мин} = 55{,}9$ мм²; $f_2 = 202$ мм²; $l = 43$ мм.

11-23. Водяной пар расширяется в сопле Лаваля от 35 *кГ/см²* и 450° С до $p_2=0{,}5$ *кГ/см²*.

Определить скорость истечения и размеры сопла, если коэффициент потери энергии $\zeta=0{,}12$, а расход $m=0{,}5$ *кГ/сек*.

Решение

Определим критическое давление, приняв значение $\beta_{кр}=0{,}546$:

$$p_{кр}=\beta_{кр}p_1=0{,}546\cdot 35=19{,}11 \text{ кГ/см}^2.$$

Считая, что процесс расширения подчиняется уравнению $pv^k=\text{const}$, подсчитываем k, находя удельные объемы v_1 и $v_{кр}$ по *is*-диаграмме:

$$k=\frac{\lg p_1/p_{кр}}{\lg v_{кр}/v_1}=\frac{\lg 35{,}0/19{,}11}{\lg 0{,}15/0{,}094}=1{,}297.$$

Уточним по найденному коэффициенту k величину $\beta_{кр}$:

$$\beta_{кр}=\left(\frac{2}{k+1}\right)^{\frac{k}{k-1}}=\left(\frac{2}{2{,}297}\right)^{4{,}37}=0{,}544.$$

Поскольку уточненное значение критического давления, равное $0{,}544\cdot 35=19{,}04$ *кГ/см²*, очень мало отличается от принятого[1], оставляем значение критического давления $p_{кр}=19{,}11$ *кГ/см²*.

Предполагая коэффициент скорости φ постоянным вдоль сопла, определим его значение:

$$\varphi=\sqrt{1-\zeta}=\sqrt{1-0{,}12}=0{,}938.$$

При истечении с трением критическая скорость потока достигается не в минимальном сечении сопла, а в начальной части расширяющегося насадка. Заданный расход пара ограничивается минимальным сечением, давление в этом сечении считаем с весьма малой погрешностью равным давлению в минимальном сечении при истечении без трения (см. задачу 11-9), т. е. $p_{мин}=p_{кр}$.

Действительную скорость пара в рассматриваемом сечении определим из уравнения

$$c_{мин,д}=91{,}53\varphi\sqrt{i_1-i_{кр}}=91{,}53\cdot 0{,}938\cdot\sqrt{797-753}=569 \text{ м/сек}.$$

Площадь минимального сечения $f_{мин}=mv_{мин}/c_{мин,д}$, где $c_{мин,д}$ — действительная скорость, а $v_{мин}$ — удельный объем пара в минимальном сечении. Для того чтобы найти его значение, следует в *is*-диаграмме отложить точки, соответствующие действительному (с учетом трения) состоянию пара. Найдем энтальпии в минимальном и выходном сечениях:

$$i_{мин}=i_{кр}+\zeta(i_1-i_{кр})=753+0{,}12\,(797-753)=758 \text{ ккал/кг};$$

$$i_{2д}=i_2+\zeta(i_1-i_2)=582+0{,}12\,(797-582)=608 \text{ ккал/кг}.$$

[1] В противном случае задачу следует решать методом последовательного приближения.

Отложив на изобарах $p=p_{кр}$ и p_2 полученные энтальпии, зафиксируем искомые точки и найдем, что $v_{мин}=0{,}153$ $м^3/кг$; $v_{2д}=3{,}2$ $м^3/кг$.

Площадь минимального сечения

$$f_{мин}=\frac{0{,}5\cdot 0{,}153}{569}=0{,}000134\ м^2.$$

Выходная скорость

$$c_{2д}=91{,}53\varphi\sqrt{i_1-i_2}=91{,}53\sqrt{i_1-i_{2д}}=91{,}53\sqrt{797-608}=$$
$$=1\,260\ м/сек.$$

Площадь выходного сечения

$$f_2=\frac{0{,}5\cdot 3{,}2}{1\,260}=0{,}001270\ м^2.$$

Если расширяющийся насадок имеет форму прямого конуса, то

$$d_{мин}=\sqrt{\frac{f_{мин}}{0{,}785}}=\sqrt{\frac{134}{0{,}785}}=13{,}1\ мм;$$

$$d_2=\sqrt{\frac{f_2}{0{,}785}}=\sqrt{\frac{1\,270}{0{,}785}}=40{,}2\ мм,$$

считая угол конусности $\gamma=12°$, находим длину расширяющейся части сопла:

$$l=\frac{d_2-d_{мин}}{2\operatorname{tg}\gamma/2}=\frac{40{,}2-13{,}1}{2\cdot 0{,}105}=129\ мм.$$

11-24. Определить скорость струи пара на выходе из сопла Лаваля и потерю кинетической энергии вследствие трения, если состояние пара на входе в сопло определяется давлением $p_1=58{,}89\cdot 10^5$ $н/м^2$ и температурой $t_1=450°$ С. Давление на выходе из сопла $p_2=11{,}77\cdot 10^5$ $н/м^2$. Скоростной коэффициент сопла $\varphi=0{,}95$. Входную скорость не учитывать. Представить процесс расширения в *is*-диаграмме.

Ответ: $c_{2д}=830$ $м/сек$; $h_{тр}=9{,}1$ $ккал/кг$.

11-25. Пар при начальных параметрах $p_1=130$ $кГ/см^2$ и $t_1=580°$ С вытекает из расширяющегося сопла в среду с давлением $p_{ср}=1$ $кГ/см^2$. Площадь минимального сечения $f_{мин}=3$ $см^2$.

Определить секундный расход пара, скорость истечения и площадь выходного сечения сопла. Потерями в сопле и начальной скоростью пренебречь.

Задачу решить, сравнивая критическую скорость с местной скоростью звука.

Решение

Отношение давлений $\beta=p_{ср}/p_1=1/130<\beta_{кр}\approx 0{,}55$, поэтому при расчетном режиме в расширяющейся части поток будет сверхзвуковым, а в минимальном сечении окажется критическая скорость

$$c_{кр} = \sqrt{2(i_1 - i_{кр})} = 1{,}414\sqrt{i_1 - i_{кр}},\ м/сек,$$

если $[i] = дж/кг$ или

$$c_{кр} = \sqrt{2g427(i_1 - i_{кр})} = 91{,}53\sqrt{i_1 - i_{кр}},\ м/сек,$$

если $[i] = ккал/кг$.

Эта скорость равна местной скорости звука, которая в самом общем случае должна быть подсчитана по формуле

$$a_* = \sqrt{-v^2(\partial p/\partial v)_s},\ м/сек,$$

если $[p] = н/м^2$, или

$$a_* = \sqrt{-gv^2(\partial p/\partial v)_s},\ м/сек,$$

если $[p] = кГ/м^2$.

Для нахождения параметров в минимальном сечении („критических") нужно, следовательно, приравнять $c_{кр} = a_*$ и привести к тождеству выражение

$$91{,}53\sqrt{i_1 - i_{кр}} = \sqrt{-gv^2(\partial p/\partial v)_s}.$$

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 [Л. 4] находим значения $s_1 = 1{,}6027$ *ккал/кг·°К* и $i_1 = 847{,}5$ *ккал/кг* и затем составляем расчетную таблицу $(c;\ a_*) = f(p)$. Пределы для давления выбираем в небольшой окрестности $p_{кр} \approx 0{,}55 \cdot 130 = 71$ *кГ/см²*.

При составлении таблицы величины v и i находим, линейно интерполируя при $s = 1{,}6027 = \text{const}$.

$p \cdot 10^{-4}$, *кГ/м²*	v, *м³/кг*	i, *ккал/кг*	$(\Delta p/\Delta v)_s \cdot 10^{-4}$	a_*, *м/сек*	c, *м/сек*
$s = 1{,}6027$ *ккал/кг·°К* = const					
62	0,05147	788,0	—	—	—
64	0,05021	790,6	—1,588	627	691
66	0,04901	792,8	—1,667	627	676
68	0,04789	795,2	—1,787	634	662
70	0,04681	797,3	—1,851	631	649
72	0,04580	799,5	—1,981	635	634
74	0,04482	801,7	—2,041	634	620
76	0,04387	803,5	—2,105	630	607
78	0,04301	805,7	—2,326	650	591
80	0,04215	807,6	—2,326	637	—
82	0,04135	—	—2,488	646	—

Далее строим графики $(c;\ a_*)=f(p)$, представленные на рис. 11-6 *. Очевидно, что пересечение кривых дает положение критической точки, для которой оказывается:

$$p_{кр}=7{,}1\ кГ/см^2;\quad c_{кр}=636\ м/сек.$$

Дальнейшее решение задачи проводится обычным порядком. Удельный объем в минимальном сечении находится из составленной нами таблицы, величины i_2 и v_2 подсчитываются при помощи таблиц *водяного пара при* $s=1{,}6027$ *ккал/кг·°К* (или находятся по *is*-диаграмме).

Приводим ответ: $c_2=1\,496$ *м/сек*; $m=4{,}152$ *кг/сек*; $f_2=44{,}6$ *см²*.

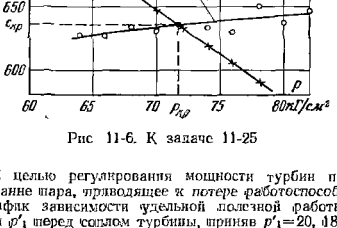


Рис 11-6. К задаче 11-25

11-26. 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 $p'_1=20$, 18, 16, 14, 12 и 10 *кГ/см²*. Начальные параметры пара $p_1=24$ *кГ/см²*; $t_1=340°$ С. Пар адиабатически расширяется до $p_2=0{,}05$ *кГ/см²*.

11-27. Водяной пар проходит через дроссельный вентиль, где дросселируется от давления $p_1=98{,}1\cdot10^5$ *н/м²* и $t_1=350°$ С до $p_2=0{,}981\cdot10^5$ *н/м²*. Скорость пара на выходе из дросселя равна 250 *м/сек*. Определить температуру выходящего пара. Начальной скоростью пара пренебречь.

Ответ: $t_2=214°$ С.

11-28. Горячая вода подается с ТЭЦ заводу по трубам с ТЭЦ выходит вода при температуре $t_1=120°$ С и давлении $p_1=10$ *кГ/см²*; к потребителю поступает вода при давлении $p_2=3$ *кГ/см²*.

Определить температуру воды (при отсутствии теплообмена).

Ответ: Температура воды, поступающей к потребителю, равна 120,09° С.

11-29. Насыщенный водяной пар при начальном давлении $p_1=20$ *кГ/см²* и $x_1=0{,}9$ дросселируется до $p_2=6$ *кГ/см²*.

Определить изменение температуры и степени сухости пара, пользуясь таблицами водяного пара.

Ответ: $\Delta t=53{,}3°$ С. Степень сухости повысится до 0,93.

---

* Разбег точек кривой $a_*=f(p)$ объясняется некоторой негладкостью таблиц водяного пара.

11-30. Водяной пар при давлении $p_1=180$ *кГ/см²* и температуре $t_1=370°$ С дросселируется до $p_2=86$ *кГ/см²*

Определить конечное состояние пара, пользуясь таблицами во ды и водяного пара

Каково будет конечное состояние пара, если дросселирование производить до давлений 9 и 1.2 *кГ/см²*?

Ответ: При $p_2=86$ *кГ/см²* пар становится влажным со степенью сухости $x_1=0{,}969$. Дросселирование до 9 *кГ/см²* почти не изменит степень сухости $x_2=0{,}965$. Дальнейшее дросселирование до $p_2=1{,}2$ *кГ/см²* переведет пар снова в перегретое состояние с температурой $t'_2=104{,}5°$ С

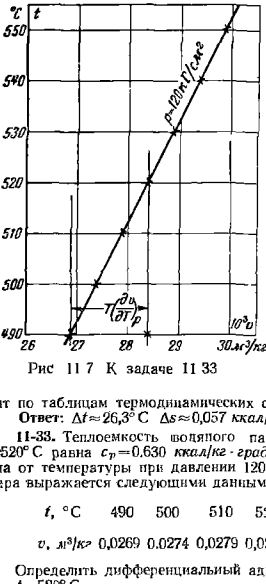


Рис 11 7 К задаче 11 33

11-31. Определить интегральный дроссель эффект и изменение энтропии, если водяной пар, имеющий параметры $t_1=400°$ С и $p_1=80$ *кГ/см²*, дросселируется до давления $p_2=50$ *кГ/см²* Решить задачу, пользуясь *ts* диаграммой

Ответ: $\Delta t=22°$ С, $\Delta s=0{,}048$ *ккал/кг·°К*

11-32. Водяной пар при $t_1=400°$ С и $p_1=80$ *кГ/см²* дросселируется до $p_2=45$ *кГ/см²*

Определить интегральный дроссель эффект и изменение энтропии, пользуясь диаграммой *ts* Проверить полученный результат по таблицам термодинамических свойств воды и водяного пара

Ответ: $\Delta t\approx 26{,}3°$ С $\Delta s\approx 0{,}057$ *ккал/кг·°К*

11-33. Теплоемкость водяного пара при $p=120$ *кГ/см²* и $t=520°$ С равна $c_p=0{,}630$ *ккал/кг·град* Зависимость удельного объема от температуры при давлении 120 *кГ/см²* по таблицам водяного пара выражается следующими данными

t, °С	490	500	510	520	530	540	550
v, *м³/кг*	0,0269	0,0274	0,0279	0,0284	0,0289	0,0294	0,0299

Определить дифференциальный адиабатический дроссель-эффект при $t=520°$ С.

Решение

Пользуясь приведенной в условии задачи таблицей, строим в *tv*-координатах изобару $p=120$ *кГ/см²* и графическим дифференцированием определяем производную $(dv/dT)_p$ при температуре 520° С (см рис. 11-7)

В соответствии с уравнением адиабатического дроссель-эффекта

$$a_i = \left(\frac{\partial T}{\partial p}\right)_i = \frac{[T(\partial v/\partial T)_p - v]}{c_p}$$

получаем:

$$a_i = \frac{\left(793\frac{0,0015}{30} - 0,0284\right)\cdot 10^4}{427\cdot 0,630} = 0,420\ \frac{град}{кГ/см^2}.$$

11-34. Пользуясь полученной в предыдущей задаче величиной дроссель эффекта $a_i = 0.420$ при $t = 520°$ С, определить интегральный дроссель эффект при падении давления пара от $p_1 = 120$ до $p_2 = 100$ *кГ/см²*. Результат расчета сравнить с табличной величиной

Ответ: $\Delta t = 840°$ С, по таблицам водяного пара $\Delta t = 9°$ С

11-35. С помощью таблиц термодинамических свойств воды и водяного пара определить точку инверсии для воды при температуре 270° С.

Решение

В точке инверсии коэффициент дифференциального дроссель-эффекта равняется нулю

$$a_i = \left(\frac{\partial T}{\partial p}\right)_i = \frac{[T(\partial v/\partial T)_p - v]}{c_p} = 0.$$

Это уравнение можно записать следующим образом:

$$a_i = \frac{-(\partial i/\partial p)_T}{c_p} = 0.$$

Для равенства нулю коэффициента дроссель-эффекта нужно, чтобы производная $(di/dp)_T = 0$ при заданной температуре 270° С Воспользовавшись таблицами воды и водяного пара, составим таблицу значений энтальпий для различных давлений при температуре 270° С

$p_{ср}$, *кГ/см²*	112,5	137,5	160	182,5	237,5	297,5	340	375	395
i, *ккал/кг*	282,6	282,5	282,4	282,3	282,2	282,3	282,4	282,5	282,6

Очевидно, что при давлении (среднем) 237,5 *кГ/см²* знак приращения энтальпии изменяется на обратный, производная $(di/dp)_T$ в этой точке равна нулю Следовательно, при температуре 270° С давление в точке инверсии $p_i = 237,5$ *кГ/см²*

11-36. По паропроводу *1* (рис 11 8) течет перегретый пар с параметрами $p_1 = 100$ *кГ/см²* и $t_1 = 450°$ С Расход его $m_1 = 860$ *кг/ч*. Для того чтобы снизить температуру пара, к паропроводу *1* присоединили другой паропровод *2*, по которому подают $m_2 = 620$ *кг/ч* влажного пара при давлении $p_2 = 70$ *кГ/см²* и со степенью сухости $x_2 = 0,89$ Заданная температура смеси $t_{см} = 345°$ С.

Найти давление смеси и ее энтальпию. Величинами кинетических энергий потоков пренебречь. При решении воспользоваться *is*-диаграммой.

Ответ: $p_{см}=80$ *кГ/см²*; $i_{см}=710$ *ккал/кг*.

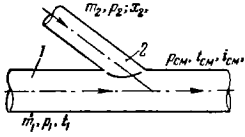


Рис. 11-8. К задаче 11-36.

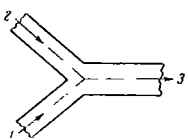


Рис. 11-9. К задаче 11-37.

11-37. Смешиваются два потока пара: параметры указаны на схеме рис 11-9

$1 - p_1=15$ *кГ/см²*; $t_1=400°$ С; $m_1=4$ *кг*; $2 - p_2=10$ *кГ/см²*; $t_2=300°$ С; $m_2=10$ *кг*; $3 - p_3=8$ *кГ/см²*.

Определить температуру выходящего пара и его энтальпию. Величинами кинетических энергий потоков пренебречь. Для решения воспользоваться *is* диаграммой

Ответ: $t_{см}=366°$ С; $i_{см}=763$ *ккал/кг*.

12. КОМПРЕССОРЫ И ЦИКЛЫ ДВИГАТЕЛЕЙ ВНУТРЕННЕГО СГОРАНИЯ

12-1. Идеальный поршневой компрессор сжимает 450 $м^3_{н}/ч$ воздуха от $p_1=0{,}98\cdot10^5$ *н/м²* и $t_1=30°$ С до $p_2=4{,}9\cdot10^5$ *н/м²*.

Определить мощность, затрачиваемую на привод компрессора, если сжатие происходит адиабатически, и температуру газа на выходе из компрессора.

Ответ: $N=28{,}5$ *квт*; $t=207°$ С.

12-2. Компрессор сжимает 600 $м^3/ч$ воздуха от давления $p_1=0{,}98\cdot10^5$ *н/м²* до $p_2=6{,}38\cdot10^5$ *н/м²*.

Определить мощность, необходимую на привод компрессора, если сжатие происходит: а) адиабатически, б) политропически с показателем $n=1{,}3$, в) изотермически.

Ответ: $N_{ад}=40{,}6$ *квт*; $N_{пол}=38{,}3$ *квт*; $N_{из}=30{,}5$ *квт*.

12-3. Многоступенчатый поршневой компрессор без вредного объема сжимает воздух от начального давления $p_1=0{,}981\cdot10^5$ *н/м²* до давления $p_2=53{,}95$ *н/м²*. Известно, что отношение конечного давления к начальному одинаково для всех цилиндров и заключено 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 равна $t_1=17°$ С, а сжатие политропическое с показателем политропы $n=1{,}3$. Производительность компрессора 300 $м^3_{н}/ч$.

Ответ: $N=65{,}3$ *квт*; $m=500$ *кг/ч*; число ступеней равно двум.

12-4. Двухступенчатый поршневой компрессор сжимает воздух от давления $p_1=0{,}981\cdot10^5$ *н/м*^{2} до давления $p_2=58{,}8\cdot10^5$ *н/м*^{2}. Сжатие политропическое с показателем политропы $n=1{,}25$.

Начальная температура воздуха $t_1=20°$ С, производительность компрессора 500 $м^3_н/ч$.

Определить расход охлаждающей воды на охлаждение цилиндров и промежуточного холодильника, если ее температура возрастает от 10 до 30° С, а также мощность двигателя на привод компрессора, если $\eta_к=0{,}65$. Компрессор без вредного объема.

Ответ: $N=58{,}7$ *квт*; $m=2\,390$ *кг/ч*.

12-5. В двухступенчатом компрессоре без вредного объема воздух адиабатически сжимается от $0{,}98\cdot10^5$ до $49\cdot10^5$ *н/м*^{2}.

Определить производительность компрессора, если мощность его двигателя 60 *квт*, к. п. д. компрессора $\eta_к=0{,}65$. Начальная температура воздуха равна 27° С.

Ответ: 239,5 $м^3_н/ч$.

12-6. В изотермическом компрессоре воздух сжимается от $0{,}98\cdot10^5$ до $9{,}8\cdot10^5$ *н/м*^{2}. Как изменится мощность двигателя для привода компрессора, если сжатие будет производиться изотермически до $980\cdot10^5$ *н/м*^{2}?

Ответ: В 3 раза.

12-7. Определить объемную часовую производительность по сжатому воздуху компрессора, сжимающего воздух от $p_1=0{,}98\cdot10^5$ *н/м*^{2} и $t_1=15°$ С до $p_2=7{,}84\cdot10^5$ *н/м*^{2}. Сжатие изотермическое, мощность двигателя 40 *квт*.

Ответ: $V=88{,}4$ $м^3/ч$.

12-8. В результате уменьшения расхода воды, охлаждающей цилиндр компрессора, температура сжатого воздуха на выходе из компрессора возрастает от 100 до 150° С. Начальная температура воздуха остается постоянной и равной 17° С. Давление сжатого воздуха $p_2=4{,}5$ *кГ/см*^{2}, начальное давление $p_1=1$ *кГ/см*^{2}.

Как изменится затрачиваемая мощность?

Ответ: Приблизительно на 6%.

12-9. Начальные параметры воздуха, поступающего в поршневой компрессор, равны

$$p_1=1\ кГ/см^2,\ t_1=27°\ С.$$

Сколько ступеней должен иметь компрессор, чтобы при адиабатическом сжатии максимальная температура воздуха в каждой ступени не превышала 150° С. Давление нагнетаемого воздуха должно быть равно

$$206{,}01\cdot10^5\ н/м^2.$$

Ответ: Число ступеней равно пяти.

12-10. Кислородный компрессор сжимает кислород от $p=0{,}98\cdot10^5$ *н/м*^{2} и $t_1=17°$ С до давления $3{,}43\cdot10^5$ *н/м*^{2}.

Определить необходимую мощность двигателя, если адиабатический к. п. д. установки $\eta_{ад}=0{,}83$. Производительность компрессора 200 $м^3/ч$ сжатого газа.

Ответ: $N=23{,}4$ *квт*.

12-11. Определить экономию в работе, полученную за счет перехода от одноступенчатого к двухступенчатому адиабатическому сжатию воздуха в поршневом компрессоре без вредного объема. Начальное давление $p_1 = 0{,}98 \cdot 10^5$ *н/м²*, температура $t_1 = 17°$ С. Конечное давление $p_2 = 9{,}8 \cdot 10^5$ *н/м²*

Ответ: 16,5%.

12-12. Определить предельное давление (в долях от начального), при котором производительность одноступенчатого компрессора, сжимающего воздух, становится равной нулю. Объем вредного пространства составляет 2, 4 и 6% от части объема цилиндра, соответствующей ходу поршня. *Сжатие адиабатическое.*

Ответ: 1) 246 p_1, 2) 95,6 p_1; 3) 55,7 p_1.

12-13. Рассчитать эффективную мощность на валу поршневого одноступенчатого неохлаждаемого компрессора, сжимающего кислород. Параметры среды, из которой всасывается газ: $p_1 = 0{,}981 \cdot 10^5$ *н/м²* 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.

Решение

Эффективную мощность в общем виде следует записать так:

$$N_э = \frac{N,\ дж/мин}{60\eta_к} = \frac{|m_{мин}|_к}{60\eta_к},\ вт.$$

Здесь $m_{мин}$ — масса газа, всасываемая за 1 *мин*, *кг/мин*;

$|_к$ — не зависящая от вредного объема теоретическая работа, отнесенная к 1 *кг* рабочего тела, *дж/кг*.

Величину $m_{мин}$ можно выразить следующим образом:

$$m_{мин} = \lambda V_h n \frac{p_1}{RT_1},$$

где $\lambda = \lambda_v = (V - V_0)/V_h$ (см. рис. 12-1); V_h, *м³/об* — объем, соответствующий ходу поршня, V_0, *м³/об* — объем расширившегося к моменту начала всасывания газа, находящегося во вредном объеме. Величина V_0 подсчитывается по формуле

$$V_0 = V_{вр}\beta^{\frac{1}{k}}.$$

После подстановки этих величин в основную формулу получаем:

$$N_э = \frac{1}{60\eta_к}\lambda V_h n p_1 \frac{k}{k-1}\left(\beta^{\frac{k-1}{k}} - 1\right),\ вт.$$

По линейным размерам определяем объемы: $V = \pi d^2/4 h_ц = 0{,}00282\ м^3$; $V_h = \pi d^2/4 h = 0{,}00271\ м^3$; $V_{вр} = V - V_h = 0{,}00011\ м^3$. Находим величину $V_0 = V_{вр}\beta^{1/k} = 0{,}0001 \cdot 7^{1/1{,}4} = 0{,}00044\ м^3$

Следовательно, $\lambda = \lambda_v = (0{,}00282 - 0{,}00044) : 0{,}00271 = 0{,}878$.

Рассчитываем мощность:

$$N_в = \frac{1}{60 \cdot 0{,}7} 0{,}878 \cdot 0{,}00271 \cdot 240 \cdot 0{,}981 \cdot 10^5 \frac{1{,}4}{1{,}4-1} \left(7^{\frac{1{,}4-1}{1{,}4}} - 1\right) =$$

$$= 3\,474 \text{ вт} \approx 3{,}5 \text{ квт}.$$

12-14. Определить часовую производительность одноступенчатого неохлаждаемого компрессора в $м^3_н/ч$, а также полный объем цилиндра V, если известно: параметры всасываемого воздуха $p_1 = 0{,}98 \cdot 10^5$ $н/м^2$ и $t_1 = 20°$ С; степень повышения давления $\beta = 8$; эффективный к. п. д. $\eta_к = 0{,}68$, число оборотов вала $n = 300$ $об/мин$; коэффициент наполнения, равный объемному коэффициенту $\lambda = \lambda_v = 0{,}883$; мощность на валу компрессора $N_e = 52$ $квт$.

Ответ: 412 $м^3_н/ч$; $V = 29{,}7$ $дм^3$

12-15. Начальное состояние воздуха, поступающего в воздушный двигатель, характеризуется параметрами: $p_1 = 11{,}76 \cdot 10^5$ $н/м^2$ и $t_1 = 157°$ С. Расширение в цилиндре двигателя происходит по политропе с показателем $n = 1{,}3$.

Определить часовой расход сжатого воздуха, если мощность двигателя $N = 300$ $л.с.$

Ответ: $m = 3\,450$ $кг/ч$.

12-16. Воздушный двигатель, использующий для работы сжатый воздух, должен развивать мощность $N = 30$ $квт$.

Каков часовой расход сжатого воздуха, если начальные параметры его $p_1 = 19{,}6 \cdot 10^5$ $н/м^2$, $t_1 = 30°$ С? Давление в конце адиабатического расширения $p_2 = 0{,}98 \cdot 10^5$ $н/м^2$.

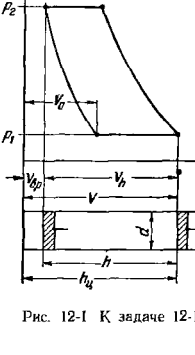


Рис. 12-I К задаче 12-13.

Ответ: $m = 612$ $кг/ч$

12-17. Определить характер зависимости термического к. п. д. от степени сжатия ε для цикла поршневого двигателя внутреннего сгорания с подводом тепла при $v = \text{const}$, изменяя ε от 3 до 9. Показатель политропы $n = 1{,}3$.

12-18. Рассчитать полезную работу, совершенную за цикл с подводом тепла в процессе $v = \text{const}$, если известно, что расход топлива составляет 44 $г$ на 1 $кг$ воздуха, $\varepsilon = 6$, теплота сгорания топлива $Q^p_н = 29\,260 \cdot 10^3$ $дж/кг$, $k = 1{,}37$.

Ответ: $l = 620$ $кдж/кг$.

12-19. Двигатель работает по циклу с подводом тепла в процессе $v = \text{const}$. Начальное состояние рабочего тела: $p_1 = 0{,}9$ $кГ/см^2$, $t_1 = 20°$ С, степень сжатия $\varepsilon = 4{,}6$. При сгорании топлива выделяется энергия в количестве 1 287 $кдж/кг$.

Определить η_t и мощность одного цилиндра двигателя, если диаметр цилиндра $d = 250$ $мм$; ход поршня $h = 340$ $мм$, число оборо-

тов $n=200$ *об/мин*; за каждые два оборота совершается один цикл. Считать, что рабочее тело обладает свойствами воздуха.

Ответ: $\eta_t=0{,}457$; $N=17{,}3$ *квт*.

12-20. Для цикла с подводом тепла в процессе $v=\text{const}$ определить среднее индикаторное (цикловое) давление. Начальное давление $p_1=1$ *кГ/см*^{2}; $t_1=20°$ С; $\varepsilon=3{,}6$; $\lambda=p_3/p_2=3{,}33$.

Ответ: $p_i=5{,}4$ *кГ/см*$^2=5{,}26\cdot10^5$ *н/м*^{2}.

12-21. Мощность четырехкратного двигателя внутреннего сгорания, работающего по циклу с подводом тепла в процессе $p=\text{const}$, равна 20 *л. с.* Диаметр цилиндра $d=240$ *мм*, ход поршня $h=340$ *мм*, число оборотов $n=200$ *об/мин*.

Определить среднее индикаторное давление.

Ответ: $p_i=5{,}64\cdot10^5$ *н/м*^{2}.

12-22. Для цикла с подводом тепла в процессе $p=\text{const}$ определить полезную работу и термический к. п. д., если $p_1=1$ *кГ/см*^{2}; $t_1=50°$ С; $\varepsilon=14$; $k=1{,}4$; $\rho=1{,}67$. Рабочее тело обладает свойствами воздуха.

Ответ: $\eta_t=0{,}608$; $l=376$ *кдж/кг*.

12-23. Известно, что в цикле с подводом тепла в процессе $p=\text{const}$ при начальных параметрах $p_1=0{,}833\cdot10^5$ *н/м*^{2} и $t_1=25°$ С подведенное тепло составляет 773,3 *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: $\eta_t=0{,}60$; $l=464$ *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: $\eta_t=0{,}61$; $\eta_{t.к}=0{,}76$.

12-25. В цикле поршневого двигателя внутреннего сгорания с комбинированным подводом тепла (рис. 12-2) начальное давление $p_1=0{,}85$ *кГ/см*^{2} и температура $t_1=50°$ С. Степень сжатия $\varepsilon=8$; $\lambda=2{,}0$ и $\rho=1{,}2$.

Определить параметры в характерных для цикла точках, количество подведенного тепла, полезную работу и термический к. п. д. цикла. Рабочее тело обладает свойствами воздуха.

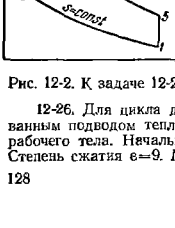


Рис. 12-2. К задаче 12-25.

Ответ: Параметры характерных точек:

	p, *кГ/см*^{2}	v, *м*^{3}*/кГ*	T, °К
1	0,85	1,11	323
2	15,5	0,141	745
3	31,0	0,141	1 490
4	31,0	0,169	1 790
5	2,22	1,11	841

$\eta_t=0{,}55$; $q_1=199$ *ккал/кг*;

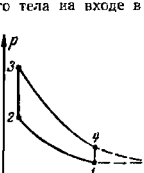
$l=47\,300$ *кГ·м/кГ*.

12-26. Для цикла двигателя внутреннего сгорания с комбинированным подводом тепла расход топлива составляет 0,035 *кг* на 1 *кг* рабочего тела. Начальные параметры: $p_1=0{,}882\cdot10^5$ *н/м*^{2}, $t_1=50°$ С. Степень сжатия $\varepsilon=9$. Максимальное давление в цикле $29{,}4\cdot10^5$ *н/м*^{2}.

Определить термический к. п. д. и долю тепла топлива, подведенного в процессе $p = \text{const}$. Теплота сгорания топлива $Q_н^р = 29\,260$ *кдж/кг*. Рабочее тело обладает свойствами воздуха.

Ответ: $\eta_t = 58{,}9\%$; $q_p/q_1 = 56\%$.

12-27. Определить среднюю температуру выхлопных газов двигателя внутреннего сгорания, работающего по циклу с подводом тепла при $v = \text{const}$, если параметры рабочего тела на входе в цилиндр $p_1 = 0{,}97 \cdot 10^5$ *н/м²* и $t_1 = 50°$ С, а степень сжатия $\varepsilon = 6$. В процессе подвода тепла рабочему телу сообщается $q_v = 920$ *кдж/кг* тепла. Рабочее тело обладает свойствами воздуха. Теплоемкость считать не зависящей от температуры.



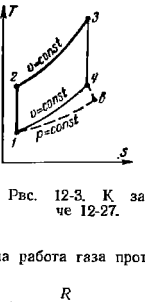


Рис. 12-3. К задаче 12-27.

Решение

Цикл изображен в *pv*- и *Ts*-координатах на рис. 12-3. Как известно, процесс *4-1* в цикле *1234*, в котором тепло отводится внешнему источнику, является условным. В действительности его следует заменить двумя процессами: *4-в* и *в-1*. Первый из них является необратимым процессом истечения отработавших в цилиндре газов через выхлопной клапан в окружающую среду с давлением $p_н$ (этот процесс можно считать необратимым адиабатическим) и второй — изобарическое охлаждение газов от искомой $t_н$ до температуры среды. В курсах технической термодинамики доказывается, что процесс *1-4* термодинамически эквивалентен процессам *4-в* и *в-1*.

Искомую температуру можно найти, записав уравнение первого закона термодинамики для процесса *4-в*:

$$u_4 - u_н = -p_н(v_в - v_4).$$

В правой части этого уравнения записана работа газа против постоянного давления внешней среды $p_н$.

Записав левую часть как $c_v(T_4 - T_в)$, где $c_v = \dfrac{R}{k-1}$ и заметив, что $p_в = p_1$ и $v_4 = v_1$, путем несложных преобразований можно прийти к следующему выражению:

$$T_н = \frac{T_4}{k}\left[1 + (k-1)\frac{T_1}{T_4}\right].$$

Предоставляем возможность учащимся сделать эти преобразования самостоятельно.

Температура T_4 находится путем расчета обратимого цикла *1234* обычным порядком. В результате расчета получается:

$T_4 = 948°$ К. Следовательно,

$$T_в = \frac{948}{1{,}4^{\frac{0{,}4}{1{,}4}}} = 769\ °\text{К};\quad t_в = 496\ °\text{С}.$$

Как видно, $T_в$ значительно ниже, чем температура T_4 в конце адиабатического расширения газов в цилиндре.

13. 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 тепла при p=const при следующих степенях повышения давления

1) β_1=5; 2) β_2=10; 3) β_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 работает по циклу с подводом тепла при p=const. Степень повышения давления равна β=12.

Рассчитать термический к. п. д. ГТУ для двух случаев: а) рабочим веществом является воздух; б) рабочим веществом является гелий.

Ответ: Для воздуха η_t=0,508; для гелия η_t=0,630.

13-3. Компрессор газотурбинной установки сжимает воздух с начальными параметрами $p_1 = 10^5$ *н/м*^{2} и t_1=5° С до давления $p_2 = 8 \cdot 10^5$ *н/м*^{2}. Внутренний относительный к. п. д. компрессора равен 0,84.

Определить температуру воздуха на выходе из компрессора, а также мощность привода компрессора $N_к$, если известно, что компрессор должен подавать 10^6 *кг/ч* воздуха.

Ответ: t_2=274° С; $N_к$=7 500 *квт*.

13-4. В турбину газотурбинной установки входит гелий с параметрами $p_3 = 10^5$ *н/м*^{2}, t_3=700° С. Внутренний относительный к. п. д. турбины равен 0,86, давление за турбиной $p_4 = 10^5$ *н/м*^{2}.

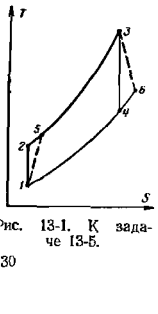


Рис. 13-1. К задаче 13-5.

Определить температуру гелия на выходе из турбины. Рассчитать также массовый часовой расход гелия D, если действительная мощность турбины равна $N_т$ = =40 *Мвт*.

Ответ: t=196° С; $D = 55{,}1 \cdot 10^3$ *кг/ч*.

13-5. Начальные параметры воздуха, поступающего в компрессор ГТУ со сжиганием топлива при p=const, равны: p_1 = =1 *кГ/см*^{2}, t_1=20° С. Степень повышения давления в компрессоре ГТУ равна β=6. Температура газов перед соплами турбины равна t_3=700° С. Рабочее тело обладает свойствами воздуха, теплоемкость его рассчитывается по молекулярно-кинетической теории. Компрессор засасывает $2 \cdot 10^5$ *кг/ч* воздуха.

Определить:

1) Параметры всех точек идеального цикла ГТУ (т. е такого цикла, в котором процессы сжатия и расширения изоэнтропические), термический к. п. д ГТУ, теоретические мощности турбины, компрессора и всей ГТУ.

2) Параметры всех точек действительного цикла, т. е. с учетом необратимости процессов расширения и сжатия в турбине и компрессоре, приняв внутренние относительные к. п. д. турбины и компрессора соответственно $\eta_{0i}^{т} = 0{,}87$ и $\eta_{0i}^{к} = 0{,}85$.

3) Внутренний к. п. д. ГТУ, действительные мощности турбины, компрессора и всей ГТУ. Принять $k = 1{,}4$. Представить оба цикла в Ts-диаграмме.

Решение

На рис. 13-1 представлены обратимый *12341* и необратимый *15361* циклы ГТУ в Ts-диаграмме.

Температуры в точках обратимого цикла рассчитываются следующим образом.

$$T_2 = T_1 \left(\frac{p_2}{p_1}\right)^{\frac{k-1}{k}} = 293 \cdot 6^{\frac{1,4-1}{1,4}} = 489\ °\text{K};\ t_2 = 216\ °\text{C};$$

$$T_4 = \frac{T_3 T_1}{T_2} = \frac{973 \cdot 293}{489} = 583\ °\text{K};\ t_4 = 310\ °\text{C}.$$

Термический к. п. д. равен:

$$\eta_t = 1 - \frac{1}{\underbrace{\frac{k-1}{k}}_{\beta}} = 1 - \frac{1}{\underbrace{\frac{1,4-1}{1,4}}_{6}} = 0{,}401.$$

Теоретические мощности:

$$N_0^{т} = D(i_3 - i_4) = Dc_p(t_3 - t_4) = \frac{8{,}314 \cdot 7 \cdot (700 - 310) 2 \cdot 10^3}{2 \cdot 28{,}96 \cdot 3\,600} =$$

$$= 21\,800\ \textit{квт}.$$

$$N_0^{к} = D(i_2 - i_1) = Dc_p(t_2 - t_1) = \frac{8{,}314 \cdot 7\,(216 - 20) 2 \cdot 10^3}{2 \cdot 28{,}96 \cdot 3\,600} =$$

$$= 10\,900\ \textit{квт}.$$

$$N_0^{ГТУ} = N_0^{т} - N_0^{к} = 21\,800 - 10\,900 = 10\,900\ \textit{квт}.$$

Температуры в точках реального цикла рассчитываются следующим образом.

С помощью основной формулы для внутреннего относительного к. п. д. компрессора находится температура конца сжатия t_5:

$$\eta_{0i}^{к} = \frac{t_2 - t_1}{t_5 - t_1} = \frac{t_2 - t_1}{t_5 - t_1}.$$

Отсюда

$$t_6 = \frac{t_2 - t_1}{\eta_{oi}^{к}} + t_1 = \frac{216 - 20}{0,85} + 20 = 251\ °C.$$

Температура в конце необратимого адиабатического расширения находится аналогично:

$$\eta_{oi}^{т} = \frac{i_3 - i_6}{i_3 - i_4} = \frac{t_3 - t_6}{t_3 - t_4}.$$

Отсюда

$$t_6 = t_3 - \eta_{oi}^{т}(t_3 - t_4) = 700 - 0,87(700 - 310) = 361\ °C.$$

Внутренний к. п. д. ГТУ определяется:

$$\eta_i^{гту} = \frac{(i_3 - i_6) - (i_5 - i_1)}{i_3 - i_5} = \frac{(t_3 - t_6) - (t_5 - t_1)}{t_3 - t_5} =$$

$$= \frac{(700 - 361) - (251 - 20)}{700 - 251} = 0,242.$$

Действительная мощность турбины равна:

$$N_д^{т} = D(i_3 - i_6) = Dc_p(t_3 - t_6) = \frac{8,314 \cdot 7 \cdot (700 - 361) \cdot 2 \cdot 10^6}{2 \cdot 28,96 \cdot 3\,600} =$$

$$= 18\,900\ квт.$$

Либо

$$N_д^{т} = N_0^{т}\eta_{oi}^{т} = 21\,800 \cdot 0,87 = 18\,900\ квт.$$

Действительная мощность привода компрессора равна:

$$N_д^{к} = D(i_5 - i_1) = Dc_p(t_5 - t_1) = \frac{8,314 \cdot 7(251 - 20) 2 \cdot 10^6}{2 \cdot 28,96 \cdot 3\,600} =$$

$$= 12\,900\ квт.$$

Или

$$N_д^{к} = N_0^{к} / \eta_{oi}^{к} = 10\,900/0,85 = 12\,900\ квт.$$

Действительная мощность газотурбинной установки равна:

$$N_д^{гту} = N_д^{т} - N_д^{к} = 18\,900 - 12\,900 = 6\,000\ квт.$$

Из приведенного расчета видно, как сильно влияет необратимость процессов сжатия и расширения газа на к. п. д. и мощность газотурбинной установки.

13-6. Газотурбинная установка, в которой топливо сгорает при $p = \text{const}$, работает при следующих параметрах:

$t_1 = 12\ ^\circ\text{C}$, $p_1 = 0{,}9\ кГ/см^2$, степень повышения давления $\beta = 7$; температура газов перед соплами турбины равна $750\ ^\circ\text{C}$. Внутренние относительные к. п. д. турбины и компрессора равны

$$\eta_{0i}^{\text{т}} = \eta_{0i}^{\text{к}} = 0{,}8.$$

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

$$\eta_{0i}^{\text{т}} = \eta_{0i}^{\text{к}} = 0{,}85.$$

Рассчитать величины 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: $\eta_{i,1} = 0{,}178$; $\eta_{i,2} = 0{,}248$; $\eta_t = 0{,}426$.

13-7. Известно, что термический к. п. д. цикла ГТУ с подводом тепла при $p = \text{const}$ 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) $t_1 = 20\ ^\circ\text{C}$, $\beta = 7$, температура газа перед турбиной $t_3 = 600\ ^\circ\text{C}$; $\eta_{0i}^{\text{т}} = \eta_{0i}^{\text{к}} = 0{,}85$.

2) $t_1 = 20\ ^\circ\text{C}$, $\beta = 7$, $t_3 = 800\ ^\circ\text{C}$, $\eta_{0i}^{\text{т}} = \eta_{0i}^{\text{к}} = 0{,}85$.

Принять показатель адиабаты $k = 1{,}4$, а теплоемкость газов считать постоянной.

Ответ: $\eta_{i,1} = 0{,}186$; $\eta_{i,2} = 0{,}253$.

13-8. Для газотурбинной установки, в которой сжигается топливо при $p = \text{const}$, известно: начальные параметры воздуха $p_1 = 0{,}9 \cdot 10^5\ н/м^2$, $t_1 = 10\ ^\circ\text{C}$, степень повышения давления $\beta = 6{,}5$, температура газов перед турбиной $t_3 = 800\ ^\circ\text{C}$, внутренние относительные к. п. д. турбины $\eta_{0i}^{\text{т}} = 0{,}88$ и компрессора $\eta_{0i}^{\text{к}} = 0{,}85$.

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 таблиц ВТИ [Л. 3]. Производительность компрессора $D = 300\ т/ч$.

Решение

На рис. 13-1 изображен цикл ГТУ (*15361*).

Из таблиц ВТИ для первого состояния ($t_1 = 10^\circ\text{C}$) имеем:

$$\pi_{01} = 1{,}1326;\ i_1 = 67{,}65\ ккал/кг.$$

Второе приведенное давление π_{02} находится:

$$\pi_{02} = \frac{p_2}{p_1}\,\pi_{01} = 6{,}5 \cdot 1{,}1326 = 7{,}362.$$

По величине этого приведенного давления находим в таблицах величины, соответствующие обратимому сжатию (процесс *1-2*): t_2=208,5° С; i_2=115,6 *ккал/кг*.

Действительная величина энтальпии после сжатия в компрессоре определяется:

$$i_5 = \frac{i_2 - i_1}{\eta_{oi}^{к}} + i_1 = \frac{115,6 - 67,65}{0,85} + 67,65 =$$

$$= 124,06 \text{ ккал/кг}.$$

Для состояния *3* (t_3=800° С) из таблиц выписываем необходимые величины:

$$\pi_{03} = 151,21; \; i_3 = 269,86 \text{ ккал/кг}.$$

Приведенное давление в точке *4* находим:

$$\pi_{04} = \frac{p_4 \pi_{03}}{p_3} = \frac{151,21}{6,5} = 23,26$$

и по этой величине из таблиц получаем:

$$t_4 = 387,8° \text{ С}, \; i_4 = 160,4 \text{ ккал/кг}.$$

Энтальпию в конце действительного расширения (точка *6*) подсчитываем по формуле

$$i_6 = i_3 - \eta_{oi}^{т}(i_3 - i_4) = 269,86 - 0,88\,(269,86 - 160,4) =$$

$$= 173,53 \text{ ккал/кг}.$$

Внутренний к. п. д. установки рассчитывается:

$$\eta_i^{ГТУ} = \frac{(i_3 - i_6) - (i_5 - i_1)}{i_3 - i_5} = \frac{(269,86 - 173,53) - (124,06 - 67,65)}{269,86 - 124,06} =$$

$$= 0,274.$$

Действительная мощность компрессора равна:

$$N_д^{к} = \frac{D(i_5 - i_1)}{860} = \frac{(124,06 - 67,65) \cdot 300 \cdot 10^3}{860} = 19\,680 \text{ квт}.$$

Действительная мощность турбины равна:

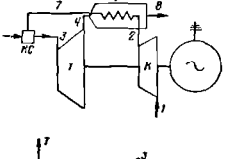
$$N_д^{т} = \frac{D(i_3 - i_6)}{860} = \frac{(269,86 - 173,53)\,300 \cdot 10^3}{860} = 33\,600 \text{ квт}.$$

Действительная мощность ГТУ равна:

$$N_д^{ГТУ} = N_д^{т} - N_д^{к} = 33\,600 - 19\,680 = 13\,920 \text{ квт}.$$

13-9. На рис. 13-2 представлена схема ГТУ с регенерацией, а также цикл в *TS*-диаграмме. Для этой установки известно: $p_1 = 10^5$ н/м²; $t_1 = 15°$ С; $\beta = p_2/p_1 = 4{,}8$; $t_3 = 780°$ С. Внутренние относительные к. п. д. турбины и компрессора равны $\eta^т_{oi} = 0{,}85$ 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 (*1273481*); точки *5* и *6* относятся к обратимому циклу

Сначала необходимо рассчитать температуры в точках цикла,

$$T_6 = T_1 \left(\frac{p_2}{p_1}\right)^{\frac{k-1}{k}} =$$

$$= 288 \cdot 4{,}8^{\frac{1{,}4-1}{1{,}4}} = 451° \text{ К},$$

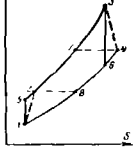


Рис. 13-2. К задаче 13-9.

или $t_6 = 178°$ С.

С помощью основной формулы для внутреннего относительного к. п. д. компрессора $\eta^к_{oi}$ определяем температуру в точке *2*:

$$t_2 = \frac{t_5 - t_1}{\eta^к_{oi}} + t_1 = \frac{178 - 20}{0{,}83} + 20 = 210° \text{ С}.$$

Температура T_6 определяется:

$$T_6 = \frac{T_3 T_1}{T_5} = \frac{1\,053 \cdot 288}{451} = 673° \text{ К или } t_6 = 400° \text{ С}.$$

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 равен:

$$\eta_t = \frac{l_0}{q_{1,0}} = \frac{(t_3 - t_6) - (t_5 - t_1)}{t_3 - t_6} = \frac{(780 - 400) - (178 - 15)}{780 - 400} = 0{,}572.$$

Внутренний к. п. д. ГТУ с предельной регенерацией равен:

$$\eta_i^{\text{ГТУ}} = \frac{l_д}{q_{1,д}} = \frac{(t_3 - t_4) - (t_2 - t_1)}{(t_3 - t_7)} =$$

$$= \frac{(780 - 457) - (210 - 15)}{780 - 457} = 0{,}396.$$

Внутренний к. п. д. ГТУ без регенерации равен:

$$\eta_i^{\text{ГТУ}} = \frac{(t_3 - t_4) - (t_2 - t_1)}{t_3 - t_2} = \frac{(780 - 457) - (210 - 15)}{780 - 212} = 0{,}225.$$

13-10. Газотурбинная установка, работающая по циклу с подводом тепла при $p = \text{const}$, работает с непредельной регенерацией (схема рис. 13-2). Параметры установки таковы: $\beta = 4{,}8$; $t_1 = 15°$ С; $t_3 = 780°$ С. Степень регенерации $\sigma = 0{,}75$. Внутренние относительные к. п. д. турбины и компрессора равны $\eta_{oi}^{т} = 0{,}85$ и $\eta_{oi}^{к} = 0{,}83$.

Рассчитать внутренний к. п. д. такой установки. Считать, что рабочее тело обладает свойствами воздуха; показатель адиабаты принять равным $k = 1{,}4$.

Ответ: $\eta_i = 0{,}333$.

13-11. Известно, что термический к. п. д. простейшей газотурбинной установки с подводом тепла при $p = \text{const}$ возрастает с ростом степени увеличения давления β.

Как будет изменяться термический к. п. д. ГТУ с ростом β при неизменной температуре перед турбиной, если ГТУ работает с предельной регенерацией? Задачу решить с помощью *TS* диаграммы.

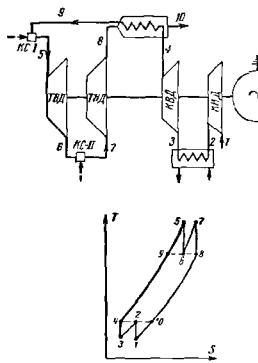


Рис. 13-3. К задаче 13-12.

Ответ: С ростом β термический к. п. д. ГТУ с предельной регенерацией будет уменьшаться.

13-12. Рассчитать теоретический цикл ГТУ с двухступенчатым сжатием и двухступенчатым расширением и с предельной регенерацией. Параметры воздуха на входе в компрессор $p_1 = 10^5$ *н/м*², $t_1 = 20°$ С, степень повышения давления в обеих ступенях одинакова и равна $\beta_1 = \beta_2 = 2{,}4$, 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 равно $2{,}4 \cdot 10^5$ *н/м*². Расход воздуха $250 \cdot 10^3$ *кг/ч*.

Определить параметры всех точек цикла, термический к. п. д. ГТУ и теоретическую мощность ГТУ. Теплоемкость воздуха рассчитывать по молекулярно-кинетической теории. Представить цикл ГТУ в *TS*-диаграмме.

Решение

На рис. 13-3 представлен в *TS*-диаграмме цикл для такой установки.

Рассчитываем температуры в точках цикла.

$$T_2 = T_1\left(\frac{p_2}{p_1}\right)^{\frac{k-1}{k}} = 293 \cdot 2{,}4^{\frac{1{,}4-1}{1{,}4}} = 376^\circ \text{ К};\ t_2 = 103^\circ \text{ С}.$$

Так как степень повышения давления во второй ступени такая же, как 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* рассчитывается:

$$T_8 = \frac{T_1 T_7}{T_2} = \frac{293 \cdot 1\,073}{376} = 836^\circ \text{ К или } t_8 = 563^\circ \text{ С}.$$

Так как по условию регенерация предельная, то

$$t_6 = t_8 = t_9 \text{ и } t_2 = t_4 = t_{10}.$$

При выбранном распределении параметров величины работы (и мощности) двух турбин одинаковы. Также одинаковы и мощности компрессоров.

Термический к. п. д. рассчитывается:

$$\eta_t = \frac{2l_0^{\text{т}} - 2l_0^{\text{к}}}{q_1} = \frac{2c_p(t_5 - t_6) - 2c_p(t_2 - t_1)}{2c_p(t_5 - t_6)} =$$

$$= \frac{(800 - 563) - (103 - 20)}{800 - 563} = 0{,}650.$$

Теоретическая мощность двух турбин равна:

$2N_0^{\text{т}} = 2Dc_p(t_5 - t_6)$; в эту формулу расход газа подставляется в *кг/сек*, а теплоемкость в *кдж/кг·град*

$$2N_0^{\text{т}} = 2 \cdot \frac{250 \cdot 10^3}{3\,600} \cdot \frac{8{,}314 \cdot 7}{2 \cdot 28{,}96}(800 - 563) = 33\,100 \text{ } квт.$$

Теоретическая мощность двух компрессоров равна:

$$2N_0^{\text{к}} = 2Dc_p(t_2 - t_1) = 2\,\frac{250 \cdot 10^3}{3\,600} \cdot \frac{8{,}314 \cdot 7}{2 \cdot 28{,}96}(103 - 20) = 11\,600 \text{ } квт.$$

Теоретическая мощность ГТУ равна:

$$N_0^{\text{ГТУ}} = 33\,100 - 11\,600 = 21\,500 \text{ } квт.$$

13-13. Газотурбинная установка работает с двухступенчатым сжатием и двухступенчатым расширением. Степень повышения давления в компрессорах (и понижения в турбинах) одинакова и равна $\beta_1=\beta_2=2{,}2$. В первый компрессор поступает воздух при $p=1$ *кГ/см*² и $t_1=20°$ С, после первого компрессора он охлаждается также до 20° С. Температура воздуха перед обеими турбинами одинакова и равна 820° С. Внутренние относительные к. п. д. компрессоров равны 0,83, а турбин — 0,86. Степень регенерации равна $\sigma=0{,}7$. Расход воздуха 250 *т/ч*.

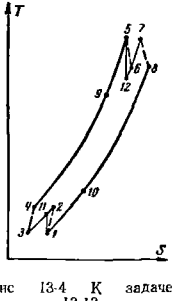


Рис. 13-4. К задаче 13-13.

Определить параметры во всех точках цикла, внутренний к. п. д. ГТУ, действительные мощности компрессоров, турбин и всей ГТУ. Представить цикл в *TS*-диаграмме. Принять, что тепловые характеристики воздуха рассчитываются с помощью молекулярно-кинетической теории теплоемкости.

Решение

На рис. 13-4 представлен цикл такой установки. Точки *11* и *12* относятся к обратимому сжатию и расширению.

Рассчитываем температуры в точках цикла:

$$T_{11}=T_1\left(\frac{p_{11}}{p_1}\right)^{\frac{k-1}{k}}=293\cdot 2{,}2^{\frac{1{,}4-1}{1{,}4}}=367°\text{ К};\ t_{11}=94°\text{ С}.$$

Для нахождения действительной температуры t_2 после первого компрессора необходимо воспользоваться формулой для относительного внутреннего к. п. д. компрессора, т. е.

$$\eta^{\text{к}}_{\text{oi}}=\frac{i_{11}-i_1}{i_2-i_1}=\frac{t_{11}-t_1}{t_2-t_1},$$

откуда

$$t_2=\frac{t_{11}-t_1}{\eta^{\text{к}}_{\text{oi}}}+t_1=\frac{94-20}{0{,}83}+20=109°\text{ С}.$$

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} рассчитывается:

$$T_{12}=\frac{T_1T_5}{T_{11}}=\frac{293\cdot 1\,093}{367}=873°\text{ К};\ t_{12}=600°\text{ С}.$$

Действительная температура после расширения в турбине рассчитывается с помощью величины $\eta^{\text{т}}_{\text{oi}}$, т. е.

$$t_6=t_5-\eta^{\text{т}}_{\text{oi}}(t_5-t_{12})=820-0{,}86\,(820-600)=630°\text{ С}.$$

Далее, так как $\beta_1=\beta_2$, а $t_5=t_7$, то $t_5=t_6=630°$ С.

Температуру воздуха, входящего в камеру сгорания (температуру после регенератора), t_9 находим с помощью величины степени регенерации σ:

$$\sigma = \frac{t_9 - t_4}{t_6 - t_4}.$$

Отсюда

$$t_9 = \sigma (t_6 - t_4) + t_4 = 0{,}7\ (630 - 109) + 109 = 474^\circ\ \text{C}.$$

Так как предполагается, что тепловые потери в регенераторе отсутствуют, то $t_2 - t_4 = t_6 - t_{10}$. Следовательно, $t_{10} = t_6 - (t_9 - t_4) = 630 - (474 - 109) = 265^\circ$ C.

Внутренний к. п. д. установки равен:

$$\eta_i^{\text{ГТУ}} = \frac{(t_5 - t_6) + (t_7 - t_8) - [(t_2 - t_1) + (t_4 - t_3)]}{(t_5 - t_6) + (t_7 - t_6)} =$$

$$= \frac{2\ (t_5 - t_6) - 2\ (t_2 - t_1)}{(t_5 - t_6) + (t_7 - t_8)} \approx \frac{2\ (820 - 630) - 2\ (109 - 20)}{(820 - 474) + (820 - 630)} = 0{,}373.$$

Действительная мощность двух турбин равна:

$$2N_{\text{д}}^{\text{т}} = \frac{2Dc_p\ (t_5 - t_6)}{860} = \frac{2 \cdot 250 \cdot 10^3 \cdot 1{,}985 \cdot 7\ (820 - 630)}{860 \cdot 2 \cdot 28{,}96} =$$

$$= 26\,400\ \textit{квт}.$$

Действительная мощность двух компрессоров равна:

$$2N_{\text{д}}^{\text{к}} = \frac{2Dc_p\ (t_2 - t_1)}{860} =$$

$$= \frac{2 \cdot 250 \cdot 10^3 \cdot 1{,}986 \cdot 7\ (109 - 20)}{860 \cdot 2 \cdot 28{,}96} = 12\,400\ \textit{квт}.$$

Действительная мощность ГТУ равна:

$$N_{\text{д}}^{\text{ГТУ}} = 26\,400 - 12\,400 = 14\,000\ \textit{квт}.$$

13-14. Швейцарской фирмой Эшер Висс спроектирована газотурбинная установка, работающая по замкнутой схеме, с нагреванием газа в атомном реакторе.

Схема установки дается ниже. Рабочим телом является гелий при 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:

$$p_1 = 30\ \textit{кГ/см}^2;\ t_1 = 32^\circ\ \text{C};\ p_2 = 46{,}6\ \textit{кГ/см}^2;$$

$$p_6 = 46{,}2\ \textit{кГ/см}^2;\ t_3 = 32^\circ\ \text{C};\ p_4 = 71{,}5\ \textit{кГ/см}^2;$$

$$p_5 = 70\ \textit{кГ/см}^2;\ t_5 = 469^\circ\ \text{C};\ p_6 = 69\ \textit{кГ/см}^2;\ t_6 = 760^\circ\ \text{C};$$

$$p_7 = 31\ \textit{кГ/см}^2,\ p_8 = 30{,}5\ \textit{кГ/см}^2.$$

Через ГТУ проходит 100 *кг/сек* гелия.

Внутренние относительные к. п. д. компрессоров равны 88%, внутренний относительный к. п. д. турбины $\eta_{0i}^{т}=88{,}9\%$.

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 ге-

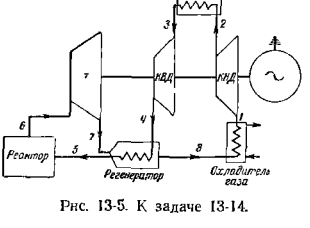


Рис. 13-5. К задаче 13-14.

нератора, приняв механический к. п. д. равным $\eta_м=0{,}985$, а к. п. д. генератора $\eta_г=0{,}976$.

Рассчитать электрический к. п. д. ГТУ. Представить цикл ГТУ в *TS*-диаграмме.

Ответ: $t_2=t_4=99°$ С; $t_7=506°$ С; $t_8=136°$ С. Действительная (на лопатках) мощность турбины $N_д^{т}=132\,000$ *квт*. Действительная мощность двух компрессоров $2N_д^{к}=69\,600$ *квт*. Мощность на клеммах электрического генератора $N_э=(132\,000-69\,600)0{,}985\cdot 0{,}976=60\,000$ *квт*; $\eta_э=39{,}8\%$.

13-15. Самолет с прямоточным воздушно-реактивным двигателем летит со скоростью 1 000 *км/ч*. Температура воздуха $t=-20°$ С.

Определить термический к. п. д. цикла, по которому работает двигатель.

Ответ: $\eta_t=0{,}132$.

13-16. Самолет летит со скоростью 900 *км/ч* при температуре воздуха 10° С. В дальнейшем скорость самолета снижается до 800 *км/ч* при полете его при температуре воздуха, равной 0° С.

Определить, насколько изменится термический к. п. д цикла воздушно-реактивного двигателя, стоящего на самолете.

Ответ: Термический к. п. д. меняется от $\eta_t=9{,}9\%$ до $\eta_t=8{,}2\%$. Влияние скорости полета сильнее, чем влияние температуры окружающей среды.

13-17. На рис. 13-6 изображены схема и цикл турбокомпрессорного реактивного двигателя, находящегося на самолете. Самолет летит со скоростью $c=850$ *км/ч* при параметрах воздуха $t=0°$ С, $p=0{,}4\cdot 10^5$ *н/м*^{2}. Известно, что степень увеличения давления в компрессоре $\beta=p_3/p_2=8$, а температура газов перед соплами турбины равна $t_4=800°$ 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.

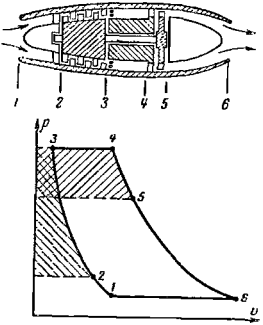


Рис. 13-6. К задаче 13-17.

Ответ: $t_2 = 27.7°$ С; $p_2 = 0{,}561 \cdot 10^5$ *н/м*^{2}; $p_3 = 4{,}49 \cdot 10^5$ *н/м*^{2};

$t_3 = 271{,}9°$ С; $t_5 = 555{,}9°$ С; $p_5 = 1{,}82 \cdot 10^5$ *н/м*^{2};

$t_6 = 264{,}7°$ С; $c_{вых} = 765$ *м/сек.*

13-18. Пользуясь данными предыдущей задачи, рассчитать термический к. п. д. цикла турбокомпрессорного реактивного двигателя, теоретические мощности турбины, компрессора и всего двигателя, приняв расход воздуха, проходящего через двигатель, равным $D = 50$ *т/ч.*

Ответ: $\eta_t = 0{,}50$. $N_0^т = N_0^к = 3\,407$ *квт*; $N_0^{двиг} = 3\,676$ *квт.*

14. ЦИКЛЫ ПАРОТУРБИННЫХ УСТАНОВОК

14-1. Рассчитать цикл Карно, который осуществляется насыщенным водяным паром. Установка работает по следующей схеме (рис. 14-1): сухой насыщенный пар давления $p_1 = 20$ *кГ/см*^{2} поступает в цилиндр паровой машины, где изоэнтропически расширяется до 0,1 *кГ/см*^{2}, после чего поступает в теплообменник; там влажный пар частично конденсируется до тех пор, пока его энтропия не становится равной $s_3 = 0{,}5822$ *ккал/кг* · °К. Пароводяная смесь сжимает-

ся 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, тепло q_1, подведенное в цикле и q_2 — отведенное нижнему источнику.

Ответ:

Параметры	№ точек			
	1	2	3	4
p, $кГ/см^2$	20,0	0,1	0,1	20,0
v, $м^3/кг$	0,1015	11,35	3,574	0,0012
t, °С	211,38	45,45	45,45	211,38
i, $ккал/кг$	668,5	479,3	182,1	215,9
s, $ккал/кг \cdot °К$	1,5161	1,5161	0,5822	0,5822
x	1,000	0,759	0,239	0,000

$\eta_t = 0{,}342$; $q_1 = 1894{,}9$ *кдж/кг*; $q_2 = 1244{,}3$ *кдж/кг*; $l = 650{,}6$ *кдж/кг*.

14-2. В установке, описанной в задаче 14-1, теплообменник (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.

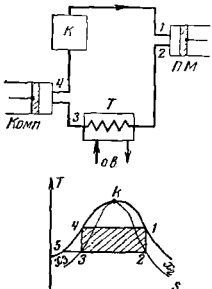


Рис. 14-1. К задаче 14-1.

Каков термический к. п. д. этого цикла; на сколько он уменьшился по отношению к $\eta_{t\,к}$? Начальное и конечное давления те же, что и в цикле задачи 14-1.

Ответ: $\eta_{t,р} = 0{,}304$; $\Delta\eta/\eta_{t\,к} = 11\%$.

14-3. Паротурбинная установка работает по циклу Ренкина при следующих параметрах пара: перед турбиной $p_1 = 90$ $кГ/см^2$ и $t_1 = 535°С$; давление в конденсаторе $p_2 = 0{,}04$ $кГ/см^2$ (рис. 14-2). Определить внешнюю работу 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: $l_т = 1\,435$ *кдж/кг*; $l_н = 8{,}7$ *кдж/кг*; $\eta_t = 0{,}426$; без учета работы насоса $\eta'_t = 0{,}428$; $\Delta\eta/\eta_t = 0{,}5\%$. 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 $p_1=100$ *кГ/см*² и $t_1=530°$ С. Давление в конденсаторе $p_2=0{,}04$ *кГ/см*²

Определить термический к. п. д. установки и сравнить его с термическим к. п. д. цикла Карно в том же интервале температур.

Ответ: $\eta_t=0{,}427$; $\eta_{t,к}=0{,}625$.

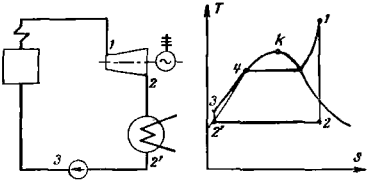


Рис. 14-2. К задаче 14-3.

14-5. Определить, какова должна быть температура пара перед входом в турбину, если его давление при этом $p_1=100$ *кГ/см*², давление в конденсаторе $p_2=0{,}04$ *кГ/см*², а влажность на выходе из турбины не должна превышать 15%? Задачу решить по таблицам.

Ответ: $t_1 \geqslant 738$ °С.

14-6. При одинаковой начальной температуре $t_1=500°$ С построить кривую зависимости η_t цикла паротурбинной установки от величины начального давления p_1, приняв его равным 50, 100, 150 и 200 *кГ/см*². Давление в конденсаторе одинаково и равно $p_2=0{,}04$ *кГ/см*². Учесть работу питательного насоса. Представить циклы в *Ts*-диаграмме.

Ответ: p_1, *кГ/см*²	50	100	150	200
η_t	0,395	0,423	0,435	0,442

14-7. При одинаковом начальном давлении $p_1=100$ *кГ/см*² построить кривую зависимости η_t цикла паротурбинной установки от начальной температуры t_1, приняв ее равной 450, 500, 550 и 600° С. Давление в конденсаторе одинаково и равно $p_2=0{,}05$ *кГ/см*² Учесть работу питательного насоса. Представить циклы в *Ts*-диаграмме.

Ответ: t_1, °С	450	500	550	600
η_t	0,412	0,419	0,427	0,434

14-8. Паротурбинная установка работает при параметрах пара перед турбиной $p_1=90$ *кГ/см*² и $t_1=535°$С. Построить кривую зависимости термического к. п. д. цикла от величины давления в конденсаторе, которое принять равным $p_2=0{,}02$, 0,04, 0,06 и 0,08 *кГ/см*².

Ответ: p_2, *кГ/см*²	0,02	0,04	0,06	0,08
η_t	0,442	0,426	0,416	0,409

14-9. Определить суточную экономию топлива, получающуюся в результате замены турбинной установки, работавшей при параметрах $p_1=35$ *кГ/см²* и $t_1=450°$ С, на установку с начальными параметрами $p_1=300$ *кГ/см²* и $t_1=650°$ С.

Давление в конденсаторах одно и то же и равно $p_2=0{,}04$ *кГ/см²*, мощность установки $N=50\,000$ *квт*, теплота сгорания топлива $Q_н^р=8\,000$ *ккал/кг*, а к. п. д. котельных установок $\eta_{ку}=0{,}80$ в старой и 0,90 в новой установке. Потерями во всех остальных частях (кроме котельного агрегата) пренебречь.

Ответ: 122 *т/сутки*.

14-10. Определить зависимость термического к. п. д. паротурбинной установки от начальных параметров пара, если при начальных и конечных давлениях, равных соответственно $p_1=30$ *кГ/см²* и $p_2=0{,}04$ *кГ/см²*, пар перед турбиной: а) имеет сухость $x=0{,}9$, б) сухой насыщенный; в) перегретый до температуры 450° С.

Ответ: а) $\eta_t=0{,}342$; б) 0,346; в) 0,371.

14-11. Паровая турбина мощностью 25 *Мвт* работает при начальных параметрах $p_1=100$ *кГ/см²* и температуре $t_1=510°$ С. Давление в конденсаторе $p_2=0{,}04$ *кГ/см²*. Теплота сгорания топлива $Q_н^р=7\,000$ *ккал/кг*.

Определить теплопроизводительность котельной установки и часовой расход топлива, если $\eta_{ку}=0{,}85$, а температура питательной воды $t_{пв}=90°$ С.

Ответ: $B=7\,770$ *кг/ч*; $Q_1=46{,}2$ *Гкал/ч*=53,8 *Мвт*.

14-12. Определить состояние пара за турбиной и подсчитать внутренний к. п. д. паротурбинной установки, если начальные параметры $p_1=130$ *кГ/см²* и $t_1=565°$ С, давление в конденсаторе $p_2=0{,}04$ *кГ/см²*, внутренние относительные к. п. д. турбины и питательного насоса соответственно равны $\eta_{oi}^т=0{,}85$ и $\eta_{oi}^н=0{,}87$.

Решение

Цикл, по которому работает установка, изображен на рис. 14-3.

Определим сначала состояние пара в конце изоэнтропического расширения пара в турбине. Начальную энтальпию и энтропию находим по таблицам [Л. 4]. Они равны $i_1=838{,}3$ *ккал/кг* и $s_1=1{,}5909$ *ккал/кг·°К*. Энтальпию пара в точке 2 находим, рассчитывая изоэнтропический процесс *1-2*:

$$x_2=\frac{s_1-s'_2}{s''_2-s'_2}=\frac{1{,}5909-0{,}0998}{2{,}0255-0{,}0998}=0{,}774;\ i_2=i'_2+r_2x_2=28{,}7+$$

$$+581{,}1\cdot0{,}774=478{,}5\ \textit{ккал/кг}.$$

Таким образом, изоэнтропический теплоперепад равен:

$$H_0=i_1-i_2=838{,}3-478{,}5=359{,}8\ \textit{ккал/кг}.$$

По определению

$$\eta_{oi}^т=\frac{i_1-i_{2д}}{i_1-i_2}=\frac{i_1-i_{2д}}{H_0}.$$

Следовательно,

$$i_1 - i_{2д} = \eta_{oi} H_0;\ i_{2д} = i_1 - \eta^т_{oi} H_0 =$$
$$= 838{,}3 - 0{,}85 \cdot 359{,}8 = 532{,}5\ ккал/кг.$$

Зная энтальпию, по таблицам легко найти остальные параметры (при $p_2 = 0{,}04\ кГ/см^2$):

$$x_{2д} = \frac{i_{2д} - i'_2}{r_2} = \frac{532{,}5 - 28{,}7}{581{,}1} = 0{,}867;$$

$$v_{2д} = v'_2 (1 - x_{2д}) + v''_2 x_{2д} = 0{,}0010 \cdot 0{,}133 +$$
$$+ 35{,}46 \cdot 0{,}867 = 30{,}74\ м^3/кг;$$

$$s_{2д} = s'_2 (1 - x_{2д}) + s''_2 x_{2д} = 0{,}0998 \cdot 0{,}133 +$$
$$+ 2{,}0255 \cdot 0{,}867 = 1{,}7694\ ккал/кг \cdot ° К.$$

Внутренний к. п. д. цикла определяется по формуле

$$\eta_i = \frac{H_0 \eta^т_{oi} - (i_3 - i_{2'})/\eta^н_{oi}}{i_1 - i_{2д}}.$$

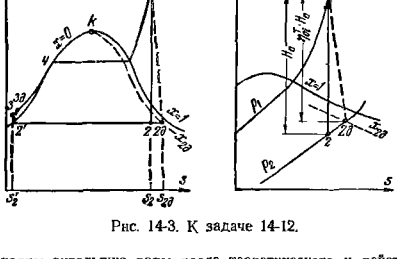


Рис. 14-3. К задаче 14-12.

Находим энтальпию воды после теоретического и действительного (с учетом потерь) сжатия в насосе. Энтальпия $i_{2'} = i'_2 = 28{,}7\ ккал/кг$; энтропия $s_{2'} = s'_2 = 0{,}0998\ ккал/кг \cdot °К$. Энтальпия в точке 3 определяется в результате расчета изоэнтропического процесса 2'-3 ($s_{2'} = \text{const}$). Интерполируя табличные данные ([Л. 4], табл. III), находим при давлении $p_3 = p_1 = 130\ кГ/см^2$ и $s_3 = 0{,}0998\ ккал/кг \cdot °К$ энтальпию $i_3 = 31{,}8\ ккал/кг$. Разность $i_3 - i_{2'} = 31{,}8 - 28{,}7 = 3{,}1\ ккал/кг$ представляет собой теоретическую работу насоса.

Энтальпия в конце сжатия $i_{3д}$ с учетом потерь определяется:

$$i_{3д} = \frac{i_3 - i_{2'}(1 - \eta^н_{oi})}{\eta^н_{oi}} = \frac{31{,}8 - 28{,}7(1 - 0{,}87)}{0{,}87} = 32{,}3\ ккал/кг.$$

Таким образом

$$\eta_i = \frac{359{,}8 - 0{,}85 \cdot 3{,}1/0{,}87}{838{,}3 - 32{,}3} = 0{,}375.$$

Определим теперь термический к. п. д. цикла Рэнкина (который не учитывает потери):

$$\eta_t = \frac{i_1 - i_2 - (i_2 - i_{2'})}{i_1 - i_2} = \frac{838{,}3 - 478{,}5 - 3{,}1}{838{,}3 - 31{,}8} = 0{,}442.$$

Если при определении внутреннего к. п. д. установки пренебречь работой насоса, то окажется, что:

$$\eta_i \approx \eta'_i = \frac{H_0 \eta^{\text{т}}_{0i}}{i_1 - i_{2'}} = \frac{i_1 - i_2}{i_1 - i_{2'}} \eta^{\text{т}}_{0i} = \eta'_t \eta^{\text{т}}_{0i} = 0{,}444 \cdot 0{,}85 = 0{,}377.$$

Здесь $\eta'_t = (i_1 - i_2)/(i_1 - i_{2'}) = (838{,}3 - 478{,}5)/(838{,}3 - 28{,}7) = 0{,}444$ есть несколько завышенный термический к. п. д. цикла, не учитывающий работу насоса.

Разница между η_i и η'_i в нашем случае составляет 0,53%. Приблизительно на такую же величину будет допущена ошибка и в определении расхода топлива. Тем не менее соотношение

$$\eta_i = \eta^{\text{т}}_{0i} \eta_t$$

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 и турбине составляют 33 *ккал/кг*.

Состояние пара перед турбиной $p_1 = 100$ *кГ/см*^{2}; $t_1 = 500°$ С, давление в конденсаторе $p_2 = 0{,}04$ *кГ/см*^{2}.

Ответ: $\eta^{\text{т}}_{0i} = 0{,}90$.

14-14. Определить параметры пара перед конденсатором, где давление $p_2 = 0{,}04$ *кГ/см*^{2}, если параметры пара перед турбиной $p_1 = 90$ *кГ/см*^{2} и $t_1 = 510°$ С, а внутренний относительный к. п. д. турбины $\eta^{\text{т}}_{0i} = 0{,}87$. Построить процесс в *is*- и *Ts*-диаграммах. Задачу решить, пользуясь таблицами.

Ответ: $x_{2д} = 0{,}854$; $i_{2д} = 525{,}0$ *ккал/кг*; $p_2 = 0{,}04$ *кГ/см*^{2}; $s_{2д} = 1{,}745$ *ккал/кг·°К*; $v_{2д} = 30{,}3$ *м*^{3}*/кг*.

14-15. Определить состояние пара за турбиной и подсчитать внутренний к. п. д. установки, если $p_1 = 110$ *кГ/см*^{2}; $t_1 = 550°$ С; $p_2 = 0{,}04$ *кГ/см*^{2} и внутренний относительный к. п. д. турбины $\eta^{\text{т}}_{0i} = 0{,}85$. Работу насоса не учитывать. Задачу решить, пользуясь *is*-диаграммой.

Ответ: $x_{2д} = 0{,}872$; $\eta_i = 0{,}372$

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 $p_1 = 40$ *кГ/см*². Этот пар и подается в турбину.

В установке по второму варианту в парогенераторе образуется перегретый пар с параметрами $p_1 = 16$ *кГ/см*² и $t_1 = 250°$ С.

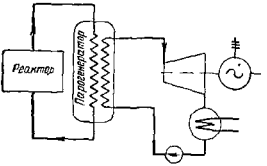


Рис 14-4. К задаче 14-16

Давление в конденсаторе одинаково для обеих установок и равно $p_2 = 0{,}04$ *кГ/см*², а внутренний относительный к. п. д. турбин $\eta_{oi}^{т} = 0{,}80$.

Циклы, по которым работают установки, изображены на рис. 14-5.

Ответ: $\eta_t^{I} = 0{,}291; \eta_t^{II} = 0{,}261$.

14-17. Определить к. п. д. станции брутто (т. е. без учета расхода энергии на собственные нужды), если параметры пара перед турбиной $p_1 = 90$ *кГ/см*², $t_1 = 535°$ С, давление в конденсаторе $p_2 = 0{,}04$ *кГ/см*² и если известны следующие к. п. д.: относительный

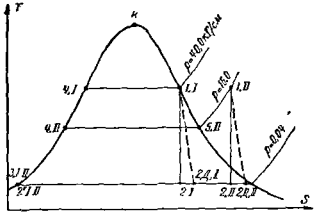


Рис. 14-5. К задаче 14-16.

внутренний $\eta_{oi} = 0{,}86$, механический $\eta_м = 0{,}95$, электрогенераторов $\eta_г = 0{,}98$, паропроводов (учитывающий потери паропроводами тепла в окружающую среду) $\eta_{пп} = 0{,}94$, котельных агрегатов $\eta_{ку} = 0{,}92$.

Работу насосов не учитывать.

Ответ: $\eta_{ст}^{бр} = 29{,}7\%$.

14-18. Мощность паротурбинной установки на клеммах электрогенератора равна $N_э = 50$ *Мвт*. Определить удельный расход топлива

$b_э$ и удельный расход тепла $q_э$ на 1 *Мдж* выработанной электроэнергии, а также часовой расход топлива $B_э$, если пар на входе в турбину имеет параметры p_1=35 *кГ/см²*, t_1=435° С, давление в конденсаторе p_2=0,04 *кГ/см²*.

Известны: внутренний относительный к. п. д. турбины η_{oi}=0,79, механический к. п. д. $\eta_м$=0,96, к. п. д. электрогенератора $\eta_г$=0,98 и к. п. д. котла $\eta_{ку}$=0,88. Теплота сгорания топлива $Q_н^р$=3 500 *ккал/кг*.

Ответ: $b_э$=0,258 *кг/Мдж*; $B_э$=48 350 *кг/ч*; $q_э$=3,93. Удельный расход тепла на 1 *Мдж* — безразмерная величина (размерность $[q_э]=\frac{дж}{дж}$).

14-19. Удельный расход пара на выработку электроэнергии в турбогенераторе, мощностью $N_э$=25 *Мвт* составляет $d_э$=2 *кг/Мдж*.

Каковы термический к. п. д. цикла, относительный эффективный к. п. д. турбины 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=90 *кГ/см²* и t_1=540° С. Давление пара на выходе из турбины (противодавление) p_2=6,5 *кГ/см²*. Температура питательной воды $t_{пв}$=140° С.

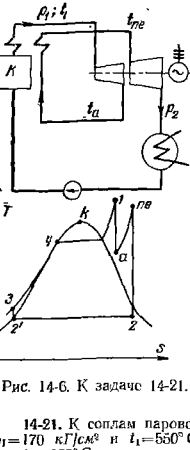


Рис. 14-6. К задаче 14-21.

Работа насоса не учитывается.

Ответ: η_t=0,243; η_{oe}=0,725; $D_э$=180 *т/ч*.

14-20. В паротурбинной установке, работающей с начальными параметрами p_1=110 *кГ/см²* и t_1=550° С, осуществляются два отбора на собственные нужды: при p_a=40 *кГ/см²* отбирается 20 000 *кг/ч* пара и при $p_б$=25 *кГ/см²* отбирается 10 000 *кг/ч*. Давление в конденсаторе p_2=0,04 *кГ/см²*.

Определить внутреннюю мощность турбины, если ее η_{oi}=0,80, а паропроизводительность котельной установки D=100 *т/ч*, и найти безразмерный удельный расход тепла. Работу питательного насоса не учитывать.

Ответ: N_1=25 350 *квт*; q_t=$1/\eta_t$=3,59.

14-21. К соплам паровой турбины поступает пар с параметрами p_1=170 *кГ/см²* и t_1=550° С. После изоэнтропического расширения до t_a=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=0,04 *кГ/см²* (рис 14-6).

Определить, насколько уменьшается влажность пара на выходе из турбины и насколько увеличивается термический к. п. д. цикла в результате введения вторичного перегрева. Каковы средние

интегральные температуры подвода и отвода тепла в цикле с промежуточным перегревом?

Ответ: Относительное уменьшение влажности

$$[\Delta(1-x)/(1-x)]100=29\%$$

Относительное увеличение термического к. п. д.

$$100\Delta\eta/\eta=2{,}9\%.$$

Средняя интегральная температура подвода тепла $T_{ср}=559°$ К.

14-22. Отработавший в цилиндре высокого давления (ц. в. д.) турбины пар давления $p_a=15$ *кГ/см²* направляется в промежуточный перегреватель.

До какой температуры нужно перегреть пар в промежуточном пароперегревателе, чтобы при дальнейшем изоэнтропическом расширении в ц. н. д. пар при конечном давлении $p_2=0{,}04$ *кГ/см²* имел бы сухость $x_2=0{,}9$?

Ответ: До $t_{пе}=535°$ С

14-23. Паротурбинная установка мощностью $N=200$ *Мвт* работает с паром следующих параметров: начальное давление $p_1=127{,}5\cdot10^5$ *н/м²*, температура $t_1=565°$ С. Промежуточный перегрев осуществляется при давлении $p_a=19{,}62\cdot10^5$ *н/м²* до первоначальной температуры $t_{пе}=565°$ С. Давление в конденсаторе $p_2=0{,}0392\cdot10^5$ *н/м²*. Температура питательной воды $t_п=160°$ С.

Определить часовой расход топлива B, *кг/ч*, если теплота сгорания топлива $Q_н^р=30\,000$ *кдж/кг*, а к. п. д. котельного агрегата $\eta_{ку}=0{,}91$. Потерями пренебречь.

Ответ: $B=49\,000$ *кг/ч*.

14-24. При проектировании мощной тепловой станции были сделаны расчеты в двух вариантах: 1) на начальные параметры $p_1=300$ *кГ/см²* и $t_1=650°$ С с двумя промежуточными перегревами пара до 565° С при давлениях 65 и 15 *кГ/см²* и 2) на параметры $p_1=220$ *кГ/см²* и $t_1=580°$ С с одним промежуточным перегревом до 565° С при давлении 34 *кГ/см²*. Давление в конденсаторе $p_2=0{,}04$ *кГ/см²*.

Сравнить термические к. п. д. циклов этих установок, не учитывая работу питательных насосов. Представить циклы в Ts-диаграмме.

Ответ: $\eta_{t,1}=0{,}504$; $\eta_{t,2}=0{,}477$.

14-25. Определить термический к. п. д цикла с предельной регенерацией тепла в паротурбинной установке, в которой пар перед турбиной имеет параметры $p_1=35$ *кГ/см²* и $t_1=435°$ С, а давление в конденсаторе $p_2=0{,}05$ *кГ/см²*.

Вода подогревается до температуры $t_п=130°$ С. Работу насоса не учитывать.

Ответ: $\eta_{t,\,п}^{пред}=40{,}9\%$.

14-26. Турбина, в которую поступает пар с параметрами $p_1=90$ *кГ/см²* и $t_1=535°$ С, имеет один регенеративный отбор при $p^o=3$ *кГ/см²* в смешивающий подогреватель. Давление за турбиной $p_2=0{,}04$ *кГ/см²*.

Найти термический к. п. д. регенеративного цикла и сравнить его с термическим к. п. д цикла с предельной регенерацией тепла

при условии, что в последнем цикле вода подогревается до той же температуры, что и в цикле с одним смешивающим подогревателем [1].

Ответ: $\eta_{t.\,p} = 0{,}457$; $\eta_{t.\,p}^{\text{пред}} = 0{,}470$.

14-27. *В* паровую турбину (рис. 14-7) поступает пар с параметрами $p_1 = 90$ *кГ/см*² и $t_1 = 540°$ С. Турбина имеет два регенератив-

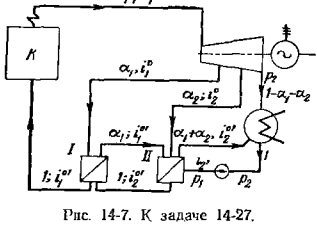


Рис. 14-7. К задаче 14-27.

ных отбора в подогреватели поверхностного типа с каскадным сбросом конденсата греющего пара. Давления отборов $p_1^0 = 5{,}0$ *кГ/см*² и $p_2^0 = 1{,}2$ *кГ/см*². Давление в конденсаторе $p_2 = 0{,}04$ *кГ/см*².

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 *is*-диаграмме и таблицам необходимые для расчета величины энтальпий: $i_1 = 833$; $i_2 = 488$; $i_1^0 = 653$; $i_2^0 = 594$; $i_1^{o\prime} = 152$; $i_2^{o\prime} = 104$ и $i_{2\prime} = 29$ *ккал/кг*.

Для того чтобы найти значения отборов α_1 и α_2, составляем балансы подогревателей. Баланс 1-го подогревателя:

$$\alpha_1 (i_1^0 - i_1^{o\prime}) = i_1^{o\prime} - i_2^{o\prime}.$$

Баланс 2-го подогревателя

$$\alpha_2 (i_2^0 - i_2^{o\prime}) + \alpha_1 (i_1^{o\prime} - i_2^{o\prime}) = i_2^{o\prime} - i_{2\prime}.$$

Решая их совместно, находим $\alpha_1 = 0{,}0958$ и $\alpha_2 = 0{,}1430$.

---

[1] Во всех задачах на регенеративные циклы считается, что в подогревателях вода нагревается до температуры конденсата греющего пара. Работа насосов не учитывается.

Термический к. п. д. регенеративного цикла

$$\eta_{t,\,p} = l_ц/q_1 = \frac{i_1 - i_2 - \alpha_1 (i_1^0 - i_2) - \alpha_2 (i_2^0 - i_2)}{i_1^0 - i_1^{0\prime}} = \frac{314}{681} = 0{,}461.$$

Удельный расход пара

$$d = \frac{1}{i_ц\ дж/кг}\ кг/дж = \frac{10^3}{314 \cdot 4{,}1868} = 0{,}762\ кг/Мдж =$$

$$= 0{,}762 \cdot 3{,}6 = 2{,}74\ кг/квт \cdot ч.$$

Термический к. п. д. цикла без регенерации (цикла Рэнкина)

$$\eta_t = \frac{i_1 - i_2}{i_1 - i_{2'}} = \frac{345}{804} = 0{,}429.$$

Удельный расход пара для этого цикла

$$d = \frac{1}{l_ц\ дж/кг}\ кг/дж = \frac{10^3}{345 \cdot 4{,}1868} =$$

$$= 0{,}693\ кг/Мдж = 2{,}49\ кг/квт \cdot ч.$$

Экономия, полученная в результате введения регенеративного подогрева,

$$100\Delta\eta/\eta_t = \frac{\eta_{t,\,p} - \eta_t}{\eta_t} 100 = \frac{0{,}461 - 0{,}429}{0{,}429} \cdot 100 = 7{,}5\%.$$

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. котла $\eta_{ку} = 0{,}90$, теплота сгорания топлива $Q_н^p = 28\,000$ *кдж/кг*, а остальные условия те же, что и в задаче 14-27.

Ответ: $\eta_{t,\,p} = 0{,}467$; $100\Delta\eta/\eta = 8{,}9\%$; $B = 15{,}3$ *т/ч*.

14-29 *. Как известно из общей теории регенеративных циклов, для каждого числа n регенеративных отборов существует наивыгоднейшая термодинамическая температура регенеративного подогрева, растущая с увеличением числа отборов.

В реальных, с конечным числом отборов, установках повышение температуры питательной воды сверх термодинамически наивыгоднейшей приводит к увеличению внутренней необратимости в теплообменниках, а тем самым к снижению к. п. д. цикла вместо дальнейшего его повышения. Иными словами, при фиксированном числе отборов n температуру регенеративного подогрева целесообразно увеличивать только до такой величины, при которой выигрыш

* Условия заимствованы из [Л. 14].

от уменьшения внешней необратимости цикла компенсирует увеличение внутренней необратимости в теплообменниках, так как только при этих условиях к. п. д. регенеративного цикла при данном n будет максимальным.

Определить наивыгоднейшую температуру питательной воды и максимально возможный к. п. д. регенеративного цикла при параметрах: $p_1=90$ *кГ/см*², $t_1=480^\circ$ С, $p_2=0{,}04$ *кГ/см*² и числе отборов $n=5$.

Решение

Наивыгоднейшая температура в первом приближении может быть определена по соотношению [Л. 14]:

$$(\theta_n)_1^{\text{наив}} = \sqrt[n+1]{T_2 T_{1,\text{К}}^n},\ ^\circ\text{К},$$

где n — число отборов;

T_2, °К — температура конденсата при p_2;

$T_{1,\text{К}}$, °К — верхняя температура цикла Карно, равновеликого по к. п. д. с рассматриваемым циклом,

$$T_{1,\text{К}} = \frac{T_2}{1-\eta_{t,\text{р}}^{\text{макс}}};$$

$\eta_{t,\text{р}}^{\text{макс}}$ — максимально возможный при данном числе отборов к. п. д. Решение проводим по таблицам и *is*-диаграмме. В качестве первого приближения примем, что $T_{1,\text{К}}=T_{s,1}$, т. е. температуре насыщения при давлении $p_1=90$ *кГ/см*². $T_{1,\text{К}}=T_{s,1}=575{,}1^\circ$ К. Отсюда

$$(\theta_n)_1^{\text{наив}} = \sqrt[6]{T_2 T_{s,1}^5} = \sqrt[6]{301{,}8 \cdot 575{,}1^5} = 516{,}5^\circ\text{ К}.$$

Здесь

$$T_2 = t_2 + 273{,}15 = 28{,}64 + 273{,}15 = 301{,}8^\circ\text{ К}.$$

Определим к. п. д. в первом приближении по формуле, полученной в [Л. 14]:

$$(\eta_{t,\text{р}})_1^{\text{макс}} = 1 - \frac{(s_1 - s'_2) - n\left(1 - \sqrt[n]{T_2/\theta_n}\right)}{i_1 - (i_{0,\text{в}} + t_{\text{пв}})} T_2,$$

где $s_1 - s'_2$ — разность энтропий, соответственно взятых при параметрах p_1, t_1 и p_2; $i_{0,\text{в}}$ — энтальпия воды при p_2 и $t=0^\circ$ С; $t_{\text{пв}}$, °С — температура питательной воды. По таблицам определяем $s_1 - s'_2 = 1{,}4774$ *ккал/кг*· °К; $i_1=796{,}7$ *ккал/кг*; $i_{0,\text{в}}=2{,}2$ *ккал/кг*; $t_{\text{пв}} = (\theta_n)_1^{\text{наив}} - 273{,}2 = 243{,}3^\circ$ С.

$$(\eta_{t,\text{р}})_1^{\text{макс}} = 1 - \frac{1{,}4774 - 5\left(1 - \sqrt[5]{\frac{301{,}8}{516{,}5}}\right)}{796{,}7 - (2{,}2 + 243{,}3)} 301{,}8 = 1 - 0{,}529 = 0{,}4710.$$

Определим наивыгоднейшую температуру во втором приближении по точной формуле [Л. 14]:

$$(\theta_n)_{II}^{наив} = \frac{T_g}{\left[1-(\eta_{t.p})_I^{макс}\right]^{\frac{n}{n+1}}} = \frac{301,8}{(1-0,4710)^{5/6}} = 513,1^\circ\ К.$$

Проверяем правильность выбора к. п. д. по приближенной температуре $T_{1,K}$, т. е. определяем к. п. д. во втором приближении

$$(\eta_{t.p})_{II}^{макс} = 1 - \frac{1,4774 - 5\left(1-\sqrt[5]{\frac{301,8}{513,1}}\right)}{796,7-(2,2+240,0)} \cdot 301,8 = 0,4710.$$

Таким образом, значения $\theta_n^{наив} = 240^\circ$ С и $\eta_{t.p}^{макс} = 0,471$ являются окончательными.

14-30. *Определить* наивыгоднейшую температуру регенеративного подогрева питательной воды, если установка имеет три отбора, а начальные и конечные параметры: $p_1 = 130$ *кГ/см²*; $t_1 = 540^\circ$ С; $p_2 = 0,04$ *кГ/см²*.

Ответ. $\theta_n^{наив} = 244,7^\circ$ С.

14-31. Теплофикационная турбина с противодавлением работает с входными параметрами пара $p_1 = 90$ *кГ/см²* и $t_1 = 535^\circ$ С. Противодавление $p_2 = 3$ *кГ/см²*. Отработанный пар отправляется на производство и полностью возвращается на ТЭЦ в виде конденсата с энтальпией $i_к = 400$ *кдж/кг*. Внутренний относительный к. п. д. турбины $\eta_{oi} = 0,85$.

Пренебрегая прочими потерями, определить величину выработки электрической энергии на единицу отданного потребителю тепла.

Ответ: $\xi = 0,302$ *дж эл.-эн/дж тепла* $= 0,351$ *кет · ч/Мкал*

14-32. На ТЭЦ установлена турбина ПТ-12-35/10 мощностью $N = 12\,000$ *квт*, в которой работает пар с начальными параметрами $p_1 = 35$ *кГ/см²* и $t_1 = 435^\circ$ С. Турбина имеет два отбора. Первый — производственный при $p_1^o = 10$ *кГ/см²*, величина отбора $D_1^o = 50$ *т/ч*. Второй — теплофикационный при $p_2^o = 1,2$ *кГ/см²*. $D_2^o = 40$ *т/ч*.

Определить часовой расход пара через турбину, если известны: относительный внутренний к. п. д. $\eta_{oi} = 0,80$; механический к. п. д. $\eta_м = 0,95$ и к. п. д электрогенератора $\eta_г = 0,98$.

Ответ: $D = 99,1$ *т/ч*.

14-33. Определить часовой расход топлива для установки с турбиной, описанной в задаче 14-32, если к. п. д. котельного агрегата $\eta_{ку} = 0,90$, теплота сгорания топлива $Q_н^р = 30\,000$ *кдж/кг* и температура питательной воды $t_{пв} = 120^\circ$ 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 тепла — в отопительной котельной. Коэффициент полезного действия всех котлов, $\eta_{ку} = 0,90$; температура возвращаемого полностью конденсата равна $t_к = 60^\circ$ С.

Ответ: Часовой расход топлива на ТЭЦ $B=10{,}22$ *т/ч*; на конденсационной станции $B_к=4{,}96$ *т/ч*; в отопительной котельной $B_{от}=8{,}77$ *т/ч*. Экономия топлива за счет введения теплофикации составляет $B_к+B_{от}-B=3{,}51$ *т/ч*.

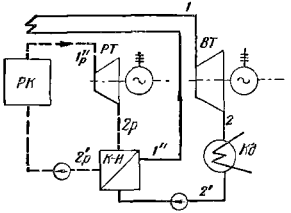


Рис. 14-8. К задаче 14-34.

РК — ртутный котел; *РТ* — ртутная турбина; *К-И* — конденсатор-испаритель; *ВТ* — пароводяная турбина; *КД* — конденсатор.

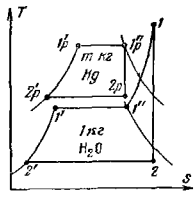


Рис. 14-9. К задаче 14-34.

14-34. Бинарная ртутно-водяная установка работает по схеме рис. 14-8. Ртутный котел вырабатывает сухой насыщенный пар давления $p_1^р=9$ *кГ/см²*, который направляется в ртутную турбину; отработанный пар давления $p_2^р=0{,}06$ *кГ/см²* идет в конденсатор-

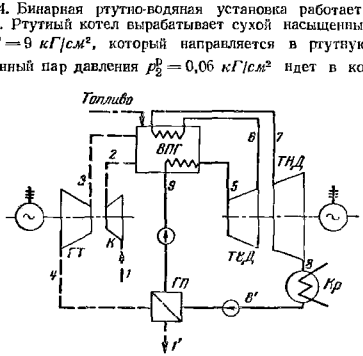


Рис. 14-10. К задаче 14-35.

испаритель, где отдает тепло 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: $p_1=25$ *кГ/см*^{2}; $t_1=520°$ С; давление в конденсаторе $p_2=0{,}04$ *кГ/см*^{2}.

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: $\eta_t=0{,}557$; $\eta_{t.к}=0{,}620$; $\eta_t:\eta_{t.к}=0{,}90$.

14-35. Парогазовая установка работает по следующей схеме (рис. 14-10): воздух из атмосферы (состояние *1*) сжимается компрессором *К* (состояние *2*) и подается в топочное устройство высоконапорного парогенератора *ВПГ*, где сгорает топливо. Продукты сгорания сначала передают часть своего тепла нагретой до температуры кипения воде и водяному пару, циркулирующим в особом контуре, а затем направляются в газовую турбину *ГТ* (состояние *3*), в которой, адиабатически расширясь, 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 в парогенератор *ВПГ*, где испаряется и перегревается (состояние *5*). Перегретый пар, отработав в турбине высокого давления *ТВД* (состояние *6*), снова перегревается за счет тепла топочных газов *ВПГ* (состояние *7*), затем работает в турбине низкого давления *ТНД* (состояние *8*), после чего конденсируется в конденсаторе *Кр*. Водяной цикл, таким образом, замыкается. Идеальный бинарный цикл этой установки изображен на рис. 14-11.

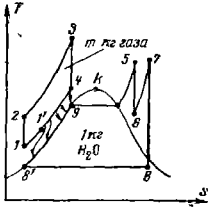


Рис. 14-11. К задаче 14-35

Рассчитать термический к. п. д. идеального бинарного парогазового цикла, если известны следующие параметры:

Газ: $p_1=0{,}981\cdot10^5$ *н/м*^{2}; $t_1=20°$ С; $t_3=800°$ С; $t_{1'}=120°$ С; $\beta=p_2/p_1=8$.

Вода и водяной пар: $p_6=127{,}5\cdot10^5$ *н/м*^{2}; $t_6=565°$ С; $p_6=p_7=29{,}4\cdot10^5$ *н/м*^{2}; $t_7=565°$ С; $p_8=0{,}0392\cdot10^5$ *н/м*^{2}.

Найти отношение этого к. п. д. к к к п. д. цикла Карно для максимальной и минимальной температур бинарного цикла.

Газ считать обладающим свойствами воздуха. Теплоемкость газа c_p считать не зависящей от температуры. Работой водяных насосов пренебречь.

Решение

Прежде всего определяем «недостающие» температуры в точках *2* и *4* газового цикла.

$$T_2=T_1\beta^{\frac{k-1}{k}}=293^{\frac{1{,}4-1}{1{,}4}}=531°\text{ К};$$

$$T_4=T_3\frac{T_1}{T_2}=1\,073\frac{293}{531}=592°\text{ К}.$$

Из баланса тепла в *ГП* определяем кратность газа по отношению к воде, т. е. количество килограммов газа, приходящегося на 1 *кг* воды. Тепловой баланс записывается:

$$m(i_4 - i_{1'}) = i_9 - i_{8'}.$$

Откуда

$$m = \frac{i_9 - i_{8'}}{i_4 - i_{1'}} = \frac{i_9 - i_{8'}}{c_p(T_4 - T_{1'})} = \frac{363,4 - 28,7}{0,240(592 - 393)} = 7,008 \quad \frac{кг\ газа}{кг \cdot H_2O}.$$

Здесь энтальпии i_9 и $i_{8'}$, *ккал/кг*, найдены из таблиц [Л. 4] соответственно при $p_9 = 127,5 \cdot 10^5$ *н/м²* = 130 *кГ/см²*; $t_9 = 565°$ С и $p_{8'} = p_8 = 0,0392 \cdot 10^5$ *н/м²* = 0,04 *кГ/см²*.

Термический к. п. д. бинарного цикла

$$\eta_t = \frac{m[(i_2 - i_3) - (i_2 - i_1)] + (i_5 - i_6) + (i_7 - i_8)}{m(i_2 - i_2) + (i_5 - i_6) + (i_7 - i_6)} =$$

$$= \frac{7,008[0,240(1\,073 - 592) - 0,240(531 - 293)] +}{7,008 \cdot 0,240(1\,073 - 531) + (838,3 - 363,4) +}$$

$$\frac{+ (838,3 - 731,6) + (860,7 - 533,7)}{+ (860,7 - 731,6)} = 0,556.$$

Энтальпии воды и водяного пара i_3, i_7, i_9 найдены по таблицам при заданных параметрах, а $i_{8'}$, i_8 получены в результате расчета изоэнтропических процессов. Теплоемкость газа $c_p = \frac{1,986 \cdot 7}{2 \cdot 28,96} =$ $= 0,240$ *ккал/кг·град*.

Коэффициент полезного действия цикла Карно

$$\eta_{t,K} = 1 - T_8/T_2 = 1 - 302/1\,073 = 0,719.$$

Отношение

$$\eta_t/\eta_{t,K} = 0,556/0,719 = 0,77.$$

14-35. Парогазовая установка осуществлена по схеме рис. 14-10 с рабочими телами, имеющими те же параметры в основных точках цикла, что и в задаче 14-35.

Рассчитать внутренний к. п. д. действительного цикла *ПГУ* (рис. 14-12), если дополнительно известны: внутренние относительные к. п. д. компрессора и газовой турбины $\eta_{oi}^{K} = 0,85$ и $\eta_{oi}^{т} = 0,87$, внутренний относительный к. п. д. пароводяных турбин $\eta_{oi}^{вт} = 0,85$. Известно также, что в газовом подогревателе *ГП* вода нагревается до $t_{1_0} = 300°$ С, а газ охлаждается до $t_{1'} = 120°$ С.

Ответ: $\eta_i = 0,440$.

14-37. Рассчитать внутреннюю мощность (на лопатках турбин) парогазовой установки, описанной в задачах 14-35 и 14-36, если известно, что часовой расход водяного пара через турбины составляет $D_п=40$ *т/ч*.

Ответ: $N_i=24{,}3$ *Мвт*.

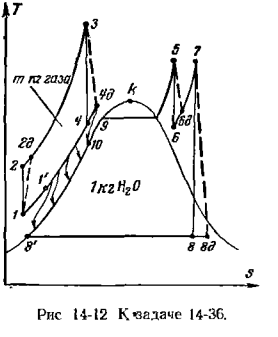


Рис 14-12 К задаче 14-36.

15. ЦИКЛЫ ХОЛОДИЛЬНЫХ МАШИН

15-1. Воздушная холодильная машина должна обеспечить температуру в охлаждаемом помещении $t_{охл}=-5°$ С при температуре окружающей среды $t_0=20°$ С.

Холодопроизводительность машины 200 000 *ккал/ч*. Давление воздуха на выходе из компрессора $p_2=5$ *кГ/см²*, в холодильной камере $p_1=1$ *кГ/см²*.

Определить мощность двигателя для привода машины, расход воздуха, холодильный коэффициент и количество тепла, передаваемое окружающей среде. Подсчитать холодильный коэффициент машины, работающей по циклу Карно в том же интервале температур. Представить цикл в *Ts*-диаграмме.

Ответ: $N=136$ *квт*; $m=10\,000$ *кг/ч*; $\varepsilon=1{,}7$; $\varepsilon_К=10{,}7$, $Q_1=316\,800$ *ккал/ч*.

15-2. Определить мощность двигателя холодильной машины, если температура охлаждаемого помещения $t_{охл}=-10°$ С, окружающей среды $t_0=25°$ С при холодопроизводительности 150 000 *ккал/ч*. Максимальное давление воздуха $p_2=5$ *кГ/см²*, $p_1=1$ *кГ/см²*. Представить цикл в *Ts*-диаграмме

Ответ: $N=97$ *квт*.

15-3. Воздушная холодильная машина производит лед при температуре $-3°$ С из воды с температурой 10° С. Всасываемый в компрессор воздух имеет температуру $t_1=-10°$ С, давление $p_1=0{,}98\cdot10^5$ *н/м²* и сжимается до давления $p_2=3{,}92\cdot10^5$ *н/м²* Посту-

пая в холодильник, воздух охлаждается до $t=20°$ С. Расход воздуха равен 1 000 $м^3/ч$

Определить холодильный коэффициент ε, мощность, потребную для привода компрессора, и количество полученного в час льда.

Решение

Определим температуры воздуха T_2 после сжатия в компрессоре и T_4 — после расширения в цилиндре детандера (расширительного цилиндра):

$$T_2 = T_1\left(\frac{p_2}{p_1}\right)^{\frac{k-1}{k}} = 263\left(\frac{3{,}92}{0{,}98}\right)^{\frac{1{,}4-1}{1{,}4}} = 373°\ \text{К};$$

$$T_4 = T_3\left(\frac{p_1}{p_2}\right)^{\frac{k-1}{k}} = 293\left(\frac{0{,}98}{3{,}92}\right)^{\frac{1{,}4-1}{1{,}4}} = 206{,}5°\ \text{К}.$$

Для того чтобы 1 *кг* воды при температуре 10° С превратить в лед при температуре —3° С, необходимо отнять от нее, во-первых, тепло q_1, идущее на охлаждение воды до 0° С и равное $q_1=c_B(t_2-t_1)=1\cdot 10$ *ккал/кг*; во-вторых,— теплоту плавления льда $q_2=79$ *ккал/кг*, в-третьих,— тепло $q_3=c_л(t_1-t_3)=0{,}5\,[0-(-3)]=1{,}5$ *ккал/кг*, отнимаемое для того, чтобы понизить температуру льда от 0 до —3° С. ($c_л$ — теплоемкость льда)

Общее количество тепла q, которое необходимо отнять у воды, равно.

$$q=10+79+1{,}5=90{,}5\ \textit{ккал/кг}.$$

Часовой запас холода в воздухе равен:

$$Q_0=V_0c'_B(t_1-t_4)=1\,000\cdot 0{,}31\,(263{,}0-206{,}5)=17\,500\ \textit{ккал/ч}.$$

Часовое количество полученного в холодильной установке льда

$$G=\frac{17\,500}{90{,}5}=193\ \textit{кг/ч}.$$

Холодильный коэффициент

$$\varepsilon=\frac{T_1}{T_2-T_1}=\frac{263}{373-263}=2{,}39.$$

Работа $L=\dfrac{Q_0}{\varepsilon}=\dfrac{17\,500}{2{,}39}=7\,320$ *ккал/ч*.

Искомая мощность $N=\dfrac{7\,320}{860}=8{,}5$ *квт*.

15-4. Воздушная холодильная машина производит в час 198 *кг* льда при температуре —6° С из воды с температурой 12° С. Воздух в компрессоре сжимается от давления $p_1=0{,}98\cdot 10^5$ $н/м^2$ до $p_2=4{,}9\cdot 10^5$ $н/м^2$ и $t_2=140°$ С. Сжатый воздух охлаждается в холодильнике до 30° С.

Определить часовой расход воздуха и потребную на машину мощность.

Ответ: $m_{\text{возд}}=1\,110$ *кг/ч*; $N=12{,}2$ *квт*.

15-5. Воздушная холодильная установка имеет холодопроизводительность 200 000 *ккал/ч*. Параметры воздуха на выходе из холодильной камеры $p_1=1$ *кГ/см*^{2} и $t_1=-3°$ С. После сжатия воздух имеет давление 4 *кГ/см*^{2}, 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; $N_к=418$ *квт*; $N_{дет}=305$ *квт*; $\varepsilon=2{,}16$; $\varepsilon_к=11{,}7$.

15-6. Паровая компрессорная холодильная установка, схема которой представлена на рис. 15-1, в качестве рабочего тела исполь-

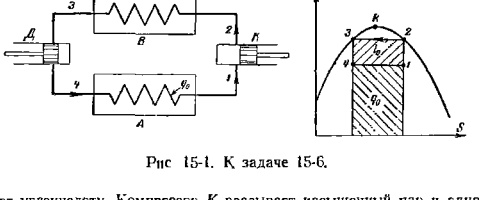


Рис 15-1. К задаче 15-6.

зует углекислоту. Компрессор K всасывает насыщенный пар и адиабатически сжимает его, превращая в сухой насыщенный пар давления, соответствующего температуре конденсации $t_2=20°$ С. Из компрессора углекислота поступает в конденсатор B, где при постоянном давлении превращается в жидкость, после чего расширяется в расширительном цилиндре $Д$ до давления, соответствующего температуре испарения $t_1=10°$ С, при этой же температуре углекислота поступает в охлаждаемое помещение, где, забирая *теплоту от охлаждаемых тел, испаряется, образуя влажный пар* со степенью сухости x_1.

Определить удельную холодопроизводительность холодильной установки, тепло, отданное в конденсаторе, работу, затраченную в цикле, и холодильный коэффициент.

Решение

Удельная холодопроизводительность установки, т. е. количество теплоты, поглощаемое 1 *кг* углекислоты в охлаждаемом помещении, равна:

$$q_0=i_1-i_4=r_1(x_1-x_4),\ \textit{ккал/кг}.$$

По табл. 25 приложений находим при $t_1=-10°$ С величину $r_1=62{,}5$ *ккал/кг*.

Значения x_1 и x_2 определяем при помощи таблиц по формуле

$$s_x=s_1=s'_1+(s''_1-s'_1)x_1.$$

По табл. 25 имеем: $s'_1=0{,}9737$ *ккал/кг*·°К; $s''_1=1{,}2163$ *ккал/кг*·°К $s''_2=1{,}1734$ *ккал/кг*·°К. Следовательно,

$$x_1=\frac{s''_2-s'_1}{s''_1-s'_1}=\frac{1{,}1734-0{,}9737}{1{,}2163-0{,}9737}=0{,}821.$$

В точке *4* определяется степень сухости x_4:

$$x_4=\frac{s'_3-s'_1}{s''_1-s'_1}=\frac{1{,}0468-0{,}9737}{1{,}2163-0{,}9737}=0{,}288.$$

Следовательно, отданное в конденсаторе тепло

$$q=i_2-i_3=r_2$$

Согласно табл 25 при $t=20°$ С, $r_2=q=37{,}1$ *ккал/кг*=155,3 *кдж/кг*.

Удельная холодопроизводительность q_0 равна:

$$q_0=62{,}5(0{,}821-0{,}288)=33{,}2\ \textit{ккал/кг}=139{,}0\ \textit{кдж/кг}$$

Работа, затраченная в цикле, равна

$$l=q-q_0=37{,}1-33{,}2=3{,}9\ \textit{ккал/кг}=16{,}3\ \textit{кдж/кг}.$$

Холодильный коэффициент

$$\varepsilon=\frac{q_0}{l}=\frac{139{,}0}{16{,}3}=8{,}53.$$

15-7. Компрессор *К* холодильной установки всасывает пары фреона-12 при $t_1=-15°$ С и степени сухости $x_1=0{,}92$ и адиабати-

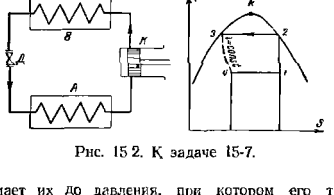


Рис. 15 2. К задаче 15-7.

чески сжимает их до давления, при котором его температура $t_2=30°$ С и сухость $x_2=1$. Из компрессора фреон-12 поступает в конденсатор *B* (рис. 15-2), 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 *А*, из которого выходит со степенью сухости $x_1=0{,}92$. 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 $Q_0=50\,000$ *ккал/ч*.

Ответ. $N_{теор}=18{,}5$ *квт*; $m_{ф.р}=1{,}990$ *кг/ч*; $m_в=8\,230$ *кг/ч*.

15-8. Компрессор аммиачной холодильной установки имеет теоретическую мощность 40 *квт*. Из компрессора сухой насыщенный

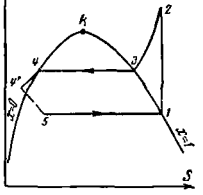


Рис. 15-3. К задаче 15 9

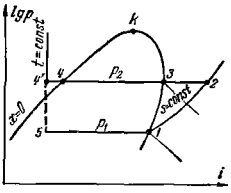


Рис. 15-4. К задаче 15-9

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.

Ответ: $Q_0=980\,000$ *кдж/ч*

15-9. В паровых компрессорных холодильных установках замена расширительного цилиндра дроссельным вентилем приводит к снижению холодопроизводительности. Частично эта потеря может быть уменьшена путем переохлаждения жидкости ниже температуры конденсации (рис. 15-3). Как показано на рисунке, конденсат переохлаждается до температуры $t_{4'}$, лежащей ниже температуры конденсации t_4. Требуется определить холодильный коэффициент и теоретическую мощность двигателя холодильной машины, работающей на фреоне-12. Холодопроизводительность компрессора $Q_0=140\,000$ *ккал/ч*. Температура испарения фреона 12 $t_1=-15°$ С, температура конденсации $t=30°$ С, температура рабочего тела перед дроссельным вентилем $t_{4'}=25°$ С

Задачу решить, пользуясь диаграммой *i*-lg *p*.

Диаграмма *i*-lg *p* имеет много преимуществ, вследствие чего она часто употребляется при расчетах в холодильной технике: она позволяет определять в виде отрезков прямых характеристики рабочего процесса холодильных установок.

Решение

На рис. 15-4 изображен цикл холодильной установки в *i*-lg *p* диаграмме.

Начальное состояние пара, поступающего в компрессор, определяется пересечением изобары $p_1=1{,}86$* *кГ/см*^{2}, соответствующей

* По табл. 27 приложений

температуре насыщения фреона $t_1 = -15°$ С, с кривой насыщения. Адиабатический процесс сжатия фреона в компрессоре изобразится линией *1-2* ($s = \text{const}$), причем точка *2* получается в пересечении этой линии с изобарой $p_2 = 7{,}58$*, соответствующей температуре насыщения фреона $t_2 = 30°$ С. Процесс конденсации изобразится линией *3-4*, а процесс переохлаждения линией *4-4'* Процесс дросселирования условно изобразится линией *4'-5*

Из диаграммы *i-lg p* находим (рис. 15-5):

$i_1 = i''_1 = 135{,}3$ *ккал/кг*; $i_2 = 141{,}5$ *ккал/кг* Принимая, что энтальпии переохлажденной жидкости равна энтальпии насыщенной жидкости при температуре 25° С, находим из диаграммы $i'_4 = i_5 = 105{,}6$ *ккал/кг*

Холодопроизводительность q_0 равна $q_0 = i_1 - i_5 = 135{,}3 - 105{,}6 = 29{,}7$ *ккал/кг* $= 124{,}3$ *кдж/кг*

Часовой расход фреона-12.

$$m_{\text{фр}} = \frac{Q_0}{q_0} = \frac{140\,000}{29{,}7} = 4\,714 \text{ кг/ч}.$$

Теоретическая затрата работы в компрессоре:

$$l_к = i_2 - i_1 = 141{,}5 - 135{,}3 = 6{,}2 \text{ ккал/кг} = 26{,}0 \text{ кдж/кг}.$$

Теоретическая мощность двигателя холодильной машины

$$N_{\text{теор}} = \frac{m_{\text{фр}} l_к}{3\,600} = \frac{4\,714 \cdot 26{,}0}{3\,600} = 34 \text{ квт}.$$

Холодильный коэффициент

$$\varepsilon = \frac{q_0}{l_к} = \frac{124{,}3}{26{,}0} = 4{,}79.$$

15-10. Сравнить холодопроизводительность, холодильный коэффициент и теоретическую мощность двигателя холодильной установки, работающей без переохлаждения, с установкой, где производится переохлаждение конденсата. Компрессор всасывает сухой насыщенный пар фреона-12 при температуре —10° С и сжимает его адиабатически до давления 5,78 *кГ/см²* Пройдя через конденсатор и переохладитель, пар превращается в жидкость с температурой $t = 10°$ С. Холодопроизводительность $Q_0 = 150\,000$ *ккал/ч*.

Решить задачу, пользуясь диаграммой *i-lg p*.

Ответ: без переохлаждения: $q_0 = 131{,}0$ *кдж/кг*; $\varepsilon = 7{,}82$, $N_{\text{теор}} = 17{,}3$ *квт*. С переохлаждением: $q_0 = 141{,}9$ *кдж/кг*; $\varepsilon = 8{,}6$; $N_{\text{теор}} = 16$ *квт*.

15-11. В аммиачной холодильной устаиовке влажный пар аммиака при $t_1 = -5°$ С и $x_1 = 0{,}95$ адиабатически сжимается до давления $p_2 = 7{,}42$, после чего поступает в конденсатор, где превращается в жидкость В дальнейшем жидкость переохлаждается до $t_3 = 10°$ С

После дросселирования пар подсушивается за счет отобранного из охлаждаемого объекта тепла и снова поступает в компрессор. Холодопроизводительность установки $Q_0 = 220\,000$ *ккал/ч*.

Определить холодильный коэффициент и сравнить его с холодильным коэффициентом цикла Карио для того же интервала температур.

Ответ: $\varepsilon = 12{,}7$; $\varepsilon_К = 13{,}4$

---

* По табл 27 приложений

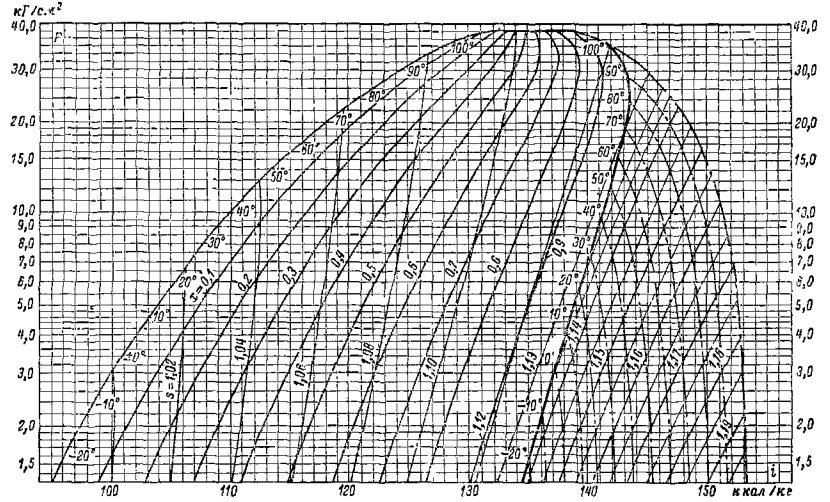


Рис 15-5 К задаче 15-9.

i-lg *p*-диаграмма для фреона-12 При $t=0°$ С $i'_0=100$ *ккал/кг*; $s'_0=1,0$ *ккал/кг* °К

15-12. Для отопления зданий может быть использована холодильная установка, в котором нижним источником тепла служит окружающая среда. Этот принцип положен в основу работы теплового насоса. В результате его работы тепло передается источнику тепла с более высокой температурой, чем окружающая среда.

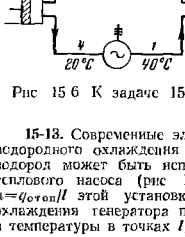


Рис. 15-6. К задаче 15-13.

Сколько можно получить тепла в час для отопления здания при помощи теплового насоса, если температура окружающей 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: $Q = 185\,900$ *кдж/ч*.

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. 15-6). Каков отопительный коэффициент $\mu = q_{отоп}/l$ этой установки, если давление водорода в системе охлаждения генератора постоянно и равно $p_1 = p_4 = 0{,}97 \cdot 10^5$ *н/м*^{2}, 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: $\mu = 6{,}0$, $p_2 = 1{,}86 \cdot 10^5$ *н/м*^{2}.

16. ЭЛЕМЕНТЫ ТЕРМОДИНАМИКИ ХИМИЧЕСКИХ ПРОЦЕССОВ

16-1. В газогенераторе бо́льшая часть углерода топлива сгорает неполностью с образованием окиси углерода и выделением некоторого количества тепла, согласно реакции:

$$C + \frac{1}{2} O_2 = CO + |Q_p|.$$

В чистом виде провести эту реакцию, а следовательно, и найти величину Q_p, практически невозможно.

Определить тепловой эффект этой реакции $(Q_p)_{298}$ при стандартных условиях ($p = 1$ *атм* физ., $t = 25°$ С), если при этих же условиях известны тепловые эффекты реакций полного сгорания углерода и окиси углерода:

$$C + O_2 = CO_2 + 94\,052 \text{ } ккал/кмоль;$$

$$CO + \frac{1}{2} O_2 = CO_2 + 67\,636 \text{ } ккал/кмоль.$$

Ответ. $(Q_p)_{298} = \Delta H^0_{298} = -26\,416$ *ккал/кмоль*.

---

* В задачах этого раздела энтальпии, отнесенные к 1 *кмоль*, обозначаются символом H, т. е. так, как это принято в химической термодинамике.

Знак „минус" показывает, что в результате реакции тепло выделяется и отводится в окружающую среду.

16-2. Определить стандартную теплоту образования $(H^0_{298})^{обр}_{CH_4}$ одного киломоли метана CH_4, если известны следующие стандартные теплоты:

а) сгорания метана

$$(\Delta H^0_{298})^{сгор}_{CH_4} = -212\,798 \text{ ккал/кмоль};$$

б) образование жидкой H_2O

$$(\Delta H^0_{298})^{обр}_{H_2O\,(ж)} = -68\,317 \text{ ккал/кмоль};$$

в) образования газообразной углекислоты

$$(\Delta H^0_{298})^{обр}_{CO_2(г)} = -94\,052 \text{ ккал/кмоль}$$

Решение

Согласно следствию из закона Гесса тепловой эффект реакции равен алгебраической сумме теплот образования реагентов из простых веществ, т. е. сумме теплот образования продуктов реакции за вычетом суммы теплот образования исходных веществ.

Запишем уравнение реакции сгорания метана:

$$CH_4 + 2O_2 = CO_2\,(г) + 2H_2O\,(ж) + 212\,798 \text{ ккал/кмоль}.$$

Следовательно, по закону Гесса

$$-212\,798^{**} = (\Delta H^0_{298})^{обр}_{CO_2\,(г)} + 2(\Delta H^0_{298})^{обр}_{H_2O\,(ж)} -$$

$$-(\Delta H^0_{298})^{обр}_{CH_4} - 2(\Delta H^0_{298})^{обр}_{O_2}.$$

Подставив заданные величины и учитывая, что теплота образования O_2 равна нулю, так как O_2 есть простое вещество, получим:

$$-212\,798 = -94\,052 + 2(-68\,317) - (\Delta H^0_{298})^{обр}_{CH_4} - 0;$$

$$(\Delta H^0_{298})^{обр}_{CH_4} = 212\,798 - 94\,052 - 136\,634 = -17\,888 \text{ ккал/кмоль}.$$

16-3. Определить теплоту Q_p реакции сгорания этилена

$$C_2H_2 + 3O_2 = 2CO_2\,(г) + 2H_2O\,(ж),$$

если заданы теплоты образования реагентов:

$\Delta H_{C_2H_4} = 12\,498$, $\Delta H_{CO_2} = -94\,052$ и $\Delta H_{H_2O} = -68\,317$ *ккал/кмоль*.

Ответ. $Q_p = -337\,236$ *ккал/кмоль* C_2H_4.

** О знаке «минус» см. в ответе предыдущей задачи.

16-4. Определить теплоту парообразования воды r, *ккал/кг*, если известны стандартные теплоты образования воды и пара, равные соответственно —68 317 и —57 798 *ккал/кмоль*.

Сравнить с табличными (по таблицам водяного пара) значениями r при а) t_s=25° С и б) p_s=1 *атм* физ.

Ответ. $r = 10\,519$ *ккал/кмоль* = 583,7 *ккал/кг*. По таблицам водяного пара: а) $r = 583{,}2$ *ккал/кг*; б) $r = 539{,}0$ *ккал/кг*. Расхождение объясняется значительным отклонением свойств насыщенного водяного пара от свойств вещества в идеально-газовом состоянии (стандартное условие). В случае а) расхождение невелико, а в случае б) велико потому, что энтальпии i' и i'', а следовательно, и r, достаточно сильно зависят от температуры t_s. При давлении же $p_s = 1$ *атм* температура насыщения $t_s = 100°\,\text{С} > t_{\text{стандт}} = 25°\,\text{С}$, следовательно, $r_{100°\,\text{С}} < r_{25°\,\text{С}}$.

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.

16-6. Определить разницу между Q_p и Q_v для реакции

$$C+CO_2=2CO,$$

если она протекает при t=0° С. Считать, что CO_2 и CO находятся в идеально-газовом состоянии. Объемом твердого углерода пренебречь.

Можно ли пренебречь этой разницей, если точность определения теплот сгорания C и CO составляет соответственно ±10 *ккал/кмоль* и ±29 *ккал/кмоль*?

Ответ: $Q_p - Q_v = -543$ *ккал/кмоль*. Пренебречь этой разностью нельзя, так как величина ее превышает точность определения теплот сгорания C и CO.

16-7. Определить тепловой эффект реакции

$$H_2 + \frac{1}{2}O_2 = H_2O_{\text{г}} + |Q_p|$$

при температуре t=1 000° С, если известно, что при t=0° С $|Q_p| = 68\,411$ *ккал/кмоль*.

Теплоемкость μc_p считать зависящей от температуры и пользоваться таблицами.

Ответ: $|Q_p| = 69\,897$ *ккал/кмоль* H_2O.

16-8. Вывести формулу для расчета степени диссоциации газа через константу равновесия для реакции диссоциации, происходящей по схеме: $X_2 \rightleftarrows 2X_1$ (диссоциация по такой схеме происходит, например, в парах щелочных металлов). При выводе формулы считать, что одноатомный и двухатомный газы являются идеальными.

Ответ: $\alpha = \dfrac{1}{\sqrt{1 + \dfrac{4p}{K_p}}}$.

16-9. Для реакции $K_2 \rightleftarrows 2K_1$, происходящей в парах калия, известна константа диссоциации при 1 100° С: $K_p = 76{,}261$ *кГ/см²*.

Найти степень диссоциации паров калия при этой температуре при давлениях 3 и 7 *кГ/см²*.

Ответ: Для 3 *кГ/см²* $\alpha=0{,}929$; для 7 *кГ/см²* $\alpha=0{,}855$.

16-10. Для реакции диссоциации паров натрия $Na_2 \rightleftarrows 2Na_1$ при определенных параметрах известна степень диссоциации $\alpha=0{,}83$.

Чему равно отношение парциальных давлений одно- и двухатомного паров натрия?

Решение

Отношения 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 одноатомного получается 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: $1-\alpha \quad 2\alpha$.

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*)

$$pv=\frac{8\,314}{\mu_{см}}T, \quad \text{или} \quad pv=\frac{8\,314T}{\mu_2}(1+\alpha).$$

Степень диссоциации можно выразить и 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. Доказать это можно, взяв производную $(\partial i/\partial p)_T = [v - T(\partial v/\partial T)_p]$ с помощью уравнения состояния диссоциирующего идеального газа (задача 16-11).

16-13. Рассчитать константу равновесия K_p в стандартном состоянии при температуре 1 000° 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).

Энтальпии при 1 000 °С: $(H^0 - H_0^0)_1 = 6320{,}8$ *ккал/кмоль*; $(H^0 - H_0^0)_2 = 11645{,}6$ *ккал/кмоль*.

Энтропии при 1 000° С: $S_1^0 = 45{,}478$ *ккал/кмоль·°К*; $S_2^0 = 73{,}064$ *ккал/кмоль·°К*.

Теплота диссоциации при 0 °К: $D_0^0 = 11\,842$ *ккал/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 термодинамических потенциалов для рассчитываемой реакции. Эта формула может быть преобразована:

$$\ln K_p = -\frac{2(\Phi^0 - H_0^0)_1 + D_0^0 - (\Phi^0 - H_0^0)_2}{\mu RT} =$$

$$= -\frac{2(H^0 - H_0^0)_1 - 2TS_1^0 + D_0^0 - (H^0 - H_0^0)_2 + TS_2^0}{\mu RT}.$$

Следовательно,

$$\ln K_p =$$

$$= -\frac{2 \cdot 6320{,}8 - 2 \cdot 1\,273 \cdot 45{,}478 + 11\,842 - 11645{,}6 + 1\,273 \cdot 73{,}064}{1{,}986 \cdot 1\,273} =$$

$$= 3{,}9310.$$

Отсюда $K_p = 50{,}9$ *атм*.

16-14. Известно, что при температуре абсолютного нуля теплоты сублимации калия равны:

$(\Delta H_0^0)_1 = 21\,695$ *ккал/кмоль* K_1 и $(\Delta H_0^0)_2 = 31\,548$ *ккал/кмоль* K_2.

Первая цифра относится к такому процессу испарения, когда в результате него получается пар в виде одноатомных молекул калия, вторая цифра — то же для двухатомных молекул

Определить теплоту диссоциации калия при $T=0°$ К.

Ответ. $D_0^0 = 2\,(\Delta H_0^0)_1 - (\Delta H_0^0)_2 = 21\,695 \cdot 2 - 31\,548 =$

$= 11\,842$ *ккал/кмоль*·К$_2$.

16-15. Вывести формулу для расчета теплоемкости c_p диссоциирующих идеальных газов. Диссоциация идет по схеме

$$X_2 \rightleftarrows 2X_1 .$$

Рассчитать теплоемкость c_p паров калия при $p = 1$ *кГ/см*^{2} и $t = 800°$ С. Известно, что при $t = 800°$ С мольные теплоемкости μc_p^0 для одноатомных и двухатомных паров калия и энтальпии соответственно равны $\mu c_{p,1}^0 = 4{,}9647$ *ккал/кмоль·град*; $\mu c_{p,2}^0 = 9{,}484$ *ккал/кмоль·град*; $(H^0 - H_0^0)_1 = 5327{,}9$ *ккал/кмоль*; $(H^0 - H_0^0)_2 = 9744{,}0$ *ккал/кмоль*; степень диссоциации при этих параметрах равна $\alpha = 0{,}9150$, 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, получим для энтальпии 1 *кг* смеси паров K_1 и K_2

$$i = g_1 i_1 + g_2 i_2,$$

где i_1, *ккал/кг* и i_2, *ккал/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.

$$g_1 = \frac{r_1\mu_1}{r_1\mu_1 + r_2\mu_2} = \frac{\dfrac{2\alpha}{1+\alpha}\mu_1}{\dfrac{2\alpha}{1+\alpha}\mu_1 + \dfrac{1-\alpha}{1+\alpha}\mu_2} = \alpha,$$

так как $\mu_2 = 2\mu_1$. Таким образом, получаем:

$$i = \alpha i_1 + (1-\alpha)\, i_2.$$

Теплоемкость c_p получается дифференцированием:

$$c_p = \left(\frac{\partial i}{\partial t}\right)_p = \alpha\left(\frac{\partial i_1}{\partial t}\right)_p + i_1\left(\frac{\partial \alpha}{\partial t}\right)_p + (1-\alpha)\left(\frac{\partial i_2}{\partial t}\right)_p - i_2\left(\frac{\partial \alpha}{\partial t}\right)_p,$$

или

$$c_p = \alpha c_{p1} + (1-\alpha)\, c_{p2} + (i_1 - i_2)\left(\frac{\partial \alpha}{\partial t}\right)_p . \qquad (1)$$

В этой формуле c_{p1} и c_{p2} — массовые теплоемкости паров одно- и двухатомного калия; (i_2-i_1) — 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 тепла изменяется состав смеси $\left[\left(\frac{\partial\alpha}{\partial t}\right)_p \neq 0\right]$ — увеличивается количество одноатомных молекул и значительное количество тепла идет на реакцию диссоциации.

Для расчета можно заменить величины, входящие в формулу (1), через стандартные:

$$c_{p1}=\frac{\mu c^0_{p1}}{\mu_1},\ \textit{ккал/кг·град};\qquad c_{p2}=\frac{\mu c^0_{p2}}{\mu_2},\ \textit{ккал/кг·град};$$

$$i_1=\frac{(H^0-H^0_0)_1+(\Delta H^0_0)_1}{\mu_1},\ \textit{ккал/кг};$$

$$i_2=\frac{(H^0-H^0_0)_2+(\Delta H^0_0)_2}{\mu_2},\ \textit{ккал/кг}.$$

Энтальпии здесь отсчитаны от одного энергетического уровня. Учитывая, что $\mu_1=\mu_2/2$, получим для теплового эффекта реакции диссоциации

$$\frac{\Delta H^0}{\mu_2}=i_1-i_2=$$

$$=\frac{1}{\mu_2}[2(H^0-H^0_0)_1+2(\Delta H^0_0)_1-(H^0-H^0_0)_2-(\Delta H^0_0)_2],\qquad(2)$$

где через ΔH^0 обозначен тепловой эффект реакции диссоциации в *ккал/кмоль* K_2. Величину производной $(\partial\alpha/\partial t)_p$ находим из формулы $\alpha=1\Big/\sqrt{1+\frac{4p}{K_p}}$:

$$\left(\frac{\partial\alpha}{\partial t}\right)_p=\frac{\partial}{\partial t}\left[\frac{1}{\sqrt{1+\frac{4p}{K_p}}}\right]_p=\frac{4p}{2\left(1+\frac{4p}{K_p}\right)^{3/2}K_p^2}\left(\frac{\partial K_p}{\partial T}\right)_p=$$

$$=\frac{\alpha(1-\alpha^2)}{2}\left(\frac{\partial\ln K_p}{\partial T}\right)_p.$$

Используя известное выражение зависимости константы равновесия от температуры

$$\left(\frac{\partial\ln K_p}{\partial T}\right)_p=\frac{\Delta H^0}{\mu RT^2},$$

получаем:

$$\left(\frac{\partial\alpha}{\partial t}\right)_p=\frac{\alpha(1-\alpha^2)}{2}\cdot\frac{\Delta H^0}{\mu RT^2}.$$

Подставляя в формулу (1) полученные величины, находим:

$$c_p = \frac{2\mu c^0_{p1}}{\mu_2}\alpha + \frac{\mu c^0_{p2}}{\mu_2}(1-\alpha) + \frac{\alpha(1-\alpha^2)}{2}\cdot\frac{\Delta H^\circ}{\mu RT^2}\cdot\frac{\Delta H^\circ}{\mu_2}$$

или окончательно

$$c_p = \frac{1}{\mu_2}\left[2\mu c^0_{p1} + (1-\alpha)\,\mu c^0_{p2} + \frac{\alpha(1-\alpha^2)}{2\mu R}\left(\frac{\Delta H^\circ}{T}\right)^2\right].$$

Теперь произведем расчет теплоемкости c_p для требуемых параметров. Предварительно вычислим

$$\Delta H^\circ = 2[(H^\circ - H^0_0)_1 + (\Delta H^0_0)_1] - [(H^\circ - H^0_0)_2 + (\Delta H^0_0)_2] =$$

$$= 2(5327{,}9 + 21\,695) - (9744{,}0 + 31\,548) = 12\,754 \text{ ккал/кмоль}\cdot\text{К}_2.$$

Величина

$$(\Delta H^\circ/T)^2 = \left(\frac{12\,754}{1073{,}15}\right)^2 = 141{,}0.$$

Теплоемкость рассчитывается:

$$c_p = \frac{1}{78{,}2}\times$$

$$\times\left[2\cdot 0{,}915\cdot 4{,}9647 + 0{,}085\cdot 9{,}484 + \frac{0{,}915\,(1-0{,}915^2)}{2\cdot 1{,}986}\cdot 141{,}0\right] =$$

$$= \frac{1}{78{,}2}(9{,}08 + 0{,}806 + 5{,}29) = 0{,}1942 \text{ ккал/кг}\cdot\text{град}.$$

Как видно из расчета, третий член в формуле для теплоемкости c_p имеет существенное значение.

Таблица 1

Международная система единиц (СИ)

Величина	Единица измерения	Сокращенное обозначение единиц
	Основные единицы	
Длина	метр	*м*
Масса	килограмм	*кг*
Время	секунда	*сек*
Сила электрического тока	ампер	*а*
Термодинамическая температура	градус Кельвина	°К
Сила света	свеча	*св*
	Некоторые производные единицы	
Площадь	квадратный метр	$м^2$
Объем	кубический метр	$м^3$
Скорость	метр в секунду	*м/сек*
Ускорение	метр на секунду в квадрате	$м/сек^2$
Сила	ньютон	*н; (кг·м/сек²)*
Давление	ньютон на квадратный метр	$н/м^2$
Удельный вес	ньютон на кубический метр	$н/м^3$
Плотность	килограмм на кубический метр	$кг/м^3$
Удельный объем	кубический метр на килограмм	$м^3/кг$
Работа, энергия, количество теплоты, энтальпия	джоуль	*дж; (н·м)*
Мощность	ватт	*вт*
Энтропия	джоуль на градус Кельвина	*дж/°К*
Удельная массовая теплоемкость	джоуль на килограмм-градус	*дж/кг·град*
Теплота фазового превращения	джоуль на килограмм	*дж/кг*

164—1

Таблица 2

Некоторые внесистемные единицы

Величина	Единица измерения	Сокращенное обозначение единиц
Время	час, сутки, год	*ч*
Количество теплоты, энтальпия, внутренняя энергия, изобарно-изотермический потенциал	калория	*кал*
Работа, энергия	киловат-час, лошадиная сила-час	*квт.ч* *л. с.-ч*
Масса вещества в килограммах, численно равная его молекулярному весу	киломоль	*кмоль*
Давление	миллиметры водяного столба; миллиметры ртутного столба	*мм вод. ст.* *мм рт. ст.*

Таблица 3

Приставки для обозначения кратных и дольных единиц (ГОСТ 7663-55)

Кратность и дольность	Наименование приставок	Сокращенное обозначение
10^{12}	тера	*Т*
10^{9}	гига	*Г*
10^{6}	мега	*М*
10^{3}	кило	*к*
10^{2}	гекто	*г*
10	дека	*да*
10^{-1}	деци	*д*
10^{-2}	санти	*с*
10^{-3}	милли	*м*
10^{-6}	микро	*мк*
10^{-9}	нано	*н*
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 *кГ·сек²/м* = 9,80665 *кг*
Сила	1	*кГ* = 9,80665 *н*
Плотность	1	*т. е. м./м³* = 1 *кГ·сек²/м⁴* = 9,80665 *кг/м³*
Удельный вес	1	*кГ/м³* = 9,80665 *н/м³*
Давление	1	*кГ/м²* = 9,80665 *н/м²*
Работа	1	*кГ·м* = 1/426,94 *ккал* = 9,80665 *дж*
Теплота, энтальпия, внутренняя энергия, потенциалы	1	*ккал* = 1/859,845 *квт·ч* = 4,1868·10³ *дж*
Мощность	1	*вт·ч* = 3 600 *дж*

Таблица 5

Молекулярные веса, плотности и объемы киломолей при нормальных условиях, критические температуры и критические давления некоторых газов

	Химическое обозначение	Молекулярный вес μ	Плотность $\rho_н$, $кг/м^3_н$	Объем киломоля $\mu/\rho_н$, $м^3_н$	Критическая температура $T_{кр}$, °K	Критическое давление $p_{кр}$, $кГ/см^2$
Воздух	—	28,96	1,2928	22,40	132,5	38,4
Гелий	He	4,003	0,1785	22,42	5,30	2,25
Аргон	Ar	39,944	1,7839	22,39	150,8	52,9
Водород	H_2	2,016	0,08987	22,43	33,29	12,80
Азот	N_2	28,016	1,2505	22,40	126,07	33,5
Азот атмосферный[1]	$N_{2,атм}$	28,16	(1,257)	(22,4)	—	—
Кислород	O_2	32,0000	1,42895	22,39	154,38	50,8
Хлор	Cl_2	70,914	3,22	22,02	419,0	93,5
Окись углерода	CO	28,01	1,2500	22,40	133,6	35,5
Двуокись углерода	CO_2	44,01	1,9768	22,26	304,2	75,29
Сернистый газ	SO_2	64,06	2,9263	21,89	430,1	78,3
Аммиак	NH_3	17,032	0,7714	22,08	403,7	114
Водяной пар[2]	H_2O	18,016	(0,804)	(22,4)	647,3	225,65

[1] Атмосферный азот — условный газ, состоящий из азота, редких газов и двуокиси углерода, содержащихся в воздухе.

[2] Водяной пар и азот атмосферный приводятся к нормальному состоянию условно; в этом случае плотность определяется как частное $\mu/22,4$, $кг/м^3_н$.

Таблица 6

Соотношения между единицами измерения давления

Наименование единиц	Ньютоны на квадратный метр, *н/м²*	Бары, *бар*	Килограммы-сила на квадратный метр, *кГ/м²*	Килограммы-сила на кв. сантиметр (технические атмосферы), *кГ/см²*, *ат*	Физические атмосферы, *атм*	Миллиметры водяного столба[1], *мм вод. ст.*	Миллиметры ртутного столба[2], *мм рт. ст.*	Английские фунты на кв. дюйм, *lb/sq·in*
1 *н/м²*	1	10^{-5}	0,101972	1,01972·10^{-5}	0,98692·10^{-5}	0,101972	750,06·10^{-5}	14,5038·10^{-5}
1 *бар*	10^5	1	10197,2	1,01972	0,98692	10197,2	750,06	14,5038
1 *кГ/м²*	9,80665	9,80665·10^{-5}	1	10^{-4}	0,96784·10^{-4}	1	735,55·10^{-4}	14,2233·10^{-4}
1 *кГ/см²*=1 *ат*	0,980665·10^5	0,980665	10^4	1	0,96784	10^4	735,55	14,2233
1 *атм* (физ)	1,01325·10^5	1,01325	1,03323·10^4	1,03323	1	1,03323·10^4	760	14,6959
10^4 *мм вод. ст.*	0,980665·10^5	0,980665	10^4	1	0,96784	10^4	735,55	14,2233
10^5 *мм рт. ст.*	1,33322·10^5	1,33322	1,35951·10^4	1,35951	1,31579·10^4	1,35951·10^4	10^5	19,3368
10 *lb/sq·in*	0,68948·10^5	0,68948	0,70307·10^4	0,70307	0,68046	0,70307·10^4	517,15	10

[1] При $t = 4°$ С и нормальном ускорении силы тяжести $g_н = 9,80665$ *м/сек²*.

[2] При $t = 0°$ С и $g_н = 9,80665$ *м/сек²*.

Таблица 7

Соотношение между единицами измерения энергии

Единицы измерения	Килоджоули, *кдж*	Килокалории, *ккал*	Киловатт-часы, *квт·ч*	Килограммометры, *кГ·м*	Лошадиные сило-часы, *л.с·ч*
10 *кдж*	10,0000	2,38846	0,0027778	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 *кГ·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*

Азот N_2

Температура	Теплоемкость								Энтальпия		Энтропия	
t	μc_p	μc_v	μc_{pm}	μc_{vm}	c_p	c_v	c_{pm}	c_{vm}	μi	i	μs	s
°C	ккал/кмоль·град				ккал/кг·град				ккал/кмоль	ккал/кг	ккал/кмоль·°K	ккал/кг·°K
0	6,954	4,968	6,954	4,968	0,2482	0,1773	0,2482	0,1773	0	0	0	0
100	6,974	4,988	6,961	4,975	0,2489	0,1780	0,2485	0,1776	696,1	24,85	2,171	0,0775
200	7,039	5,053	6,981	4,995	0,2512	0,1804	0,2492	0,1783	1 396	49,84	3,833	0,1368
300	7,154	5,168	7,018	5,032	0,2554	0,1845	0,2505	0,1796	2 105	75,15	5,193	0,1854
400	7,303	5,317	7,070	5,084	0,2607	0,1898	0,2524	0,1815	2 828	100,1	6,355	0,2268
500	7,464	5,478	7,133	5,147	0,2664	0,1955	0,2546	0,1837	3 567	127,3	7,377	0,2633
600	7,624	5,638	7,201	5,215	0,2721	0,2012	0,2570	0,1861	4 321	154,2	8,294	0,2961
700	7,772	5,786	7,273	5,287	0,2774	0,2065	0,2596	0,1887	5 091	181,7	9,129	0,3259
800	7,906	5,920	7,344	5,358	0,2822	0,2113	0,2621	0,1912	5 875	209,7	9,896	0,3532
900	8,025	6,039	7,413	5,427	0,2864	0,2156	0,2646	0,1937	6 672	238,1	10,606	0,3786
1 000	8,130	6,144	7,479	5,493	0,2902	0,2193	0,2670	0,1961	7 479	267,0	11,266	0,4021
1 100	8,222	6,236	7,542	5,556	0,2935	0,2226	0,2692	0,1983	8 296	296,1	11,885	0,4242
1 200	8,303	6,317	7,602	5,616	0,2964	0,2255	0,2713	0,2005	9 122	325,6	12,466	0,4449
1 300	8,374	6,388	7,659	5,673	0,2989	0,2280	0,2734	0,2025	9 957	355,4	13,013	0,4645
1 400	8,436	6,450	7,713	5,727	0,3011	0,2302	0,2753	0,2044	10 800	385,4	13,531	0,4830
1 500	8,490	6,504	7,763	5,777	0,3030	0,2322	0,2771	0,2062	11 640	415,7	14,022	0,6005
1 600	8,538	6,552	7,810	5,824	0,3048	0,2339	0,2788	0,2079	12 500	446,1	14,489	0,5172
1 700	8,581	6,596	7,854	5,868	0,3063	0,2354	0,2803	0,2095	13 350	476,5	14,935	0,5331
1 800	8,620	6,634	7,895	5,909	0,3077	0,2368	0,2818	0,2109	14 210	507,2	15,360	0,5483
1 900	8,655	6,669	7,934	5,948	0,3089	0,2380	0,2832	0,2123	15 070	538,1	15,767	0,5628
2 000	8,686	6,700	7,971	5,985	0,3100	0,2391	0,2846	0,2136	15 940	569,0	16,157	0,5767

* Таблицы 8—20 термодинамических функций газов в идеальном состоянии заимствованы из [Л. 5].

Кислород O_2

Температура	Теплоемкость								Энтальпия		Энтропия	
t	μc_p	μc_v	μc_{pm}	μc_{vm}	c_p	c_v	c_{pm}	c_{vm}	μi	i	μs	s
°C	ккал/кмоль·град				ккал/кг·град				ккал/кмоль	ккал/кг	ккал/кмоль·°K	ккал/кг·°K
0	6,992	5,006	6,992	5,006	0,2185	0,1564	0,2185	0,1564	0	0	0	0
100	7,136	5,150	7,055	5,069	0,2230	0,1609	0,2205	0,1584	705,5	22,05	2,161	0,0675
200	7,360	5,374	7,149	5,163	0,2300	0,1679	0,2234	0,1613	1 430	44,68	3,884	0,1214
300	7,603	5,617	7,261	5,275	0,2376	0,1755	0,2269	0,1648	2 178	68,07	5,318	0,1662
400	7,824	5,838	7,375	5,389	0,2445	0,1824	0,2305	0,1684	2 950	92,20	6,560	0,2050
500	8,013	6,027	7,484	5,498	0,2504	0,1883	0,2339	0,1718	3 742	116,9	7,656	0,2393
600	8,169	6,163	7,586	5,600	0,2553	0,1932	0,2371	0,1750	4 552	142,3	8,640	0,2700
700	8,299	6,313	7,679	5,693	0,2593	0,1973	0,2400	0,1779	5 375	168,0	9,534	0,2979
800	8,408	6,422	7,763	5,777	0,2627	0,2007	0,2426	0,1805	6 210	194,1	10,350	0,3234
900	8,499	6,513	7,840	5,854	0,2656	0,2035	0,2450	0,1829	7 056	220,5	11,103	0,3470
1 000	8,578	6,592	7,910	5,924	0,2682	0,2060	0,2472	0,1851	7 910	247,2	11,802	0,3688
1 100	8,650	6,664	7,974	5,988	0,2703	0,2082	0,2492	0,1871	8 771	274,1	12,453	0,3892
1 200	8,715	6,729	8,033	6,047	0,2723	0,2103	0,2510	0,1890	9 640	301,2	13,063	0,4082
1 300	8,778	6,792	8,088	6,102	0,2743	0,2122	0,2527	0,1907	10 510	328,5	13,638	0,4262
1 400	8,837	6,851	8,139	6,153	0,2762	0,2141	0,2543	0,1923	11 390	356,0	14,181	0,4432
1 500	8,895	6,909	8,188	6,202	0,2780	0,2159	0,2559	0,1938	12 280	383,8	14,695	0,4592
1 600	8,952	6,966	8,234	6,248	0,2797	0,2177	0,2573	0,1952	13 170	411,7	15,185	0,4745
1 700	9,008	7,022	8,278	6,292	0,2815	0,2194	0,2587	0,1966	14 070	439,8	15,652	0,4891
1 800	9,063	7,077	8,320	6,334	0,2832	0,2212	0,2600	0,1979	14 980	468,0	16,098	0,5031
1 900	9,118	7,132	8,361	6,375	0,2849	0,2229	0,2613	0,1992	15 890	496,5	16,527	0,5165
2 000	9,173	7,187	8,400	6,414	0,2867	0,2246	0,2625	0,2004	16 800	525,0	16,939	0,5293

Таблица 10

Атмосферный азот $N_{2,\text{атм}}$

Температура	Теплоемкость								Энтальпия		Энтропия	
t	μc_p	μc_v	$\overline{\mu c_p}_{tm}^{0}$	μc_{vm}	c_p	c_v	c_{pm}	c_{vm}	μi	i	μs	s
°C	ккал/кмоль·град				ккал/кг·град				ккал/кмоль	ккал/кг	ккал/кмоль°·К	ккал/кг·°К
0	6,931	4,945	6,931	4,945	0,2461	0,1756	0,2461	0,1756	0	0	0	0
100	6,951	4,965	6,938	4,952	0,2469	0,1763	0,2464	0,1759	693,8	24,64	2,164	0,0768
200	7,016	5,030	6,958	4,968	0,2491	0,1786	0,2471	0,1766	1 392	49,42	3,821	0,1357
300	7,130	5,144	6,995	5,009	0,2532	0,1827	0,2484	0,1779	2 099	74,52	5,176	0,1838
400	7,277	5,291	7,046	5,060	0,2584	0,1879	0,2502	0,1797	2 818	100,1	6,333	0,2249
500	7,436	5,450	7,109	5,123	0,2641	0,1935	0,2524	0,1819	3 555	126,2	7,352	0,2511
600	7,594	5,608	7,176	5,190	0,2697	0,1992	0,2548	0,1843	4 306	152,9	8,266	0,2935
700	7,741	5,755	7,247	5,261	0,2749	0,2044	0,2574	0,1868	5 073	180,2	9,097	0,3230
800	7,873	5,887	7,317	5,331	0,2796	0,2091	0,2599	0,1893	5 854	207,9	9,861	0,3502
900	7,991	6,005	7,386	5,400	0,2838	0,2132	0,2623	0,1918	6 647	236,1	10,568	0,3758
1 000	8,095	6,109	7,451	5,465	0,2874	0,2169	0,2646	0,1941	7 451	264,6	11,226	0,3992
1 100	8,186	6,200	7,513	5,527	0,2907	0,2202	0,2668	0,1963	8 254	293,5	11,841	0,4205
1 200	8,266	6,280	7,573	5,587	0,2935	0,2230	0,2689	0,1984	9 088	322,7	12,419	0,4410
1 300	8,336	6,350	7,629	5,643	0,2960	0,2255	0,2709	0,2004	9 918	352,2	12,958	0,4602
1 400	8,397	6,411	7,682	5,696	0,2982	0,2277	0,2728	0,2023	10 750	381,9	13,480	0,4787
1 500	8,451	6,465	7,732	5,746	0,3001	0,2296	0,2746	0,2040	11 598	411,9	13,960	0,4961
1 600	8,498	6,512	7,778	5,792	0,3018	0,2313	0,2762	0,2057	12 440	441,9	14,434	0,5126
1 700	8,541	6,555	7,822	5,836	0,3033	0,2328	0,2778	0,2072	13 300	472,3	14,877	0,5283
1 800	8,579	6,593	7,862	5,876	0,3047	0,2341	0,2792	0,2087	14 150	502,6	15,300	0,5433
1 900	8,614	6,628	7,901	5,915	0,3059	0,2354	0,2806	0,2100	15 010	533,1	15,705	0,5577
2 000	8,644	6,658	7,937	5,951	0,3070	0,2364	0,2819	0,2113	15 870	563,8	16,093	0,5715

Таблица 11

Воздух

Температура	Теплоемкость								Энтальпия		Энтропия	
t	μc_p	μc_v	μc_{pm}	μc_{vm}	c_p	c_v	c_{pm}	c_{vm}	μi	i	μs	s
°С	ккал/кмоль·град				ккал/кг·град				ккал/кмоль	ккал/кг	ккал/кмоль·°К	ккал/кг·°К
0	6,944	4,958	6,944	4,958	0,2397	0,1711	0,2397	0,1711	0	0	0	0
100	6,990	5,004	6,963	4,977	0,2413	0,1727	0,2403	0,1718	696,3	24,03	2,164	0,0746
200	7,088	6,102	6,998	5,012	0,2447	0,1761	0,2416	0,1730	1 400	48,32	3,834	0,1324
300	7,229	5,243	7,051	5,065	0,2495	0,1810	0,2434	0,1748	2 115	73,02	5,206	0,1797
400	7,392	5,406	7,115	5,129	0,2552	0,1866	0,2456	0,1771	2 846	98,24	6,381	0,2203
500	7,557	5,571	7,188	5,202	0,2609	0,1923	0,2481	0,1796	3 594	124,1	7,416	0,2560
600	7,715	5,729	7,262	5,276	0,2663	0,1978	0,2507	0,1821	4 357	150,4	8,345	0,2880
700	7,858	5,872	7,338	5,352	0,2712	0,2027	0,2533	0,1847	5 137	177,3	9,189	0,3172
800	7,985	5,999	7,411	5,425	0,2756	0,2071	0,2558	0,1873	5 929	204,6	9,964	0,3439
900	8,098	6,112	7,481	5,495	0,2795	0,2110	0,2583	0,1897	6 733	232,5	10,680	0,3687
1 000	8,196	6,210	7,547	5,561	0,2829	0,2144	0,2605	0,1920	7 547	260,5	11,347	0,3917
1 100	8,283	6,297	7,610	5,624	0,2859	0,2174	0,2627	0,1941	8 371	289,0	11,970	0,4132
1 200	8,360	6,374	7,669	5,683	0,2886	0,2200	0,2647	0,1962	9 203	317,6	12,555	0,4334
1 300	8,429	6,443	7,725	5,739	0,2909	0,2224	0,2667	0,1981	10 040	346,7	13,101	0,4522
1 400	8,490	6,504	7,778	5,792	0,2930	0,2245	0,2685	0,1999	10 890	375,9	13,628	0,4704
1 500	8,544	6,558	7,828	5,842	0,2949	0,2264	0,2702	0,2016	11 740	405,3	14,122	0,4875
1 600	8,593	6,607	7,874	3,888	0,2966	0,2281	0,2718	0,2032	12 600	434,9	14,592	0,5037
1 700	8,639	6,653	7,918	5,932	0,2982	0,2296	0,2733	0,2047	13 460	464,6	15,040	0,5224
1 800	8,681	6,695	7,958	5,972	0,2996	0,2311	0,2747	0,2062	14 320	494,5	16,468	0,5339
1 900	8,720	6,734	7,997	6,011	0,3010	0,2324	0,2761	0,2075	15 190	524,6	15,878	0,5481
2 000	8,755	6,769	8,035	6,049	0,3022	0,2337	0,2773	0,2088	16 070	554,6	16,271	0,5617

Таблица 12

Водород H_2

Температура	Теплоемкость								Энтальпия		Энтропия	
t	μc_p	μc_v	μc_{pm}	μc_{vm}	c_p	c_v	c_{pm}	c_{vm}	μi	i	μs	s
°C	ккал/кмоль·град				ккал/кг·град				ккал/кмоль	ккал/кг	ккал/кмоль·°K	ккал/кг·°K
0	6,836	4,849	6,835	4,849	3,3904	2,4053	3,3904	2,4053	0	0	0	0
100	6,957	4,971	6,911	4,925	3,4509	2,4668	3,4281	2,4430	691,1	342,8	2,112	1,048
200	6,984	4,998	6,944	4,958	3,4643	2,4792	3,4444	2,4593	1 389	688,9	3,775	1,872
300	6,998	5,012	6,956	4,970	3,4712	2,4861	3,4504	2,4653	2 087	1 035	5,114	2,537
400	7,021	5,035	6,971	4,985	3,4826	2,4975	3,4578	2,4727	2 788	1 383	6,242	3,096
500	7,060	5,074	6,985	5,000	3,5020	2,5169	3,4653	2,4802	3 493	1 733	7,216	3,579
600	7,116	5,130	7,002	5,016	3,5298	2,5446	3,4732	2,4881	4 201	2 084	8,078	4,007
700	7,189	5,203	7,024	6,038	3,5660	2,5808	3,4841	2,4990	4 917	2 439	8,855	4,392
800	7,278	6,292	7,050	5,064	3,6101	2,6250	3,4970	2,5119	5 640	2 798	9,562	4,743
900	7,373	5,387	7,081	5,095	3,5572	2,6721	3,5124	2,5273	6 373	3 161	10,214	5,066
1 000	7,472	5,486	7,115	5,129	3,7063	2,7212	3,5293	2,5441	7 115	3 529	10,822	5,368
1 100	7,577	5,591	7,162	5,165	3,7584	2,7733	3,5476	2,5625	7 857	3 902	11,389	6,649
1 200	7,680	5,694	7,191	6,205	3,8035	2,8244	3,5670	2,5818	8 629	4 280	11,925	5,915
1 300	7,784	5,798	7,234	5,248	3,8611	2,8760	3,5883	2,6032	9 404	4 665	12,434	6,168
1 400	7,882	5,896	7,277	5,291	3,9097	2,9246	3,6096	2,6245	10 190	5 053	12,917	6,407
1 500	7,976	5,990	7,320	5,334	3,9563	2,9712	3,6309	2,6458	10 980	5 446	13,377	6,635
1 600	8,064	6,078	7,364	5,378	4,0000	3,0149	3,6528	2,6677	11 780	5 844	13,817	6,854
1 700	8,148	6,162	7,407	5,421	4,0417	3,0565	3,6741	2,6890	12 590	6 246	14,239	7,063
1 800	8,227	6,241	7,450	5,464	4,0808	3,0957	3,6954	2,7103	13 410	6 652	14,643	7,263
1 900	8,303	6,317	7,493	5,507	4,1185	3,1334	3,7168	2,7316	14 240	7 062	15,032	7,456
2 000	8,373	6,387	7,535	5,549	4,1533	3,1681	3,7376	2,7525	15 070	7 475	15,407	7,642

Таблица 13

Окись азота NO

Температура	Теплоемкость								Энтальпия		Энтропия	
t	μc_p	μc_v	μc_{pm}	μc_{vm}	c_p	c_v	c_{pm}	c_{vm}	μi	i	μs	s
°C	ккал/кмоль·град				ккал/кг·град				ккал/кмоль	ккал/кг	ккал/кмоль·°К	ккал/кг·°К
0	7,160	5,174	7,160	5,174	0,2386	0,1724	0,2386	0,1724	0	0	0	0
100	7,146	5,160	7,143	5,157	0,2381	0,1719	0,2380	0,1718	714,3	23,80	2,229	0,0742
200	7,245	5,259	7,165	5,179	0,2414	0,1752	0,2388	0,1725	1 433	47,76	3,936	0,1311
300	7,418	5,432	7,220	5,234	0,2472	0,1810	0,2406	0,1744	2 166	72,18	5,343	0,1780
400	7,603	5,617	7,292	5,306	0,2534	0,1872	0,2430	0,1768	2 917	97,20	6,549	0,2182
500	7,784	5,798	7,373	5,387	0,2594	0,1932	0,2457	0,1795	3 686	122,8	7,614	0,2537
600	7,946	5,950	7,455	5,469	0,2648	0,1986	0,2484	0,1822	4 473	149,0	8,571	0,2856
700	8,087	6,101	7,536	5,550	0,2695	0,2033	0,2511	0,1849	5 275	175,8	9,443	0,3146
800	8,209	6,223	7,613	5,627	0,2736	0,2074	0,2537	0,1875	6 090	203,0	10,243	0,3413
900	8,311	6,325	7,684	5,698	0,2770	0,2108	0,2561	0,1899	6 916	230,5	10,979	0,3658
1 000	8,399	6,413	7,752	5,766	0,2799	0,2137	0,2583	0,1921	7 752	258,3	11,662	0,3885
1 100	8,473	6,497	7,814	5,828	0,2824	0,2165	0,2604	0,1942	8 595	286,4	12,298	0,4098
1 200	8,537	6,551	7,872	5,886	0,2845	0,2183	0,2623	0,1951	9 446	314,8	12,897	0,4298
1 300	8,594	6,608	7,925	5,939	0,2864	0,2202	0,2641	0,1979	10 300	343,3	13,460	0,4486
1 400	8,644	6,658	7,975	5,989	0,2881	0,2219	0,2658	0,1996	11 160	372,1	13,991	0,4663
1 500	8,687	6,701	8,021	6,035	0,2895	0,2233	0,2673	0,2011	12 030	401,0	14,495	0,4831
1 600	8,724	6,738	8,065	6,079	0,2907	0,2245	0,2688	0,2026	12 900	430,1	14,973	0,4990
1 700	8,757	6,771	8,105	6,119	0,2918	0,2256	0,2701	0,2039	13 780	459,2	15,427	0,5141
1 800	8,788	5,802	8,142	6,156	0,2928	0,2267	0,2713	0,2051	14 660	488,3	15,890	0,5285
1 900	8,816	6,830	8,176	6,190	0,2938	0,2276	0,2725	0,2063	15 530	517,8	16,273	0,5423
2 000	8,843	6,857	8,209	6,223	0,2947	0,2285	0,2736	0,2074	16 420	547,2	16,669	0,5555

Таблица 14

Окись углерода CO

Температура	Теплоемкость								Энтальпия		Энтропия	
t	μc_p	μc_v	μc_{pm}	μc_{vm}	c_p	c_v	c_{pm}	c_{vm}	μi	i	μs	s
°C	*ккал/кмоль·град*				*ккал/кг·град*				*ккал/кмоль*	*ккал/кг*	*ккал/кмоль·°K*	*ккал/кг·°K*
0	6,956	4,970	6,956	4,970	0,2483	0,1774	0,2483	0,1774	0	0	0	0
100	6,989	5,003	6,969	4,983	0,2495	0,1786	0,2488	0,1779	696,9	24,88	2,174	0,0776
200	7,081	5,095	6,999	5,013	0,2528	0,1819	0,2499	0,1790	1 400	49,98	3,842	0,1372
300	7,226	5,240	7,050	5,064	0,2580	0,1871	0,2517	0,1808	2 115	75,51	5,213	0,1861
400	7,398	5,412	7,115	5,129	0,2641	0,1932	0,2540	0,1831	2 846	101,6	6,388	0,2281
500	7,573	5,587	7,189	5,203	0,2704	0,1995	0,2567	0,1857	3 595	128,4	7,425	0,2651
600	7,739	5,753	7,267	5,281	0,2763	0,2054	0,2594	0,1885	4 360	155,6	8,356	0,2983
700	7,888	5,902	7,345	5,359	0,2816	0,2107	0,2622	0,1913	5 142	183,5	9,203	0,3286
800	8,019	6,033	7,421	5,435	0,2863	0,2154	0,2649	0,1940	5 937	211,9	9,981	0,3563
900	8,134	6,148	7,494	5,508	0,2904	0,2195	0,2675	0,1966	6 745	240,8	10,701	0,3820
1 000	8,233	6,247	7,563	5,577	0,2939	0,2230	0,2700	0,1991	7 563	270,0	11,370	0,4059
1 100	8,318	6,332	7,628	5,642	0,2970	0,2261	0,2723	0,2014	8 391	299,5	11,996	0,4283
1 200	8,393	6,407	7,689	5,703	0,2996	0,2287	0,2745	0,2046	9 227	329,4	12,583	0,4492
1 300	8,458	6,472	7,745	5,759	0,3020	0,2311	0,2765	0,2056	10 070	359,5	13,137	0,4690
1 400	8,514	6,528	7,799	5,813	0,3040	0,2330	0,2784	0,2075	10 920	389,8	13,660	0,4877
1 500	8,564	6,578	7,848	5,862	0,3057	0,2348	0,2802	0,2093	11 770	420,3	14,155	0,5054
1 600	8,608	6,622	7,894	5,908	0,3073	0,2364	0,2818	0,2109	12 630	450,9	14,626	0,5222
1 700	8,647	6,661	7,937	5,951	0,3087	0,2378	0,2834	0,2124	13 490	481,8	15,075	0,5382
1 800	8,682	6,696	7,978	5,992	0,3100	0,2390	0,2848	0,2139	14 360	512,6	15,503	0,5535
1 900	8,713	6,727	8,016	6,030	0,3111	0,2402	0,2862	0,2153	15 230	543,8	15,913	0,5681
2 000	8,741	6,755	8,051	6,065	0,3121	0,2412	0,2874	0,2165	16 100	574,8	16,306	0,5821

Таблица 15

Сернистый ангидрид SO_2

Температура	Теплоемкость								Энтальпия		Энтропия	
t	μc_p	μc_v	μc_{pm}	μc_{vm}	c_p	c_v	c_{pm}	c_{vm}	μi	i	μs	s
°C	*ккал/кмоль·град*				*ккал/кг·град*				*ккал/кмоль*	*ккал/кг*	*ккал/кмоль °K*	*ккал/кг·°K*
0	9,28	7,29	9,28	7,29	0,145	0,114	0,145	0,114	0	0	0	0
100	10,13	8,14	9,71	7,72	0,158	0,127	0,152	0,121	971	15,16	3,00	0,0468
200	10,88	8,89	10,11	8,12	0,170	0,139	0,158	0,127	2 022	31,56	5,51	0,0860
300	11,52	9,53	10,48	8,49	0,180	0,149	0,164	0,133	3 144	49,07	7,65	0,1194
400	12,00	10,01	10,80	8,81	0,187	0,156	0,169	0,138	4 320	67,43	9,54	0,1489
500	12,35	10,36	11,08	9,09	0,193	0,162	0,173	0,142	5 540	86,47	11,23	0,1753
600	12,63	10,64	11,31	9,32	0,197	0,166	0,176	0,145	6 786	105,9	12,75	0,1990
700	12,84	10,85	11,52	9,53	0,200	0,169	0,180	0,149	8 064	125,9	14,14	0,2206
800	13,00	11,01	11,69	9,70	0,203	0,172	0,182	0,151	9 352	146,0	15,40	0,2404
900	13,14	11,15	11,85	9,86	0,205	0,174	0,185	0,154	10 665	166,5	16,56	0,2585
1 000	13,24	11,25	11,98	9,99	0,207	0,176	0,187	0,156	11 980	187,0	17,64	0,2754
1 100	13,32	11,33	12,10	10,11	0,208	0,177	0,189	0,158	13 310	207,8	18,65	0,2911
1 200	13,39	11,40	12,20	10,21	0,209	0,178	0,190	0,159	14 640	228,5	19,59	0,3058

Таблица 16

Сероводород H_2S

Температура	Теплоемкость								Энтальпия		Энтропия	
t	μc_p	μc_v	μc_{pm}	μc_{vm}	c_p	c_v	c_{pm}	c_{vm}	μi	i	μs	s
°C	ккал/кмоль·град				ккал/кг·град				ккал/кмоль	ккал/кг	ккал/кмоль·°K	ккал/кг·°K
0	8,07	6,08	8,07	6,08	0,237	0,178	0,237	0,178	0	0	0	0
100	8,34	6,35	8,20	6,21	0,245	0,186	0,241	0,182	820	24,1	2,51	0,074
200	8,70	6,71	8,36	6,37	0,255	0,197	0,245	0,187	1 672	49,0	4,53	0,133
300	9,12	7,13	8,54	6,55	0,268	0,209	0,251	0,192	2 562	75,3	6,23	0,183
400	9,55	7,56	8,74	6,75	0,280	0,222	0,258	0,198	3 496	103,2	7,73	0,227
500	9,97	7,98	8,94	6,95	0,293	0,234	0,262	0,204	4 470	131,0	9,09	0,267
600	10,37	8,38	9,15	7,16	0,304	0,246	0,268	0,210	5 490	160,8	10,33	0,303
700	10,75	8,76	9,35	7,36	0,315	0,257	0,274	0,216	6 545	191,8	11,47	0,336
800	11,08	9,09	9,55	7,56	0,325	0,267	0,280	0,222	7 640	224,0	12,54	0,368
900	11,38	9,39	9,73	7,74	0,334	0,276	0,285	0,227	8 757	256,5	13,54	0,397
1 000	11,65	9,66	9,91	7,92	0,342	0,283	0,291	0,232	9 910	291,0	14,48	0,425
1 100	11,88	9,89	10,08	8,09	0,349	0,290	0,296	0,237	11 088	325,6	15,37	0,451
1 200	12,08	10,09	10,23	8,24	0,334	0,296	0,300	0,242	12 276	360,0	16,21	0,475

Таблица 17

Водяной пар H_2O

Температура	Теплоемкость								Энтальпия		Энтропия	
t	μc_p	μc_v	μc_{pm}	μc_{vm}	c_p	c_v	c_{pm}	c_{vm}	μi	i	μs	s
°C	ккал/кмоль·град				ккал/кг·град				ккал/кмоль	ккал/кг	ккал/кмоль·°K	ккал/кг·°K
0	8,001	6,015	8,001	6,015	0,4441	0,3339	0,4441	0,3339	0	0	0	0
100	8,134	6,148	8,059	6,073	0,4515	0,3413	0,4473	0,3371	805,9	44,73	2,481	0,1377
200	8,351	6,365	8,149	6,163	0,4635	0,3533	0,4523	0,3421	1 630	90,46	4,446	0,2468
300	8,607	6,621	8,258	6,272	0,4778	0,3675	0,4584	0,3481	2 477	137,5	6,066	0,3367
400	8,883	6,897	8,381	6,395	0,4931	0,3828	0,4652	0,3550	3 352	186,1	7,471	0,415
500	9,173	7,187	8,510	6,524	0,5092	0,3989	0,4724	0,3621	4 255	236,2	8,720	0,484
600	9,473	7,487	8,645	6,659	0,5258	0,4156	0,4799	0,3696	5 187	287,9	9,854	0,547
700	9,781	7,795	8,787	6,801	0,5429	0,4327	0,4877	0,3775	6 151	341,4	10,899	0,605
800	10,091	8,105	8,931	6,945	0,5601	0,4499	0,4957	0,3855	7 145	396,6	11,870	0,659
900	10,393	8,407	9,078	7,092	0,5769	0,4666	0,5039	0,3937	8 170	453,5	12,781	0,709
1 000	10,682	8,696	9,224	7,238	0,5929	0,4827	0,5120	0,4018	9 224	512,0	13,642	0,757
1 100	10,953	8,967	9,369	7,383	0,6080	0,4977	0,5200	0,4098	10 310	572,0	14,459	0,803
1 200	11,205	9,219	9,512	7,526	0,6220	0,5113	0,5280	0,4177	11 410	633,6	15,237	0,846
1 300	11,440	9,454	9,651	7,665	0,6350	0,5248	0,5357	0,4255	12 550	696,4	15,98	0,887
1 400	11,656	9,670	9,787	7,801	0,6470	0,5368	0,5432	0,4330	13 700	760,5	16,69	0,926
1 500	11,856	9,870	9,918	7,932	0,6581	0,5479	0,5505	0,4403	14 880	825,8	17,37	0,964
1 600	12,040	10,054	10,045	8,059	0,6683	0,5581	0,5576	0,4473	16 070	892,1	18,03	1,001
1 700	12,213	10,227	10,169	8,183	0,6779	0,5677	0,5644	0,4542	17 290	959,6	18,66	1,036
1 800	12,368	10,382	10,287	8,301	0,6865	0,5763	0,5710	0,4608	18 520	1027,8	19,27	1,069
1 900	12,510	10,524	10,399	8,413	0,6944	0,5842	0,5772	0,4670	19 760	1096,7	19,86	1,102
2 000	12,642	10,656	10,508	8,522	0,7017	0,5915	0,5833	0,4730	21 020	1168,5	20,43	1,134

Таблица 18

Двуокись углерода CO_2

Температура t	Теплоемкость								Энтальпия		Энтропия	
	μc_p	μc_v	μc_{pm}	μc_{vm}	c_p	c_v	c_{pm}	c_{vm}	μi	i	μs	s
°C	ккал/кмоль·град				ккал/кг·град				ккал/кмоль	ккал/кг	ккал/кмоль·°K	ккал/кг·°K
0	8,565	6,579	8,565	6,579	0,1946	0,1495	0,1946	0,1495	0	0	0	0
100	9,603	7,617	9,103	7,117	0,2182	0,1731	0,2068	0,1617	910,3	20,68	2,831	0,0643
200	10,435	8,449	9,568	7,582	0,2371	0,1920	0,2174	0,1723	1 914	43,48	5,210	0,1184
300	11,110	9,124	9,973	7,987	0,2524	0,2073	0,2266	0,1815	2 992	67,98	7,275	0,1653
400	11,670	9,684	10,330	8,344	0,2652	0,2200	0,2347	0,1896	4 132	93,88	9,107	0,2069
500	12,137	10,151	10,646	8,660	0,2758	0,2307	0,2419	0,1968	5 323	121,0	10,756	0,2444
600	12,528	10,542	10,928	8,942	0,2847	0,2395	0,2483	0,2032	6 557	149,0	12,256	0,2785
700	12,856	10,870	11,181	9,195	0,2921	0,2470	0,2541	0,2089	7 827	177,9	13,632	0,3098
800	13,131	11,145	11,408	9,422	0,2984	0,2532	0,2592	0,2141	9 126	207,4	14,903	0,3386
900	13,364	11,378	11,612	9,626	0,3037	0,2585	0,2638	0,2187	10 450	237,4	16,084	0,3655
1 000	13,560	11,574	11,797	9,811	0,3081	0,2630	0,2681	0,2229	11 800	268,1	17,185	0,3905
1 100	13,727	11,741	11,966	9,980	0,3119	0,2668	0,2719	0,2268	13 160	299,1	18,217	0,4139
1 200	13,870	11,884	12,119	10,133	0,3152	0,2700	0,2754	0,2302	14 540	330,5	19,187	0,4360
1 300	13,993	12,007	12,258	10,272	0,3180	0,2728	0,2785	0,2334	15 940	362,1	20,102	0,4568
1 400	14,099	12,113	12,386	10,400	0,3204	0,2752	0,2814	0,2363	17 340	394,0	20,968	0,4764
1 500	14,190	12,204	12,503	10,517	0,3224	0,2773	0,2841	0,2390	18 750	426,2	21,789	0,4951
1 600	14,268	12,282	12,611	10,625	0,3242	0,2791	0,2865	0,2414	20 180	458,4	22,569	0,5128
1 700	14,336	12,350	12,711	10,725	0,3257	0,2806	0,2888	0,2437	21 610	491,0	23,313	0,5297
1 800	14,395	12,409	12,803	10,817	0,3271	0,2820	0,2909	0,2458	23 050	523,6	24,026	0,5459
1 900	14,445	12,459	12,888	10,902	0,3282	0,2831	0,2928	0,2477	24 490	556,3	24,703	0,5613
2 000	14,487	12,501	12,967	10,981	0,3292	0,2840	0,2946	0,2495	25 930	589,2	25,354	0,5761

Таблица 19

Метан CH_4

Температура	Теплоемкость								Энтальпия		Энтропия	
t	μc_p	μc_v	μc_{pm}	μc_{vm}	c_p	c_v	c_{pm}	c_{vm}	μi	i	μs	s
°C	ккал/кмоль·град				ккал/кг·град				ккал/кмоль	ккал/кг	ккал/кмоль·°К	ккал/кг·°К
0	8,297	6,311	8,297	6,311	0,5172	0,3934	0,5172	0,3934	0	0	0	0
100	9,382	7,396	8,791	6,805	0,5848	0,4610	0,5480	0,4242	879,1	54,80	2,70	0,158
200	10,755	8,769	9,417	7,431	0,6704	0,5466	0,5870	0,4632	1 883	117,4	5,08	0,317
300	12,167	10,181	10,097	8,111	0,7584	0,6346	0,6294	0,5056	3 029	188,8	7,28	0,454
400	13,524	11,538	10,791	8,805	0,8430	0,7192	0,6727	0,5489	4 316	269,1	9,35	0,583
500	14,774	12,788	11,459	9,473	0,9210	0,7972	0,7143	0,5905	5 729	357,1	11,30	0,704
600	15,912	13,926	12,103	10,117	0,9919	0,8681	0,7545	0,6307	7 262	452,7	13,17	0,821
700	16,941	14,955	12,725	10,739	1,0560	0,9322	0,7932	0,6694	8 907	555,2	14,95	0,932
800	17,853	15,867	13,352	11,366	1,1129	0,9891	0,8323	0,7085	10 580	665,8	16,62	1,035
900	18,670	16,684	13,932	11,945	1,1638	1,0400	0,8685	0,7447	12 540	781,6	18,24	1,137
1 000	19,393	17,407	14,451	12,465	1,2089	1,0851	0,9008	0,7770	14 450	900,8	19,79	1,233
1 100	20,025	18,040	14,917	12,931	1,2483	1,1245	0,9299	0,8061	16 410	1 023	21,30	1,328
1 200	20,566	18,580	15,328	13,342	1,2820	1,1582	0,9555	0,8317	18 390	1 147	22,75	1,418

Таблица 20

Этан C_2H_6

Температура	Теплоемкость								Энтальпия		Энтропия	
t	μc_p	μc_v	μc_{pm}	μc_{vm}	c_p	c_v	c_{pm}	c_{vm}	μi	i	μs	s
°C	ккал/кмоль·град				ккал/кг·град				ккал/кмоль	ккал/кг	ккал/кмоль·°K	ккал/кг·°K
0	11,830	9,844	11,830	9,844	0,3934	0,3274	0,3934	0,3274	0	0	0	0
100	14,849	12,863	13,356	11,370	0,4938	0,4278	0,4442	0,3781	1 336	44,42	4,15	0,138
200	17,883	15,897	14,855	12,869	0,5947	0,5287	0,4940	0,4280	2 971	98,80	8,02	0,267
300	20,610	18,624	16,297	14,311	0,6854	0,6194	0,5420	0,4759	4 889	162,6	11,69	0,389
400	23,081	21,095	17,713	15,727	0,7676	0,7016	0,5891	0,5230	7 085	235,6	15,21	0,506
500	25,271	23,285	19,019	17,033	0,8405	0,7744	0,6325	0,5665	9 509	316,2	18,58	0,618
600	27,197	25,211	20,224	18,238	0,9045	0,8385	0,6726	0,6066	12 130	403,6	21,77	0,724
700	28,885	26,899	21,342	19,356	0,9507	0,8946	0,7098	0,6437	14 940	496,9	24,82	0,825
800	30,275	28,289	22,383	20,397	1,0069	0,9408	0,7444	0,6784	17 910	595,5	27,69	0,921
900	31,519	29,533	23,351	21,365	1,0483	0,9822	0,7765	0,7106	21 020	698,8	30,44	1,012
1 000	32,653	30,677	24,249	22,263	1,0863	1,0202	0,8065	0,7404	24 250	806,5	33,09	1,100
1 100	33,703	31,717	25,075	23,089	1,1209	1,0548	0,8339	0,7679	27 580	917,3	35,63	1,185
1 200	34,642	32,656	25,834	23,848	1,1521	1,0861	0,8592	0,7931	31 000	1 031	38,07	1,266

Таблица 21

Значения характеристических температур для некоторых газов[1]

Двухатомные		Многоатомные			
Газ	θ	Газ	θ_1	θ_2	θ_3
H_2	6 130	CO_2	954 (2)	1 920	3 360
Cl_2	801	N_2O	842 (2)	1 840	3 190
Br_2	461	H_2O	2 280	5 150	5 360
O_2	2 224	SO_2	750	1 650	1 950
N_2	3 350	NH_3	1 360	2 330 (2)	4 470 (3)
NO	2 705	CH_4	1 870 (3)	2 180 (3)	4 170 (2)
CO	3 085				4 320

[1] Данные заимствованы в [Л. 2].

Таблица 22

Величины $C = \mu R \left(\frac{\theta}{T}\right)^2 \frac{e^{\theta/T}}{(e^{\theta/T}-1)^2}$, *ккал/кмоль·град*

для одномерного гармонического осциллятора

θ/T	C	θ/T	C	θ/T	C
0	1,986	1,45	1,673	3,70	0,707
0,10	1,983	1,50	1,659	3,80	0,672
0,15	1,981	1,55	1,633	3,90	0,637
0,20	1,979	1,60	1,612	4,00	0,604
0,25	1,976	1,65	1,592	4,20	0,542
0,30	1,974	1,70	1,570	4,40	0,484
0,35	1,967	1,75	1,549	4,60	0,431
0,40	1,960	1,80	1,527	4,80	0,383
0,45	1,952	1,85	1,505	5,00	0,339
0,50	1,945	1,90	1,483	5,20	0,300
0,55	1,938	1,95	1,461	5,40	0,262
0,60	1,928	2,00	1,439	5,60	0,232
0,65	1,918	2,10	1,393	5,80	0,204
0,70	1,908	2,20	1,348	6,00	0,178
0,75	1,896	2,30	1,302	6,40	0,136
0,80	1,884	2,40	1,256	6,80	0,103
0,85	1,871	2,50	1,210	7,20	0,077
0,90	1,858	2,60	1,164	7,60	0,057
0,95	1,844	2,70	1,119	8,00	0,0427
1,00	1,829	2,80	1,074	8,40	0,032
1,05	1,814	2,90	1,030	8,80	0,023
1,10	1,798	3,00	0,986	9,20	0,017
1,15	1,782	3,10	0,943	9,60	0,012
1,20	1,765	3,20	0,901	10,00	0,009
1,25	1,747	3,30	0,860	11,00	0,004
1,30	1,729	3,40	0,820	12,00	0,0017
1,35	1,711	3,50	0,781	13,00	0,0007
1,40	1,692	3,60	0,744		

Таблица 23

Таблица приведенных плотностей веществ

$\tau_{кр}$	Жидкость на линии насыщения				$z = 1{,}0$				$z = 2{,}0$		
	Группа воды $z_{кр}=0{,}23$	I $z_{кр}=0{,}24\div0{,}26$	II $z_{кр}=0{,}26\div0{,}28$	III $z_{кр}=0{,}28\div0{,}30$	Группа воды $z_{кр}=0{,}23$	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		3,260	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	2,934	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	2,729	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	2,652	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	2,868	2,704	2,535	2,965	2,888	2,723	2,553	2,916	2,749	2,577

Продолжение табл. 23

$\tau_{кр}$	Жидкость на линии насыщения				$n=1,0$				$n=2,0$		
	Группа воды $z_{кр}=0,23$	I $z_{кр}=0,24\div0,26$	II $z_{кр}=0,27\div0,33$	III $z_{кр}=0,23\div0,30$	Группа воды $z_{кр}=0,23$	I $z_{кр}=0,24\div0,26$	II $z_{кр}=0,27\div0,33$	III $z_{кр}=0,23\div0,30$	I $z_{кр}=0,24\div0,26$	II $z_{кр}=0,27\div0,33$	III $z_{кр}=0,23\div0,30$
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	2,542
0,65	2,889	2,800	2,640	2,475	2,919	2,824	2,660	2,494	2,852	2,689	2,521
0,66	2,868	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	2,150	2,500	2,354	2,206

Продолжение табл. 23

$z_{кр}$	Жидкость на линии насыщения				$n=1,0$				$n=2,0$		
	Группа воды $z_{кр}=0,23$	I $z_{кр}=$ $=0,24\div0,26$	II $z_{кр}=$ $=0,26\div0,28$	III $z_{кр}=$ $=0,28\div0,30$	Группа воды $z_{кр}=0,23$	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 $z_{кр}=$ $=0,28\div0,30$
0,82	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	2,266	2,155	2,043	1,925	2,364	2,217	2,098	1,972	2,302	2,177	2,049
0,89	2,216	2,116	2,006	1,891	2,324	2,179	2,063	1,941	2,274	2,150	2,022
0,90	2,191	2,076	1,969	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	1,589	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	1,459	1,748	1,644	1,580	1,513	1,946	1,852	1,755
0,99	1,475	1,470	1,420	1,368	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

Таблица 24

Свойства насыщенного ртутного пара

p, кГ/см²	t_s, °С	i', ккал/кг	i'', ккал/кг	r, ккал/кг	s', ккал/кг·°К	s'', ккал/кг·°К	v', м³/кг	v'', м³/кг
0,0010	119,5	3,96	76,22	72,26	0,0119	0,1959	0,0000752	165,9
0,002	134,6	4,45	76,61	72,16	0,0132	0,1902	754	86,16
0,004	151,2	4,98	77,03	72,05	0,0145	0,1843	756	44,84
0,006	161,5	5,34	77,32	71,98	0,0152	0,1808	758	30,52
0,008	168,9	5,58	77,52	71,94	0,0158	0,1785	759	23,35
0,010	175,0	5,79	77,69	71,90	0,0163	0,1767	0,0000760	18,94
0,02	195,0	6,44	78,20	71,76	0,0178	0,1711	762	9,893
0,04	216,9	7,16	78,78	71,62	0,0193	0,1654	765	5,178
0,06	230,9	7,63	79,16	71,53	0,0202	0,1621	767	3,550
0,08	241,0	7,98	79,44	71,46	0,0208	0,1598	769	2,716
0,10	249,6	8,25	79,66	71,41	0,0213	0,1580	0,0000770	2,209
0,20	277,3	9,16	80,38	71,22	0,0231	0,1525	774	1,163
0,30	294,4	9,73	80,84	71,11	0,0241	0,1494	776	0,7995
0,40	308,0	10,18	81,19	71,01	0,0249	0,1471	778	0,6140
0,5	318,8	10,55	81,49	70,94	0,0255	0,1453	0,0000780	0,5003
0,6	328,0	10,86	81,74	70,88	0,0260	0,1439	781	0,4234
0,7	335,9	11,12	81,94	70,82	0,0265	0,1428	782	0,3677

p, кГ/см²	t_s, °С	i'', ккал/кг	r, ккал/кг	s'', ккал/кг·°К	s''', ккал/кг·°К	v'', м³/кг	v''', м³/кг
0,8	342,7	82,01	70,77	0,0269	0,1418	783	0,3253
0,9	349,2	82,29	70,73	0,0272	0,1408	784	0,2922
1,0	355,0	82,45	70,69	0,0275	0,1400	787	0,0000785	0,2655
1,2	365,3	82,63	70,62	0,0280	0,1386	787	0,2249
1,4	374,5	82,97	70,56	0,0285	0,1375	788	0,1953
1,6	381,9	83,14	70,50	0,0290	0,1365	789	0,1730
1,8	389,3	83,35	70,45	0,0294	0,1357	0,0000790	0,1555
2,0	396,8	83,51	70,40	0,0297	0,1349	791	0,1414
3,0	422,4	84,25	70,21	0,0309	0,1320	0,0000795	0,09789
4,0	442,4	84,80	70,06	0,0319	0,1298	798	0,07558
4,5	451,0	85,02	69,99	0,0323	0,1289	799	0,06801
5,0	458,9	85,23	69,93	0,0327	0,1282	0,0000801	0,06187
6,0	472,8	85,59	69,81	0,0334	0,1270	803	0,05254
7,0	485,1	85,91	69,71	0,0339	0,1258	805	0,04578
8,0	496,3	86,20	69,61	0,0344	0,1249	806	0,04065
9,0	506,3	86,47	69,53	0,0349	0,1241	0,0000808	0,03660
10	515,5	86,70	69,45	0,0353	0,1234	0,0000809	0,03333

Таблица 25

Свойства насыщенного пара углекислоты

Над твердой углекислотой

t, °С	p, кГ/см²	Теплота сублимации $r_{суб}$, ккал/кг	Теплота испарения r, ккал/кг	Теплосодержание i', ккал/кг	Теплосодержание i'', ккал/кг	Энтропия s', ккал/кг·°К	Энтропия s'', ккал/кг·°К	Удельный объем v', м³/кг	Удельный объем v'', м³/кг
—100	0,142	0,000627	2,336	0,5996	1,4070	10,9	150,7	0,0676	2,336
—95	0,256	0,000629	1,442	0,6074	1,3859	12,2	151,4	0,0677	1,442
—90	0,379	0,000632	0,920	0,6150	1,3718	13,6	152,2	0,0679	0,920
—85	0,596	0,000635	0,598	0,6224	1,3554	15,0	152,9	0,0681	0,598
—80	0,914	0,000639	0,398	0,6299	1,3398	16,4	153,5	0,0683	0,398
—78,9	1,00	0,000639	0,3651	0,6314	1,3363	16,73	153,62	0,0683	0,3651
—75	1,37	0,000643	0,2694	0,6376	1,3248	17,9	154,1	0,0685	0,2694
—70	2,02	0,000647	0,1854	0,6459	1,3103	19,6	154,5	0,0688	0,1854
—65	2,93	0,000652	0,1293	0,6551	1,2960	21,5	154,9	0,0691	0,1293
—60	4,18	0,000657	0,0912	0,6655	1,2810	23,7	155,1	0,0694	0,0912
—56,6	5,28	0,000661	0,0722	0,6725	1,2724	25,2	155,1	0,0697	0,0722

Над жидкой углекислотой

t, °С	p, кГ/см²	v', м³/кг	s', ккал/кг·°К	s'', ккал/кг·°К	i', ккал/кг	i'', ккал/кг	r, ккал/кг
—56,6	5,28	0,000849	0,0722	0,8885	1,2724	72,0	155,1	83,1
—55	5,66	0,000853	0,0676	0,8917	1,2700	72,7	155,2	82,5
—50	6,97	0,000867	0,0554	0,9020	1,2631	75,0	155,6	80,6
—45	8,49	0,000881	0,0458	0,9120	1,2565	77,3	155,9	78,6
—40	10,25	0,000897	0,0382	0,9218	1,2503	79,6	156,2	76,6
—35	12,26	0,000913	0,0320	0,9314	1,2443	81,9	156,4	74,5
—30	14,55	0,000931	0,0270	0,9408	1,2385	84,2	156,6	72,4
—25	17,14	0,000950	0,0229	0,9501	1,2328	86,5	156,7	70,2
—20	20,06	0,000971	0,0195	0,9594	1,2272	88,9	156,7	67,8
—15	23,34	0,000994	0,0166	0,9690	1,2218	91,4	156,7	65,3
—10	26,99	0,001019	0,0142	0,9787	1,2163	94,1	156,6	62,5
—5	31,05	0,001048	0,0121	0,9890	1,2109	96,9	156,4	59,5
0	35,54	0,001081	0,0104	1,0000	1,2055	100,0	156,1	56,1
5	40,50	0,001120	0,00885	1,0103	1,1985	103,1	155,5	52,4
10	45,95	0,001166	0,00752	1,0218	1,1917	106,5	154,6	48,1
15	51,93	0,001223	0,00632	1,0340	1,1835	110,1	153,2	43,1
20	58,46	0,001298	0,00526	1,0468	1,1734	114,0	151,1	37,1
25	65,59	0,001417	0,00417	1,0628	1,1585	118,8	147,3	28,5
30	73,34	0,001677	0,00299	1,0854	1,1351	125,9	141,0	15,1
31	74,96	0,002156	0,00216	1,1098	1,1098	133,5	133,5	0

Свойства насыщенного пара аммиака

t, °C	p, кГ/см²	v', м³/кг	v'', м³/кг	s', ккал/кг·°К	s'', ккал/кг·°К	i', ккал/кг	i'', ккал/кг	r, ккал/кг
—75	0,0765	0,001368	12,89	0,9633	2,4431	20,9	373,5	352,6
—70	0,111	0,001379	9,01	0,6878	2,4101	25,9	375,7	349,8
—65	0,160	0,0013990	6,46	0,7123	2,3794	31,0	377,9	346,9
—60	0,223	0,001401	4,70	0,7366	2,3504	36,1	380,0	343,9
—55	0,308	0,001413	3,49	0,7601	2,3233	41,2	382,1	340,9
—50	0,417	0,001425	2,62	0,7832	2,2978	46,2	384,1	337,9
—45	0,557	0,001437	2,01	0,8065	2,2738	51,5	386,1	334,6
—40	0,732	0,001449	1,55	0,8295	2,2510	56,8	388,1	331,3
—35	0,951	0,001462	1,22	0,8520	2,2294	62,1	390,0	327,9
—30	1,219	0,001476	0,963	0,8742	2,2090	67,4	391,9	324,5
—25	1,546	0,001490	0,772	0,8960	2,1896	72,7	393,7	321,0
—20	1,940	0,001504	0,624	0,9174	2,1710	78,2	395,5	317,3
—15	2,410	0,001519	0,509	0,9385	2,1532	83,6	397,1	313,5
—10	2,966	0,001534	0,419	0,9593	2,1362	89,0	398,7	309,7
—5	3,619	0,001550	0,347	0,9798	2,1199	94,5	400,1	305,6
0	4,379	0,001556	0,290	1,0000	2,1041	100,0	401,5	301,5
5	5,259	0,001583	0,244	1,0200	2,0889	105,5	402,8	297,3
10	6,271	0,001601	0,206	1,0397	2,0741	111,1	403,9	292,8
15	7,427	0,001619	0,175	1,0592	2,0598	116,7	405,0	288,3
20	8,741	0,001639	0,149	1,0785	2,0459	122,4	405,9	283,5
25	10,23	0,001659	0,128	1,0976	2,0324	128,1	406,8	278,7
30	11,90	0,001680	0,111	1,1165	2,0191	133,8	407,4	273,6
35	13,77	0,001702	0,0959	1,1352	2,0061	139,7	408,0	268,3
40	15,85	0,001726	0,0833	1,1538	1,9933	145,5	408,4	262,9
45	18,17	0,001750	0,0727	1,1722	1,9807	151,4	408,6	257,2
50	20,73	0,001777	0,0635	1,1904	1,9681	157,4	408,7	251,3

Таблица насыщенных паров фреона-12

Температура		Давление абсолютное p, кГ/см²	Удельный объем		Плотность		Энтальпия		Теплота парообразования r, ккал/кг	Энтропия		Отношение теплоты парообразования к абсолютной температуре r/T, ккал/кг·°К
t, °С	T, °К		жидкости v', дм³/кг	пара v'', м³/кг	жидкости ρ', кг/м³	пара ρ'', кг/м³	жидкости i', ккал/кг	пара i'', ккал/кг		жидкости s', ккал/кг·°К	пара s'', ккал/кг·°К	
—20	253,1	1,5396	0,6868	0,1107	1,456	9,034	95,65	134,71	39,06	0,98365	1,13798	0,15433
—19	254,1	1,6005	0,6882	0,1067	1,453	9,372	95,87	134,83	38,96	0,98448	1,13783	0,15335
—18	255,1	1,6627	0,6897	0,1030	1,450	9,709	96,08	134,95	38,87	0,98531	1,13768	0,15237
—17	256,1	1,7275	0,6911	0,09938	1,447	10,06	96,29	135,06	38,77	0,98614	1,13753	0,15139
—16	257,1	1,7940	0,6925	0,09597	1,444	10,42	96,50	135,17	38,67	0,98696	1,13738	0,15042
—15	258,1	1,8622	0,6940	0,09268	1,441	10,79	96,72	135,29	38,57	0,98778	1,13723	0,14945
—14	259,1	1,9321	0,6954	0,08952	1,438	11,17	96,98	135,40	38,47	0,98860	1,13709	0,14849
—13	260,1	2,0050	0,6973	0,08650	1,434	11,56	97,15	135,52	38,37	0,98942	1,13695	0,14753
—12	261,1	2,0793	0,6988	0,08361	1,431	11,96	97,36	135,63	38,27	0,99025	1,13682	0,14657
—11	262,1	2,1565	0,7003	0,08082	1,428	12,37	97,58	135,75	38,17	0,99107	1,13668	0,14561
—10	263,1	2,2342	0,7018	0,07813	1,425	12,80	97,80	135,87	38,07	0,99188	1,13657	0,14469
—9	264,1	2,3148	0,7032	0,07558	1,422	13,23	98,02	135,98	37,96	0,99270	1,13644	0,14374
—8	265,1	2,3984	0,7047	0,07313	1,419	13,68	98,23	136,09	37,86	0,99351	1,13633	0,14282
—7	266,1	2,4833	0,7062	0,07078	1,416	14,13	98,45	136,20	37,75	0,99432	1,13620	0,14188
—6	267,1	2,5712	0,7077	0,06852	1,413	14,60	98,67	136,32	37,65	0,99514	1,13609	0,14095
—5	268,1	2,6602	0,7092	0,06635	1,410	15,08	98,89	135,43	37,54	0,99595	1,13598	0,14003
—4	269,1	2,7531	0,7107	0,06427	1,407	15,57	99,11	136,54	37,43	0,99676	1,13586	0,13910

Продолжение табл. 27

Температура		Давление абсолютное p, кг/см²	Удельный объем		Плотность		Энтальпия		Теплота парообразования r, ккал/кг	Энтропия		Отношение теплоты парообразования к абсолютной температуре r/T, ккал/кг·°К
t, °С	T, °К		жидкости v', м³/кг	пара v'', м³/кг	жидкости ρ', кг/м³	пара ρ'', кг/м³	жидкости i', ккал/кг	пара i'', ккал/кг		жидкости s', ккал/кг·°К	пара s'', ккал/кг·°К	
—3	270,1	2,8479	0,7127	0,06226	1,403	16,07	99,33	136,65	37,32	0,99757	1,13575	0,13818
—2	271,1	2,9439	0,7143	0,06028	1,400	16,59	99,56	136,77	37,21	0,99839	1,13566	0,13727
—1	272,1	3,0446	0,7158	0,05844	1,397	17,11	99,78	136,88	37,10	0,99919	1,13555	0,13636
0	273,1	3,1465	0,7173	0,05667	1,394	17,65	100,00	136,99	36,99	1,00000	1,13546	0,13546
1	274,1	3,2611	0,7189	0,05496	1,391	18,20	100,22	137,10	36,88	1,00081	1,13535	0,13454
2	275,1	3,3583	0,7205	0,05330	1,388	18,76	100,45	137,21	36,76	1,00161	1,13524	0,13363
3	276,1	3,4676	0,7220	0,05168	1,385	19,35	100,67	137,32	36,65	1,00242	1,13515	0,13273
4	277,1	3,5804	0,7241	0,05012	1,381	19,95	100,90	137,43	36,53	1,00322	1,13506	0,13184
5	278,1	3,6959	0,7267	0,04863	1,378	20,56	101,12	137,54	36,42	1,00402	1,13497	0,13095
6	279,1	3,8135	0,7273	0,04721	1,375	21,18	101,35	137,65	36,30	1,00483	1,13488	0,13005
7	280,1	3,9348	0,7289	0,04583	1,372	21,82	101,58	137,76	36,18	1,00563	1,13480	0,12917
8	281,1	4,0582	0,7310	0,04450	1,368	22,47	101,80	137,86	36,06	1,00643	1,13471	0,12828
9	282,1	4,1853	0,7326	0,04323	1,365	23,13	102,03	137,97	35,94	1,00723	1,13462	0,12739
10	283,1	4,3135	0,7342	0,04204	1,362	23,79	102,26	138,08	35,82	1,00803	1,13453	0,12652
11	284,1	4,4466	0,7358	0,04086	1,359	24,48	102,49	138,18	35,69	1,00883	1,13446	0,12563
12	285,1	4,5228	0,7380	0,03970	1,355	25,19	102,72	138,29	35,57	1,00963	1,13439	0,12476
13	286,1	4,7209	0,7396	0,03858	1,352	25,92	102,95	138,39	35,44	1,01042	1,13430	0,12388
14	287,1	4,8521	0,7413	0,03751	1,349	26,66	103,18	138,49	35,31	1,01122	1,13422	0,12300
15	288,1	5,0076	0,7435	0,03648	1,345	27,41	103,42	138,61	35,19	1,01201	1,13414	0,12213

Температура		Давление абсолютное P, кГ/см²	Удельный объем		Плотность		Энтальпия		Теплота парообразования r, ккал/кг	Энтропия		Отношение теплоты парообразования к абсолютной температуре $\frac{r}{T}$, ккал/кг·°К
t, °С	T, °К		жидкости v', м³/кг	пара v'', м³/кг	жидкости ρ', кг/м³	пара ρ'', кг/м³	жидкости i', ккал/кг	пара i'', ккал/кг		жидкости s', ккал/кг·°К	пара s'', ккал/кг·°К	
16	289,1	5,1550	0,7452	0,03547	1,342	28,19	103,65	138,70	35,05	1,01281	1,13407	0,12126
17	290,1	5,3067	0,7468	0,03449	1,339	28,99	103,88	138,81	34,93	1,01361	1,13400	0,12039
18	291,1	5,4605	0,7491	0,03354	1,335	29,87	104,12	138,91	34,79	1,01440	1,13392	0,11952
19	292,1	5,6172	0,7507	0,03283	1,332	30,65	104,35	139,01	34,66	1,01519	1,13385	0,11886
20	293,1	5,7786	0,7524	0,03175	1,329	31,50	104,59	139,12	34,53	1,01598	1,13378	0,11780
21	294,1	5,9432	0,7547	0,03089	1,325	32,38	104,82	139,21	34,39	1,01678	1,13372	0,11694
22	295,1	6,1112	0,7570	0,03005	1,321	33,28	105,06	139,31	34,25	1,01757	1,13364	0,11607
23	296,1	6,2825	0,7587	0,02925	1,318	34,19	105,29	139,40	34,11	1,01835	1,13356	0,11521
24	297,1	6,4584	0,7605	0,02848	1,315	35,11	105,53	139,50	33,97	1,01914	1,13350	0,11436
25	298,1	6,6363	0,7628	0,02773	1,311	36,07	105,77	139,61	33,84	1,01993	1,13344	0,11351
26	299,1	6,8175	0,7645	0,02700	1,308	37,04	106,01	139,70	33,69	1,02702	1,13337	0,11265
27	300,1	7,0020	0,7669	0,02629	1,304	38,04	106,25	139,79	33,54	1,02151	1,13329	0,11178
28	301,1	7,1933	0,7692	0,02550	1,300	39,06	106,49	139,89	33,40	1,02229	1,13322	0,11093
29	302,1	7,3863	0,7710	0,02494	1,297	40,10	106,73	139,98	33,25	1,02307	1,13315	0,11008
30	303,1	7,5810	0,7734	0,02433	1,293	41,11	106,97	140,08	33,11	1,02387	1,13310	0,10923
31	304,1	7,7826	0,7758	0,02371	1,289	42,18	107,21	140,16	32,95	1,02465	1,13301	0,10836
32	305,1	7,9897	0,7782	0,02309	1,285	43,31	107,45	140,25	32,80	1,02543	1,13294	0,10751
33	306,1	8,2003	0,7800	0,02250	1,282	44,45	107,69	140,34	32,65	1,02620	1,13286	0,10666
34	307,1	8,4087	0,7825	0,02192	1,278	45,62	107,94	140,43	32,49	1,02699	1,13280	0,10581

ЛИТЕРАТУРА

1. Андрющенко А. И., Термодинамические расчеты оптимальных параметров тепловых электростанций, «Высшая школа», 1963

2 Бродский А И, Физическая химия, Госхимиздат, 1948

3 Всесоюзный теплотехнический институт, Таблицы термодинамических свойств газов, Госэнергоиздат, 1953.

4. Вукалович М П., Термодинамические свойства воды и водяного пара, Машгиз — Verlag Technik, 1958.

5. Вукалович М. П., Дзампов Б. В., Зубарев В Н., «Теплоэнергетика», 1960, № 2

6 Вукалович М. П., Кириллин В. А., Ремизов С. А., Силецкий В. С., Тимофеев В. Н., Термодинамические свойства газов, Машгиз, 1953.

7 Вукалович М. П., Новиков И. И., Техническая термодинамика, Госэнергоиздат, 1962.

8 ГОСТ 9867-61. Международная система единиц

9. ГОСТ 7664-61. Механические единицы.

10. ГОСТ 8550-61. Тепловые единицы.

11. Дейч М. Е., Техническая газодинамика, Госэнергоиздат, 1953.

12 Зубарев В Н, Маркин В А, «Теплоэнергетика», 1961, № 7.

13. Зысин В. А., Комбинированные парогазовые установки и циклы, Госэнергоиздат, 1962.

14. Калафати Д. Д., Регенеративные циклы паросиловых установок, МЭИ, 1954.

15. Карапетьянц М. Х., Химическая термодинамика, Госхимиздат, 1953.

16. Кириллин В. А., Шейндлин А. Е., Шпильрайн Э. Э., Задачник по технической термодинамике, Госэнергоиздат, 1957.

17. Михеев М. А., Основы теплопередачи, Госэнергоиздат, 1958.