

ТЕХНИЧЕСКАЯ ТЕРМОДИНАМИКА

*Методические указания к практическим занятиям
для студентов направления подготовки 18.03.01*

**САНКТ-ПЕТЕРБУРГ
2022**

Министерство науки и высшего образования Российской Федерации
Федеральное государственное бюджетное образовательное
учреждение высшего образования
Санкт-Петербургский горный университет

Кафедра химических технологий и переработки энергоносителей

ТЕХНИЧЕСКАЯ ТЕРМОДИНАМИКА

*Методические указания к практическим занятиям
для студентов направления подготовки 18.03.01*

САНКТ-ПЕТЕРБУРГ
2022

УДК 536.7 (073)

ТЕХНИЧЕСКАЯ ТЕРМОДИНАМИКА: Методические указания к практическим занятиям / Санкт-Петербургский горный университет. Сост.: *О.В. Зырянова, Э.Ю.Георгиева*. СПб, 2022, 65 с.

В методических указаниях дисциплины «Техническая термодинамика» приведены теоретический материал и примеры решения задач по основным разделам дисциплины, задачи для работы студентов на практических занятиях и самостоятельной работы.

Предназначены для студентов бакалавриата направления 18.03.01 «Химическая технология» профилей «Химическая технология природных энергоносителей и углеродных материалов» и «Химическая технология неорганических веществ».

Научный редактор проф. *Н.К. Кондрашева*

Рецензенты *М.А. Ласточкина* (ООО "Институт Гипроникель")

© Санкт-Петербургский
горный университет, 2022

ТЕХНИЧЕСКАЯ ТЕРМОДИНАМИКА

***Методические указания к практическим занятиям
для студентов бакалавриата направления 18.03.01***

Сост.: *О.В. Зырянова, Э.Ю.Георгиева*

Печатается с оригинал-макета, подготовленного кафедрой
химических технологий и переработки энергоносителей

Ответственный за выпуск *О.В. Зырянова*

Лицензия ИД № 06517 от 09.01.2002

Подписано к печати 25.05.2022. Формат 60×84/16.
Усл. печ. л. 3,7. Усл.кр.-отт. 3,7. Уч.-изд.л. 3,3. Тираж 50 экз. Заказ 308.

Санкт-Петербургский горный университет
РИЦ Санкт-Петербургского горного университета
Адрес университета и РИЦ: 199106 Санкт-Петербург, 21-я линия, 2

ВВЕДЕНИЕ

Учебная дисциплина «Техническая термодинамика» к обязательной части основной профессиональной образовательной программы по направлению подготовки 18.03.01 «Химическая технология» направления профилей «Химическая технология природных энергоносителей и углеродных материалов» и «Химическая технология неорганических веществ».

В результате изучения дисциплины студенты должны знать основные законы термодинамики, научиться самостоятельно проводить элементарный термодинамический анализ теплотехнических систем, определять условия и диапазон рабочих характеристик протекающих процессов, проводить анализ полученных результатов.

Методические указания составлены в соответствии с программой дисциплины «Техническая термодинамика» и предназначены для практических занятий студентов.

В каждой главе даны краткие теоретические сведения, основные расчетные формулы и соотношения. Все разделы содержат типовые задачи с решениями, которые могут быть использованы в практических расчетах.

В приложениях приводится основной справочный материал, необходимый для работы студентов.

1 ПАРАМЕТРЫ СОСТОЯНИЯ ТЕЛА

1.1 Основные понятия термодинамики

Термодинамика - это наука, которая изучает процессы превращения энергии, происходящие в различных технических устройствах, в которых используется теплота. Такие устройства весьма многочисленны и применяются в самых различных отраслях промышленности.

Термодинамической системой называют тело или совокупность тел, выделенных из окружающей среды реальной или воображаемой поверхностью, через которую может осуществляться взаимодействие рассматриваемой системы с окружающей средой.

Если состояние системы не изменяется с течением времени, то считается, что система находится в состоянии равновесия.

Если система находится в состоянии равновесия, она может быть выведена из этого состояния в результате внешнего воздействия. Изменение состояния системы с течением времени называется *термодинамическим процессом*.

Состояние системы характеризуется ограниченным числом величин, однозначно определяющих его и называемых параметрами состояния.

1.2 Основные параметры состояния газообразных тел

Параметрами состояния тел называются величины, определяющие состояние этих тел. К основным параметрам состояния газообразных тел относятся: удельный объем, давление и температура.

Удельным объемом в термодинамике называется объем 1 кг вещества, выраженный в кубических метрах; он обозначается через v . Если полный объем тела обозначить через V м³, а массу его через m кг, то

$$v = \frac{V}{m}, \text{ м}^3/\text{кг} \quad (1.1)$$

Давление p измеряют силой, приходящейся на единицу поверхности. Так как за единицу силы принимают ньютон, а за единицу поверхности – квадратный метр, то давление измеряют в давлениях на квадратный метр (Н/м²).

Абсолютное давление определяется по соотношению

$$p_{\text{абс}} = p_{\text{ман}} + B. \quad (1.2)$$

где B – атмосферное или барометрическое давление; $p_{\text{ман}}$ – избыточное или манометрическое давление.

Вакуумметры служат для измерения давления ниже атмосферного. По их показаниям судят, насколько давление рассматриваемой среды меньше атмосферного (вакуум, разрежение). Абсолютное давление в этом случае определяется по равенству:

$$p_{\text{абс}} = B - p_{\text{вак}}. \quad (1.3)$$

При измерении давления высотой ртутного столба следует иметь в виду, что показание прибора зависит не только от давления измеряемой среды, но и от температуры ртути. При температуре ртути выше 0°C плотность ее меньше, а следовательно, показания прибора выше, чем при том же давлении и при температуре равной 0°C . При температуре ртути ниже 0°C будут иметь обратные соотношения. Истинные значения показаний ртутных приборов, приведенный к 0°C , можно легко получить, используя следующее соотношение

$$B_0 = B(1 - 0,000172 \cdot t). \quad (1.4)$$

где B_0 – показания барометра, приведенного к $t_0^\circ\text{C}$; B - действительная высота ртутного столба при температуре воздуха $t^\circ\text{C}$; $0,000172$ – коэффициент объемного расширения ртути.

Примеры решения задач

Пример 1.1. Вакуумметр парового котла показывает 8 кгс/см^2 . Как велико абсолютное давление пара в котле, если показание ртутного барометра равно 74 см рт. ст. при 20°C в помещении?

Решение. Барометрическое давление, приведенное к 0°C , по уравнению (1.4)

$$B_0 = 700 \cdot (1 - 0,000172 \cdot 25) = 697 \text{ мм рт. ст.}$$

и, следовательно, по уравнению (1.2)

$$p_{\text{абс}} = 8 \cdot 9,81 \cdot 10^4 + 13600 \cdot 9,81 \cdot 0,697 = 8,8 \cdot 10^5 \text{ Па.}$$

Пример 1.2. Вакуумметр конденсатора паровой машины показывает 625 мм рт. ст. Какого абсолютное давление в конденсаторе, если показание ртутного барометра равно 740 мм рт. ст. при 20°C в помещении?

Решение. Барометрическое давление, приведенное к 0°C , по уравнению (1.4)

$$B_0 = 740 \cdot (1 - 0,000172 \cdot 20) = 737 \text{ мм рт. ст.}$$

и, следовательно, по уравнению (1.3)

$$p_{\text{абс}} = 13600 \cdot 9,81 \cdot 0,737 - 13600 \cdot 9,81 \cdot 0,625 = 1,49 \cdot 10^4 \text{ Па.}$$

Пример 1.3. Найти абсолютное давление пара в котле, если манометр показывает $p = 0,13$ МПа, а атмосферное давление по ртутному барометру составляет $B = 680$ мм рт. ст. (90660 Па) при температуре 25 °С.

Решение. По формуле (1.2)

$$p_{\text{абс}} = p_{\text{ман}} + B.$$

Показание барометра получено при температуре ртути 25 °С. Это показание необходимо привести к 0 °С.

$$B_0 = 90660 \cdot (1 - 0,000172 \cdot 25) = 90270 \text{ Па}$$

Тогда абсолютное давление пара в котле

$$p_{\text{абс}} = 0,13 + 0,09 = 0,22 \text{ МПа}$$

Пример 1.4. Определить абсолютное давление газа в резервуаре, если ртутный манометр показывает давление 305 мм рт. ст., а барометр 745 мм рт. ст.

Решение. Абсолютное давление в резервуаре $p_{\text{абс}}$ больше барометрического, поэтому оно равно сумме манометрического (избыточного) $p_{\text{м}}$ и барометрического $p_{\text{б}}$ давлений:

$$p_{\text{абс}} = p_{\text{б}} + p_{\text{м}} = 1050 \text{ мм рт.ст.} = 1,4 \cdot 10^5 \text{ Н/м}^2 = 1,4 \text{ бар}$$

Задачи

1.1. Масса 1 м^3 метана при определенных условиях составляет $0,7$ кг. Определить плотность и удельный объем метана при этих условиях.

1.2. Плотность воздуха при определенных условиях равна $1,293 \text{ кг/м}^3$. Определить удельный объем воздуха при этих условиях.

1.3. В сосуде объемом $0,9 \text{ м}^3$ находится $1,5$ кг окиси углерода. Определить удельный объем и плотность окиси углерода при указанных условиях.

1.4. Давление воздуха по ртутному барометру равно 770 мм рт. ст. при 0 °С. Выразить это давление в Па.

1.5. Давление воздуха, измеренное ртутным барометром, равно 760 мм рт. ст. при температуре ртути $t = 20$ °С. Выразить это давление в Па.

1.6. Определить абсолютное давление в сосуде, если показание присоединенного к нему ртутного манометра равно 66,7 кПа (500 мм рт. ст.), а атмосферное давление по ртутному барометру составляет 100 кПа (750 мм рт. ст.). Температура воздуха в месте установки приборов равна 0 °С.

1.7. Найти абсолютное давление пара в котле, если манометр показывает 0,13 МПа, а атмосферное давление составляет 680 мм рт. ст. при температуре 25 °С.

1.8. Какая высота ртутного столба соответствует 100 кПа?

2 ИДЕАЛЬНЫЕ ГАЗЫ И ОСНОВНЫЕ ГАЗОВЫЕ ЗАКОНЫ

Под идеальным газом понимают воображаемый газ, в котором отсутствуют силы притяжения между молекулами, а собственный объем молекул мал по сравнению с объемом межмолекулярного пространства.

Характеристическое уравнение идеального газа или уравнение состояния связывает между собой основные параметры состояния – давление, объем и температуру – и может быть представлено следующими уравнениями:

$$pV = mRT; \quad (2.1)$$

$$pv = RT; \quad (2.2)$$

$$pV_m = R_m T, \quad (2.3)$$

где p – давление газа в Па; V – объем газа в м³; m – масса газа в кг; v – удельный объем газа в м³/кг; V_m – объем 1 кмоль газа в м³/кмоль; R – газовая постоянная для 1 кг газа в Дж/(кг·К); R_m – универсальная газовая постоянная 1 кмоль газа в Дж/(кг·К).

Каждое из этих уравнений отличается от другого лишь тем, что относится к различным массам газа; первое – к m кг; второе – к 1 кг; третье – 1 кмолью газа.

Пользуясь характеристическим уравнением для двух различных состояний какого-либо газа, можно получить выражения для

определения любого параметра при переходе от одного состояния к другому, если значения остальных параметров известны:

$$\frac{p_1 v_1}{T_1} = \frac{p_2 v_2}{T_2}; \quad (2.4)$$

$$\frac{p_1 V_1}{T_1} = \frac{p_2 V_2}{T_2}; \quad (2.5)$$

Если температура газа не изменяется ($T = \text{const}$), то давление газа и его удельный объем связаны следующей зависимостью (закон Бойля-Мариотта):

$$pv = \text{const}. \quad (2.6)$$

Если давление газа остается постоянным ($p = \text{const}$), то соотношение между удельным объемом газа и его абсолютной температурой подчиняется закону Гей-Люссака:

$$\frac{v}{T} = \text{const}. \quad (2.7)$$

Уравнение (2.5) часто применяют для приведения объема к нормальным условиям, т.е. для определения объема, занимаемого газом, при $p_0 = 101325$ Па и $T_0 = 273,15$ К ($p_0 = 760$ мм рт. ст. и $t_0 = 0^\circ\text{C}$), если объем его при каких-либо значениях p и t известен. Для этого случая уравнения (2.5) обычно представляют в виде

$$\frac{pV}{T} = \frac{p_0 V_0}{T_0}; \quad (2.8)$$

В правой части уравнения все величины взяты при нормальных условиях, в левой – при произвольных значениях давления и температуры.

Уравнение (2.8) можно переписать следующим образом:

$$\rho = \rho_0 \frac{p T_0}{p_0 T}. \quad (2.9)$$

Примеры решения задач

Пример 2.1. Во сколько раз объем определенной массы газа при $-20\text{ }^{\circ}\text{C}$ меньше, чем при $+20\text{ }^{\circ}\text{C}$, если давление в обоих случаях одинаковое?

Решение. При постоянном давлении объем газа изменяется по уравнению

$$\frac{v}{T} = \text{const} \text{ или } \frac{V_2}{V_1} = \frac{T_2}{T_1},$$

следовательно,

$$\frac{V_2}{V_1} = \frac{273+20}{273-20} = 1,16.$$

Пример 2.2. Какой объем занимает 1 кг азота при температуре $70\text{ }^{\circ}\text{C}$ и давлении $0,2\text{ МПа}$?

Решение. Из характеристического уравнения для 1 кг газа имеет

$$v = \frac{RT}{p} = \frac{8314 \cdot (273+70)}{28,016 \cdot 0,2 \cdot 10^6} = 0,509 \text{ м}^3/\text{кг}$$

Пример 2.3. Определить плотность кислорода при $p = 0,2\text{ МПа}$ и $t = 35\text{ }^{\circ}\text{C}$.

Решение. В соответствии с уравнением (2.9) имеем

$$\rho = \rho_0 \frac{pT_0}{p_0T} = \frac{32}{22,4} \frac{0,2 \cdot 10^6 \cdot 273}{1,013 \cdot 10^5 \cdot 308} = 2,5 \text{ кг/м}^3$$

Пример 2.4. Определить расход метана в газопроводе диаметром $d = 800\text{ мм}$, если скорость течения газа 15 м/сек , абсолютное давление $p_{\text{абс}} = 50\text{ бар}$, а температура 10°C .

Решение. Площадь поперечного сечения газопровода

$$F = (\pi d^2)/4 = (3,14 \cdot 0,8)^2/4 = 0,502 \text{ м}^2$$

Плотность метана

$$\rho = p/RT = (50 \cdot 10^5)/518,8 \cdot 283 = 32,2 \text{ кг/м}^3$$

Массовый расход

$$m = F \cdot \rho \cdot W = 0,502 \cdot 32,2 \cdot 15 = 257 \text{ кг/с}$$

Задачи

2.1. Определить плотность окиси углерода CO при давлении 0,1 МПа и $t = 15\text{ }^\circ\text{C}$.

2.2. Найти плотность и удельный объем двуокиси углерода CO₂ при нормальных условиях.

2.3. Определить удельный объем кислорода при давлении 2,3 МПа и температуре $t = 280\text{ }^\circ\text{C}$.

2.4. Плотность воздуха при нормальных условиях равна 1,293 кг/м³. Чему равна плотность воздуха при давлении $p = 1,5\text{ МПа}$ и температуре $t = 20\text{ }^\circ\text{C}$.

2.5. Определить массу углекислого газа в сосуде с объемом $V = 4\text{ м}^3$ при $t = 80\text{ }^\circ\text{C}$. Давление газа по манометру равно 0,04 МПа. Барометрическое давление $B = 103990\text{ Па}$.

2.6. В цилиндре с подвижным поршнем находится 0,8 м³ воздуха при давлении $p_1 = 0,5\text{ МПа}$. Как должен измениться объем, чтобы при повышении давления до 0,8 МПа температура воздуха не изменилась?

2.7. Дымовые газы, образовавшиеся в топке парового котла, охлаждаются с 1200 до 250 °C. Во сколько раз уменьшается их объем, если давление газов в начале и конце газопроводов одинаково?

2.8. Определить плотность окиси углерода CO при $p = 10^5\text{ Па}$ и температуре 15 °C.

2.9. Определить плотность и удельный объем двуокиси углерода CO₂ при нормальных условиях.

2.10. Плотность воздуха при нормальных условиях равна 1,293 кг/м³. Чему равна плотность воздуха при давлении $5 \cdot 10^5\text{ Па}$ и температуре 20 °C?

2.11. В цилиндре с подвижным поршнем находится 0,8 м³ воздуха при давлении $5 \cdot 10^5\text{ Па}$. Как должен измениться объем, чтобы при повышении давления до $8 \cdot 10^5\text{ Па}$ температура воздуха не изменилась?

2.12. Во сколько раз объем определенной массы при $-10\text{ }^\circ\text{C}$ меньше, чем при $t = +40\text{ }^\circ\text{C}$? Давление в обоих случаях одинаковое.

2.13. В сосуде объемом 0,5 м³ находится воздух при давлении 0,2 МПа и температуре 20 °C. Сколько воздуха надо выкачать из сосуда, чтобы разрежение в нем составило 420 мм рт. ст. при усло-

вии, что температура в сосуде не изменится? Атмосферное давление по ртутному барометру равно 768 мм при температуре ртути в нем 18 °С; разрежение в сосуде измерено ртутным вакуумметром при температуре ртути 20 °С.

2.14. Воздух, заключенный в баллон емкостью 0,9 м³ выпускают в атмосферу. Начальная температура воздуха 27 °С. Определить массу выпущенного воздуха, если начальное давление в баллоне составляло $93,2 \cdot 10^5$ Па, после выпуска – $42,2 \cdot 10^5$ Па, а температура воздуха снизилась до 17 °С.

2.15. В газгольдер объемом $V = 200$ м³ подается газ по трубопроводу диаметром $d = 0,1$ м со скоростью 3 м/с. Удельный объем газа $v = 0,4$ м³ /кг. За какое время наполнится газгольдер, если плотность газа, заполнившего газгольдер, равна 1,3 кг/м³.

2.16. Определить массу углекислого газа в сосуде с объемом $V = 4$ м³ при $t = 80$ °С. Давление газа по манометру равно 0,04 МПа. Барометрическое давление равно 103990 Па.

2.17. В цилиндре с подвижным поршнем находится 0,8 м³ воздуха при давлении $p_1 = 0,5$ МПа. Как должен измениться объем, чтобы при повышении давления до 0,8 МПа температура воздуха не изменилась?

2.18. В цилиндрическом сосуде, имеющем внутренний диаметр 0,6 м и высоту 2,4 м, находится воздух при $t = 18$ °С. Давление воздуха составляет 0,765 МПа. Барометрическое давление равно 101858 Па. Определить массу воздуха в сосуде.

2.19. Баллон с кислородом емкостью 20 л находится под давлением 10 МПа при $t = 15$ °С. После израсходования части кислорода, давление понизилось до 7,6 МПа, а температура упала до 10 °С. Определить массу израсходованного кислорода.

2.20. Резервуар объемом 4 м³ заполнен углекислым газом. Найти массу и вес газа в резервуаре, если избыточное давление газа $p = 40$ кПа, температура его 80 °С, а барометрическое давление воздуха 102,4 кПа.

2.21. Баллон емкостью 0,9 м³ заполнен воздухом при температуре 17 °С, присоединенный к нему вакуумметр показывает разрежение 80 кПа. Определить массу воздуха в баллоне, если показание барометра равно 98,7 кПа.

2.22. Масса пустого баллона для кислорода емкостью 50 л равна 80 кг. Определить массу баллона после заполнения его кислородом при $t = 20\text{ }^\circ\text{C}$ до давления 10 МПа.

2.23. Газовая постоянная этана C_2H_6 равна 277,6 Дж/(кг·град.). Определить молекулярный вес газа; его плотность; удельный объем при нормальных условиях.

2.24. Определить плотность, удельный объем углекислоты CO_2 при давлении 9,81 бар и температуре $27\text{ }^\circ\text{C}$, если газовая постоянная ее равна 189 Дж/(кг·град.).

2.25. В баллоне емкостью 40 л находится кислород при давлении 112 ат по манометру; температура его $37\text{ }^\circ\text{C}$; атмосферное давление равно 736 мм рт. ст. Определить массу кислорода; его плотность.

3 ГАЗОВЫЕ СМЕСИ

Состав газовой смеси определяется количеством каждого из газов, входящих в смесь, и может быть задан массовыми или объемными долями.

Массовый состав смеси:

а) в абсолютных единицах массы

$$m = m_1 + m_2 + \dots + m_n, \text{ кг} \quad (3.1)$$

где m_1, m_2 и т.д. – массы отдельных компонентов смеси в кг;

б) в относительных массовых долях

$$\frac{m_1}{m} + \frac{m_2}{m} + \dots + \frac{m_n}{m} = g_1 + g_2 + \dots + g_n = 1; \quad (3.2)$$

$$\sum_{i=1}^n g_i = 1.$$

Объемный состав газовой смеси

а) в абсолютных единицах объема

$$V = V_1 + V_2 + \dots + V_n, \text{ м}^3 \quad (3.3)$$

где V_1, V_2 и т.д. – приведенные объемы отдельных компонентов смеси в м^3 ;

б) в относительных объемных долях

$$\frac{V_1}{V} + \frac{V_2}{V} + \dots + \frac{V_n}{V} = r_1 + r_2 + \dots + r_n = 1;$$
$$\sum_{i=1}^n r_i = 1.$$
(3.4)

Смесь может быть задана числом молей, как сумма числа молей отдельных компонентов. Мольная доля отдельного компонента равна объемной доле.

Молекулярная масса смеси может быть найдена по формуле:

$$M_{\text{см}} = \sum_{i=1}^n r_i M_i,$$
(3.5)

где M_i – молекулярные массы отдельных компонентов смеси.

Газовая постоянная смеси газов может быть найдена по формуле:

$$R_{\text{см}} = \sum_{i=1}^n g_i R_i, \text{ или}$$
(3.6)

$$R_{\text{см}} = \frac{8314}{M_{\text{см}}} = \frac{8314}{\sum_{i=1}^n r_i M_i},$$
(3.7)

где R_i – газовые постоянные отдельных компонентов смеси, M_i – молекулярные массы отдельных компонентов смеси.

Связь между давлением газовой смеси и парциальными давлениями отдельных компонентов, входящих в смесь, устанавливается законом Дальтона:

$$p = p_1 + p_2 + \dots + p_n,$$
$$p_i = r_i \cdot p$$
(3.8)

где p – общее давление смеси, p_1, p_2 и т.д. - парциальные давления отдельных компонентов, входящих в смесь.

Соотношение между массовыми и объемными долями

$$g_i = r_i \frac{M_i}{\sum_{i=1}^n r_i M_i}; \quad r_i = g_i \frac{R_i}{R_{\text{см}}} \quad (3.9)$$

Примеры решения задач

Пример 3.1. Смесь газов состоит из водорода и окиси углерода. Массовая доля водорода $g_{\text{H}_2} = 0,67\%$.

Найти газовую постоянную смеси и ее удельный объем при нормальных условиях.

Решение. Из уравнения (3.6)

$$R_{\text{см}} = \sum_{i=1}^n g_i R_i = g_1 R_1 + g_2 R_2 = 0,067 \cdot 4124 + 0,933 \cdot 296,8 = 552 \text{ Дж/кг} \cdot \text{К}$$

Удельный объем газовой смеси получи из уравнения

$$v_0 = \frac{RT_0}{p_0} = \frac{552 \cdot 273}{101325} = 1,49 \text{ м}^3/\text{кг}.$$

Пример 3.2. Найти кажущийся молекулярный вес, газовую постоянную, весовой состав и плотность при нормальных условиях светильного газа, имеющего, следующий объемный состав: $r_{\text{CO}}=0,11$; $r_{\text{CO}_2}=0,02$; $r_{\text{H}_2}=0,50$, $r_{\text{N}_2}=0,03$, $r_{\text{CH}_4}=0,34$.

Решение. Для нахождения газовой постоянной смеси воспользуемся уравнением (3.7)

$$R_{\text{см}} = \frac{R_m}{M_{\text{см}}} = \frac{8314}{M_{\text{см}}}.$$

Найдем молекулярные веса газов, составляющих данную смесь:

$M_{\text{CO}}=12+16=28$; $M_{\text{CO}_2}=12+(16 \cdot 2)=44$; $M_{\text{H}_2}=2$; $M_{\text{N}_2}=14 \cdot 2=28$ и $M_{\text{CH}_4}=12+4=16$.

Затем по уравнению (3.5) найдем кажущийся молекулярный вес:

$$M_{\text{см}} = M_{\text{CO}}r_{\text{CO}} + M_{\text{CO}_2}r_{\text{CO}_2} + M_{\text{H}_2}r_{\text{H}_2} + M_{\text{CH}_4}r_{\text{CH}_4} = 28 \cdot 0,11 + 44 \cdot 0,02 + 2 \cdot 0,50 + 28 \cdot 0,03 + 16 \cdot 0,34 = 11,24$$

Теперь мы можем найти газовую постоянную смеси:

$$R_{\text{см}} = \frac{R_m}{M_{\text{см}}} = \frac{8314}{11,24} = 740 \text{ Дж/(кг}\cdot\text{К)}$$

Подсчитаем весовой состав данного светильного газа:

$$g_{\text{CO}} = r_{\text{CO}} \frac{M_{\text{CO}}}{M_{\text{см}}} = 0,11 \frac{28}{11,24} = 0,275$$

$$g_{\text{CO}_2} = r_{\text{CO}_2} \frac{M_{\text{CO}_2}}{M_{\text{см}}} = 0,02 \frac{44}{11,24} = 0,077$$

$$g_{\text{H}_2} = r_{\text{H}_2} \frac{M_{\text{H}_2}}{M_{\text{см}}} = 0,5 \frac{2}{11,24} = 0,087$$

$$g_{\text{N}_2} = r_{\text{N}_2} \frac{M_{\text{N}_2}}{M_{\text{см}}} = 0,03 \frac{28}{11,24} = 0,073$$

$$g_{\text{CH}_4} = r_{\text{CH}_4} \frac{M_{\text{CH}_4}}{M_{\text{см}}} = 0,34 \frac{16}{11,24} = 0,488$$

Так как кажущийся молекулярный вес смеси известен, то плотность ее $\rho_{\text{см}}$ найдем, зная, что при нормальных условиях объем одного киломоля $V_m = 24,4 \text{ м}^3$.

$$\text{Имеем } \rho_{\text{см}} = \frac{M_{\text{см}}}{V_m} = \frac{11,24}{24,4} = 0,461 \text{ кг/м}^3.$$

Задачи

3.1. Определить газовую постоянную смеси газов, состоящую из 1 м^3 генераторного газа и $1,5 \text{ м}^3$ воздуха, взятых при нормальных условиях, и найти парциальные давления составляющих смеси. Плотность генераторного газа ρ принять равной $1,2 \text{ кг/м}^3$.

3.2. Объемный состав сухих продуктов сгорания топлива (не содержащих водяных паров) следующий: $\text{CO}_2 = 12,3\%$; $\text{O}_2 = 7,2\%$; $\text{N}_2 = 80,5\%$. Найти кажущуюся молекулярную массу и газовую постоянную, а также плотность и удельный объем продуктов сгорания при $B = 100 \text{ кПа}$ и $t = 800 \text{ }^\circ\text{C}$.

3.3. Дымовой газ имеет следующий объемный состав: $r_{\text{CO}_2}=12\%$; $r_{\text{O}_2}=6\%$ и $r_{\text{N}_2}=82\%$. Найти весовые доли и плотность дымового газа при $p = 1$ ата и $t = 15$ °С.

3.4. Продукты сгорания имеют следующий состав по объему: $r_{\text{CO}_2}=10\%$; $r_{\text{O}_2}=7\%$ и $r_{\text{N}_2}=83\%$. Найти состав этих продуктов сгорания по весу, парциальные давления газов, составляющих смесь, и массу 100 м^3 газа при $t = 450$ °С и $p = 1,1$ ата.

3.5. Коксовый генераторный газ по объему состоит из 0,070 части H_2 ; 0,020 части CH_4 ; 0,276 части CO ; 0,048 части CO_2 и 0,586 части N_2 . Найти его весовой состав, плотность при нормальных условиях и газовую постоянную.

3.6. Сухой воздух состоит по весу из 23,2 части кислорода и 76,8 части азота. Найти объемный состав воздуха, его газовую постоянную, кажущийся молекулярный вес и парциальное давление кислорода и азота, если давление воздуха по барометру равно 760 мм рт. ст.

3.7. Получаемый в газогенераторах светильный газ имеет следующий объемный состав: 48% H_2 , 35% CH_4 , 12% CO и 5% N_2 . Определить, в каком соотношении находятся плотности воздуха и светильного газа при одинаковых физических условиях.

3.8. Коксовый газ, имеющий состав в объемных долях: 57% H_2 , 23% CH_4 , 6% CO , 2% CO_2 и 12% N_2 , находится в шарообразном газгольдере диаметром 5 м. Определить массу газа при избыточном давлении 0,1 МПа. Параметры окружающей среды: давление 750 мм рт.ст., температура 20 °С.

3.9. В 1 м^3 сухого воздуха содержится примерно $0,21 \text{ м}^3$ кислорода и $0,79 \text{ м}^3$ азота. Определить массовый состав.

3.10. Смесь газов состоит из водорода и окиси углерода. Массовая доля водорода $m_{\text{H}_2} = 6,67\%$. Определить газовую постоянную смеси и ее удельный объем при нормальных условиях.

3.11. Определить газовую постоянную смеси газов, состоящую из 1 м^3 генераторного газа и $1,5 \text{ м}^3$ воздуха, взятых при нормальных условиях, и найти парциальные давления составляющих смеси. Плотность генераторного газа принять равной $1,2 \text{ кг/м}^3$.

3.12. Объемный состав сухих продуктов сгорания топлива (не содержащих водяных паров) следующий: $\text{CO}_2 = 12,3 \%$; $\text{O}_2 =$

7,2 %; $N_2 = 80,5$ %. Найти кажущуюся молекулярную массу и газовую постоянную, а также плотность и удельный объем продуктов сгорания при $B = 750$ мм рт. ст. и $t = 800$ °С.

3.13. Генераторный газ имеет следующий объемный состав: $H_2 = 7,0$ %; $CH_4 = 2,0$ %; $CO = 27,6$ %; $CO_2 = 4,8$ %; $N_2 = 58,6$ %. Определить массовые доли, кажущуюся молекулярную массу, газовую постоянную, плотность и парциальные давления при температуре 15 °С и $p = 10^5$ Па.

3.14. Определить газовую постоянную, плотность при нормальных условиях и объемный состав смеси, если ее массовый состав следующий: $H_2 = 8,4$ %; $CH_4 = 48,7$ %; $C_2H_4 = 6,9$ %; $CO = 17$ %, $CO_2 = 7,6$ %; $O_2 = 7$ %; $N_2 = 6,7$ %.

4 ЗАКОНЫ ТЕРМОДИНАМИКИ. ТЕПЛОЕМКОСТЬ

4.1 Уравнения первого и второго начал термодинамики

Энергетический баланс термодинамической системы описывается уравнением первого начала термодинамики.

$$q = \Delta u + A, \text{ Дж/кг} \quad (4.1)$$

где u – внутренняя энергия, Дж/кг; A – механическая работа, Дж/кг.

Энергия тела состоит из внутренней энергии u и потенциальной энергии давления $p \cdot v$. Сумма этих двух величин составляет новую физическую величину, называемую энтальпией:

$$i = u + p \cdot v, \text{ Дж/кг} \quad (4.2)$$

где u - внутренняя энергия, Дж/кг; p - давление, Па; v - удельный объем, м³/кг.

Направление самопроизвольных тепловых процессов в природе и условия превращения тепла в работу устанавливает второй закон термодинамики:

$$ds = dq/T, \text{ Дж/кг} \cdot \text{К} \quad (4.3)$$

где s - удельная энтропия, Дж/(кг·К); dq - элементарное количество теплоты, Дж/кг; T - температура, К.

Зависимость между изменением удельной энтропии и удельным количеством теплоты устанавливает следующее уравнение:

$$dq = Tds, \text{ Дж/кг} \quad (4.4)$$

Количество подведенной (отведенной) удельной теплоты в равновесных процессах равно произведению термодинамической температуры на изменение удельной энтропии.

Основное уравнение первого начала термодинамики для равновесных процессов:

$$Tds = \Delta u + p dv, \text{ Дж/кг} \quad (4.5)$$

4.2 Теплоемкость

Теплоемкость – это количество тепла, которое необходимо сообщить системе, чтобы нагреть ее на 1К или на 1 °С.

Теплоемкость единицы массы вещества называется *удельной теплоемкостью*.

$$c = \frac{dq}{dT}, \text{ Дж}/(\text{кг}\cdot\text{К}) \quad (4.6)$$

где q – количество теплоты, Дж/кг; T – температура, К

Объемная теплоемкость представляет собой отношение теплоемкости рабочего тела к объему рабочего тела при нормальных физических условиях, Дж/(м³·К).

Молярной теплоемкостью называют отношение теплоемкости к количеству вещества, Дж/(моль·К).

Удельная, объемная и молярная теплоемкости связаны между собой зависимостями:

$$c = \frac{c_\mu}{M}; \quad c' = \frac{c_\mu}{V_m}; \quad c' = c \cdot \rho_0, \quad (4.7)$$

где c – удельная теплоемкость, Дж/(кг·К), c_μ – молярная теплоемкость, Дж/(моль·К), c' – объемная теплоемкость, Дж/(м³·К), M – молекулярная масса, кг/моль, V_m – объем одного моля газа при нормальных условиях, м³/моль.

В теплотехнических расчетах широко применяют *изохорную* теплоемкость – теплоемкость при постоянном объеме и *изобарную* теплоемкость – теплоемкость в процессе при постоянном давлении.

Удельная изохорная теплоемкость равна:

$$c_v = \frac{du}{dT}, \text{ Дж}/(\text{кг}\cdot\text{К}) \quad (4.8)$$

$$dq_v = du = c_v dT, \text{ Дж}/\text{кг} \quad (4.9)$$

Удельная изобарная теплоемкость равна:

$$c_p = \frac{di}{dT}, \text{ Дж}/(\text{кг} \cdot \text{К}) \quad (4.10)$$

$$dq_p = di = c_p dT, \text{ Дж}/\text{кг} \quad (4.11)$$

Формула Майера связывает изобарную, изохорную теплоемкости с удельной газовой постоянной:

$$c_p - c_v = R \quad (4.12)$$

Средняя теплоемкость:

$$\bar{c} = q_{1,2} / (t_2 - t_1) = \int_{t_1}^{t_2} c dt / (t_2 - t_1) \quad (4.13)$$

Если теплоемкость задана формулой $c = a + b \cdot t$, то тогда:

$$\bar{c} = a + \frac{b}{2} (t_1 + t_2) \quad (4.14)$$

Примеры решения задач

Пример 4.1. Найти весовую изобарную теплоемкость азота c_p , считая ее величиной постоянной.

Решение. Азот – двухатомный газ, следовательно для него

$$c_{\mu p} = 29,31 \text{ кДж}/(\text{кмоль} \cdot \text{К}), \text{ а } c_p = \frac{c_{\mu p}}{M} = \frac{29,31}{28} = 1,047 \text{ кДж}/(\text{кг} \cdot \text{К}).$$

Пример 4.2. Какое количество теплоты нужно затратить, чтобы 10 кг кислорода, заключенного в баллоне, нагреть от 0 °С до 100 °С. Теплоемкость считать постоянной и равной 0,654 кДж/(кг·К).

Решение. Воспользуемся уравнением (4.9), подставив в него значение теплоемкости, соответствующее условию задачи (нагревание в баллоне происходит при $V = \text{const}$):

$$Q = m c_v (t_2 - t_1)$$

Следовательно,

$$Q = 10 \cdot 0,654 \cdot (100 - 0) = 654 \text{ кДж}$$

Пример 4.3. 5 м³ окиси углерода СО при постоянном давлении 10 ата и температуре 10 °С подогреваются до 110 °С. Найти количество подведенной при этом теплоты, считая теплоемкость постоянной.

Решение. Для нахождения искомого количества теплоты Q воспользуемся уравнением:

$$Q = V_n c_p (t_2 - t_1)$$

Предварительно найдем c_p и V_n .

Так как СО – двухатомный газ, то при нормальных условиях объемная изобарная теплоемкость его равна

$$c_p = \frac{c_{\mu p}}{22,4} = \frac{29,31}{22,4} = 1,31 \frac{\text{кДж}}{\text{м}^3 \cdot \text{К}}$$

Приведем к этим же условиям и объем газа, пользуясь уравнением

$$V_n = V_1 \frac{p_1 T_n}{p_n T_1} = 5 \frac{10 \cdot 10^4 \cdot 9,81 \cdot 273}{1,013 \cdot 10^5 \cdot (273 + 10)} = 46,7 \text{ м}^3.$$

Теперь воспользуемся уравнением

$$Q = V_n c_p (t_2 - t_1) = 46,7 \cdot 1,31 \cdot (110 - 10) = 6117,7 \text{ кДж}.$$

Этот пример можно решить и другим способом, пользуясь уравнением

$$Q = m c_v (t_2 - t_1)$$

Найдем предварительно массу газа по уравнению состояния при заданных начальных параметрах газа.

$$\text{Имеем } p_1 V_1 = m R T_1$$

Здесь

$$T_1 = 273 + 10 = 283 \text{ К}.$$

Для СО газовая постоянная

$$R = \frac{8314}{12 + 16} = 297 \frac{\text{Дж}}{\text{кг} \cdot \text{К}}.$$

Следовательно,

$$m = \frac{p_1 V_1}{RT_1} = \frac{10 \cdot 10^4 \cdot 9,81 \cdot 5}{297 \cdot 283} = 58,4 \text{ кг}.$$

Найдем весовую теплоемкость c_p

$$c_p = \frac{c_{\mu p}}{M} = \frac{29,31}{28} = 1,047 \frac{\text{кДж}}{\text{кг} \cdot \text{К}}.$$

Теперь можно найти количество подведенной теплоты

$$Q = m c_p (t_2 - t_1) = 58,4 \cdot 1,047 \cdot (110 - 10) = 6114,5 \text{ кДж}.$$

Пример 4.4. Какое количество теплоты нужно отнять от 15 м^3 воздуха, взятого при $t_1 = 800 \text{ }^\circ\text{C}$ и $p_1 = 5 \text{ ата}$, чтобы при постоянном объеме температура его понизилась до $t_2 = 400 \text{ }^\circ\text{C}$.

Решение. Воспользуемся уравнением:

$$Q = V_n c_v (t_2 - t_1)$$

Найдем V_n :

$$V_n = \frac{T_n}{p_n} \frac{p}{T} V = \frac{273}{10332} \frac{5 \cdot 10^4}{1073} \cdot 15 = 18,5 \text{ м}^3$$

Далее находим среднюю изохорную объемную теплоемкость в пределах указанных температур:

$$c_v = \frac{c_{\mu v}}{22,4}; \quad c_v = \frac{5,654}{22,4} = 0,252 \text{ ккал/м}^3 \cdot \text{град},$$

так как $c_{\mu v} = 5,654 \text{ ккал/моль} \cdot \text{град}$.

Таким образом,

$$Q = V_n c_v (t_2 - t_1) = 18,5 \cdot 0,252 (400 - 800) = -1864 \text{ ккал}$$

Пример 4.5. 1 кг воздуха в процессе расширения с подводом 100 кДж тепла совершает работу, равную 70 кДж. Определить изменение температуры воздуха в процессе, пренебрегая зависимостью теплоемкости от температуры.

Решение. Согласно первому закону термодинамики тепло, подводимое к телу, расходуется на совершение работы и изменение внутренней энергии тела.

Так как: $q = \Delta u + l$, где $\Delta u = c_v dT$;

$$c_v = \frac{c_{\mu v}}{M} = \frac{20,93}{28,96} = 0,722 \frac{\text{кДж}}{\text{кг} \cdot \text{К}}$$

$$\Delta t = \frac{q - A}{c_v} = \frac{100 - 70}{0,722} = 41,5 \text{ } ^\circ\text{C}$$

Задачи

4.1. Смесь азота и водорода в массовом отношении 4:1 греется при $p = \text{const}$ от $200 \text{ } ^\circ\text{C}$ до $1200 \text{ } ^\circ\text{C}$. Найти среднюю теплоемкость в пределах этих температур и расход теплоты для нагревания 100 кг смеси. Найти весовые изобарную и изохорную теплоемкости c_p и c_v для окиси углерода.

4.2. Найти объемную изохорную теплоемкость c_v для углекислого газа.

4.3. Какое количество теплоты нужно затратить, чтобы температуру $3,5 \text{ кг}$ азота, заключенного в баллоне, повысить на $10 \text{ } ^\circ\text{C}$.

4.4. В помещении размером $6 \times 5 \times 3 \text{ м}^3$ воздух имеет температуру $t_1 = 27 \text{ } ^\circ\text{C}$ при давлении $p = 1 \text{ ата}$. Найти, какое количество теплоты нужно отнять от этого воздуха, чтобы понизить его температуру до $t_2 = 17 \text{ } ^\circ\text{C}$ при том же давлении; $c_p = 1,005 \text{ кДж}/(\text{кг} \cdot \text{К})$. Количество воздуха при подсчетах условно принять постоянным.

4.5. Найти значения средних весовых и средних объемных изобарных теплоемкостей для кислорода и углекислого газа в пределах температур от 0 до $800 \text{ } ^\circ\text{C}$.

4.6. Найти значения средней весовой изохорной теплоемкости для азота в пределах температур от 0 до $400 \text{ } ^\circ\text{C}$.

4.7. Какое количество теплоты нужно подвести к 10 кг азота при постоянном объеме, чтобы поднять его температуру от 200 до $800 \text{ } ^\circ\text{C}$.

4.8. Какое количество теплоты нужно затратить, чтобы при постоянном давлении 5 ата нагреть 10 м^3 кислорода от 100 до $1000 \text{ } ^\circ\text{C}$.

5 ОСНОВНЫЕ ГАЗОВЫЕ ПРОЦЕССЫ

5.1 Изобарный процесс

Уравнение изобары $p = const$. Изменение параметров v и T в изобарном процессе подчинено закону Гей-Люссака:

$$\frac{v_2}{v_1} = \frac{T_2}{T_1} \quad (5.1)$$

где v – удельный объем, кг/м³;

Приращение энтропии для данного процесса:

$$ds = c_p \frac{dT}{T} \quad (5.2)$$

$$\Delta s = c_p \ln \frac{T_2}{T_1} \quad (5.3)$$

Удельную работу (работу 1 кг газа) определяют по формуле:

$$A = p(v_2 - v_1) \quad (5.4)$$

$$A = R(T_2 - T_1) \quad (5.5)$$

Удельное количество теплоты в изобарном процессе:

$$q_p = \bar{c}_p(T_2 - T_1) \quad (5.6)$$

5.2 Изохорный процесс

Уравнение изохоры $v = const$. Параметры p и T изменяются по закону Шарля.

$$\frac{p_2}{p_1} = \frac{T_2}{T_1} \quad (5.7)$$

Приращение энтропии для данного процесса:

$$\Delta s = c_v \ln \frac{T_2}{T_1} \quad (5.8)$$

Удельная работа в изохорном процессе равна нулю.

Вся удельная теплота, подводимая в изохорном процессе, затрачивается на изменение удельной внутренней энергии:

$$q = u_2 - u_1 \quad (5.9)$$

$$q = c_v(T_2 - T_1) \quad (5.10)$$

5.3 Изотермический процесс

Уравнение процесса в координатах p - v находим из уравнения Клапейрона $p \cdot v = R \cdot T$, поскольку $R \cdot T$ – величина постоянная, имеем:

$$pv = const \quad (5.11)$$

Изменение параметров p и v в изотермическом процессе подчиняется закону Бойля-Мариотта:

$$v_2/v_1 = p_2/p_1 \quad (5.12)$$

Приращение энтропии в изотермическом процессе:

$$s_2 - s_1 = R \ln(v_2/v_1) \quad (5.13)$$

Удельную работу определяем по следующим формулам:

$$A_{1,2} = RT \ln \frac{v_2}{v_1} = RT \ln \frac{p_1}{p_2}; \quad A_{1,2} = p_1 v_1 \ln \frac{v_2}{v_1} = p_1 v_1 \ln \frac{p_1}{p_2} \quad (5.14)$$

В изотермическом процессе вся подведенная теплота преобразуется в работу расширения, а в случае сжатия идеального газа вся затраченная работа преобразуется в теплоту, отводимую от него.

5.4 Адиабатный процесс

Для адиабатного процесса $dq = 0$, тогда из уравнения первого начала термодинамики:

$$dA = - du \quad (5.15)$$

$$c_v dT + p dv = 0 \quad (5.16)$$

Разность $(u_1 - u_2)$ для любого процесса, совершаемого идеальным газом, равна $c_v \cdot (T_1 - T_2)$.

Соотношение удельных теплоемкостей называется показателем адиабаты k :

$$\frac{c_p}{c_v} = k \quad (5.17)$$

Уравнения адиабаты имеют вид:

$$p_1 v_1^k = p_2 v_2^k; \quad \frac{T_1}{T_2} = \left(\frac{p_1}{p_2} \right)^{\frac{k-1}{k}}; \quad \frac{T_2}{T_1} = \left(\frac{v_1}{v_2} \right)^{k-1} \quad (5.18)$$

Работу можно найти по формулам:

$$A_{1,2} = \frac{R}{k-1} (T_1 - T_2) = \frac{1}{k-1} (p_1 v_1 - p_2 v_2) \quad (5.19)$$

Для одноатомных газов показатель адиабаты k равен 1,67; для двухатомных – 1,40; для многоатомных – 1,33.

5.5 Политропный процесс

Общий случай газового процесса – политропный. Политропным называется процесс изменения состояния идеального газа, характеризующийся постоянной теплоемкостью c , называемой политропной теплоемкостью.

Уравнение политропы описывает собой любой газовый процесс. Все зависит от показателя политропы n . Политропный процесс описывается следующим уравнением:

$$p \cdot v^n = \text{const} \quad (5.20)$$

Показатель политропы:

$$n = \frac{c - c_p}{c - c_v} \quad (5.21)$$

При $n = k$ имеем $p \cdot v^k$, т.е. адиабату; при $n = 1$ - изотерму; при $n = 0$ $p = const$, т.е. изобару.

Соотношения между параметрами в политропном процессе таковы:

$$p_1 v_1^k = p_2 v_2^k; \quad \frac{T_1}{T_2} = \left(\frac{p_1}{p_2} \right)^{\frac{k-1}{k}}; \quad \frac{T_2}{T_1} = \left(\frac{v_1}{v_2} \right)^{k-1} \quad (5.22)$$

Работу в политропном процессе можно определить по следующим формулам:

$$A_{1,2} = \frac{R}{n-1} (T_1 - T_2) = \frac{1}{n-1} (p_1 v_1 - p_2 v_2) \quad (5.23)$$

Примеры решения задач

Пример 5.1. В резервуаре емкостью 1 м^3 находится воздух при давлении 5 бар и температуре $20 \text{ }^\circ\text{C}$. Как изменятся температура и давление воздуха, если к нему подвести 175 кДж теплоты?

Решение. Масса воздуха:

$$m = \frac{pV}{RT} = \frac{5 \cdot 10^5 \cdot 1}{287 \cdot 293} = 5,94 \text{ кг}$$

Если не учитывать зависимость теплоемкости c_v от температуры, то:

$$c_v = 20,93/28,96 = 0,722 \text{ кДж / (кг} \cdot \text{град)}$$

Повышение температуры в изохорном процессе:

$$\Delta t = \frac{Q}{m \cdot c_v} = \frac{175}{5,94 \cdot 0,722} = 40,7 \text{ }^\circ\text{C}$$

$$\text{Откуда: } t_2 = t_1 + \Delta t = 20 + 40,7 = 60,7 \text{ }^\circ\text{C} = 333,7 \text{ К}$$

Давление воздуха в конце процесса изохорного нагревания:

$$p_2 = p_1 \frac{T_2}{T_1} = \frac{5 \cdot 333,7}{287 \cdot 293} = 5,69 \text{ бар}$$

Пример 5.2. 1 кг воздуха сжимается изотермически при начальной температуре $t_1 = 30 \text{ }^\circ\text{C}$ и давлении $p_1 = 0,1 \text{ МПа}$ до конечного

давления $p_2 = 1 \text{ МПа}$. Определить конечный объём, затрачиваемую работу и количество теплоты, отводимой от газа.

Решение. Начальный объём воздуха из уравнения состояния:

$$v_1 = \frac{RT_1}{p_1} = \frac{287 \cdot 303}{0,1 \cdot 10^6} = 0,87 \text{ м}^3/\text{кг}$$

Для изотермического процесса:

$$v_2 = \frac{p_1 v_1}{p_2} = 0,87 \cdot \frac{1}{10} = 0,087 \text{ м}^3/\text{кг}$$

Работа, затрачиваемая на сжатие 1 кг воздуха:

$$A = RT \ln \frac{p_1}{p_2} = 2,303 RT \cdot \lg \left(\frac{p_1}{p_2} \right) = -2,303 \cdot 303 \cdot \lg 10 = -200 \text{ кДж/кг}$$

Количество теплоты, отводимой от газа, равно, работе, затрачиваемой на сжатие, следовательно: $q = -200 \text{ кДж/кг}$.

Пример 5.3. Сосуд ёмкостью 90 л содержит воздух при давлении $8 \cdot 10^5 \text{ Па}$ и температуре $30 \text{ }^\circ\text{C}$. Определить количество тепла при $v = \text{const}$, которое необходимо сообщить воздуху, чтобы повысить его давление до $16 \cdot 10^5 \text{ Па}$. Принять зависимость $c = f(t)$ нелинейной. Ответ дать в ккал.

Решение. Из соотношения параметров изохорного процесса

$$\frac{p_2}{p_1} = \frac{T_2}{T_1} \text{ получаем:}$$

$$T_2 = \frac{T_1 \cdot p_2}{p_1} = \frac{303 \cdot 16 \cdot 10^5}{8 \cdot 10^5} = 606 \text{ К};$$

$$t_2 = 606 - 273 = 333 \text{ }^\circ\text{C}.$$

По уравнению

$$q_v = c_{vm2} \cdot t_2 - c_{vm1} \cdot t_1,$$

Используя справочные данные, находим

$$c_{vm1} = 0,7173 \text{ кДж/(кг} \cdot \text{град)}; c_{vm2} = 0,7351 \text{ кДж/(кг} \cdot \text{град)}.$$

Следовательно,

$$q_v = 0,7351 \cdot 333 - 0,7173 \cdot 30 = 223,2 \text{ кДж/кг}.$$

Массу воздуха, находящегося в резервуаре, определяют по уравнению:

$$M = \frac{p_1 \cdot V_1}{R \cdot T_1} = \frac{8 \cdot 10^5 \cdot 0.09}{287 \cdot 303} = 0,8278 \text{ кг},$$

а сообщенное ему количество тепла по формуле:

$$Q_v = 0,8278 \cdot 223,2 = 184,8 \text{ кДж} = 44,2 \text{ ккал}.$$

Пример 5.4. В резервуаре объемом $V = 0,5 \text{ м}^3$ находится углекислый газ при давлении $p_1 = 6 \cdot 10^5 \text{ Па}$ и температуре $t_1 = 527^\circ\text{C}$. Как изменится температура газа, если отнять от него при постоянном объеме 436 кДж тепла? Зависимость теплоемкости от температуры считать линейной.

Решение. Так как конечное давление газа неизвестно, то для нахождения конечной температуры соотношение параметров в изохорном процессе не используют. Применим выражение, определяющее количество отведенного тепла в изохорном процессе, согласно формуле

$$Q_v = M \cdot c_{vm} \cdot (t_2 - t_1).$$

В этом уравнении $Q_v = -436 \text{ кДж}$, а масса газа:

$$M = \frac{p \cdot V}{R \cdot T} = \frac{6 \cdot 10^5 \cdot 0,5}{189 \cdot 800} = 1,89 \text{ кг}.$$

Средняя теплоемкость углекислого газа c_{vm} в пределах от 527 до t_2 °C составляет:

$$c_{vm} = 0,6837 + 0,00024053 (527 + t_2).$$

Подставляя соответствующие значения величин в уравнение для Q_v , получаем

$$Q_v = -436 = 1,98 \cdot [0,6837 + 0,00024053 (527 + t_2)] \cdot (t_2 - 527)$$

Решая данное квадратное уравнение относительно t_2 , получаем его значение, равное 276 °C.

Пример 5.5. Какое количество тепла необходимо затратить, чтобы нагреть 2 м³ воздуха при постоянном избыточном давлении $p = 2 \cdot 10^5 \text{ Па}$ от $t_1 = 100^\circ\text{C}$ до $t_2 = 500^\circ\text{C}$? Какую работу при этом совершит воздух? Давление атмосферы равно 760 мм рт. ст.

Решение. Имеем

$$q_p = c_{pm2} \cdot t_2 - c_{pm1} \cdot t_1.$$

Пользуясь справочными данными, запишем:

$$c_{pm} = 1,038 \cdot 500 - 1,0061 \cdot 100 = 418,7 \text{ кДж/кг}$$

Массу воздуха вычисляем из характеристического уравнения:

$$p \cdot V = M \cdot R \cdot T,$$

откуда

$$M = \frac{p \cdot V}{R \cdot T} = \frac{(2 + 1,013) \cdot 10^5 \cdot 2}{287 \cdot 373} = 5,63 \text{ кг}.$$

Таким образом

$$Q_p = M \cdot q_p = 5,63 \cdot 418,7 = 2357 \text{ кДж}.$$

Найденное количество тепла можно определить по формуле:

$$q_p = c'_{pm2} \cdot t_2 - c'_{pm1} \cdot t_1.$$

$$c'_{pm1} = (c'_{pm1})_0^{100} = 1,3004 \text{ кДж/(м}^3 \cdot \text{град)}$$

$$c'_{pm2} = (c'_{pm2})_0^{500} = 1,3427 \text{ кДж/(м}^3 \cdot \text{град)}$$

Следовательно

$$q_p = 1,3427 \cdot 500 - 1,3004 \cdot 100 = 541,4 \text{ кДж/м}^3.$$

Объем воздуха должен быть приведен к нормальным условиям.

Согласно уравнению состояния идеального газа

$$\frac{p_n \cdot V_n}{T_n} = \frac{p \cdot V}{T},$$

отсюда

$$V_n = \frac{p \cdot V \cdot T_n}{T \cdot p_n} = \frac{3,013 \cdot 2 \cdot 272}{373 \cdot 1,01} = 4,35 \text{ м}^3.$$

Таким образом,

$$Q_p = q_v \cdot V_n = 541,4 \cdot 4 \cdot 4,35 = 2356 \text{ кДж}.$$

Работа составит

$$A = M \cdot R \cdot (t_2 - t_1) = 5,63 \cdot 287 \cdot 400 = 646,3 \text{ кДж}.$$

Задачи

5.1. Газ при $p = 10^6$ Па и при температуре $t_1 = 20^\circ\text{C}$ нагревается при постоянном объеме до $t_2 = 300^\circ\text{C}$. Определить конечное давление газа.

5.2. В закрытом сосуде емкостью $0,3\text{ м}^3$ содержится $2,75\text{ кг}$ воздуха при давлении $p_1 = 8 \cdot 10^5$ Па и температуре $t_1 = 25^\circ\text{C}$. Определить давление и удельный объем после охлаждения воздуха до 0°C .

5.3. В закрытом сосуде заключен газ при давлении $p_1 = 28 \cdot 10^5$ Па и температуре $t_1 = 120^\circ\text{C}$. Чему будет равно конечное давление p_2 , если температура снизится до $t_2 = 25^\circ\text{C}$?

5.4. В закрытом сосуде находится газ при разрежении $p_1 = 20$ мм рт. ст. и температуре $t_1 = 10^\circ\text{C}$. Показание барометра 750 мм рт. ст. После охлаждения газа разрежение стало равным 150 мм рт. ст. Определить конечную температуру газа.

5.5. До какой температуры t_2 нужно нагреть газ при $v = \text{const}$, если начальное давление газа $p_1 = 2 \cdot 10^5$ Па и температуре $t_1 = 20^\circ\text{C}$, а конечное давление газа $p_2 = 5 \cdot 10^5$ Па?

5.6. В закрытом сосуде емкостью $V = 0,5\text{ м}^3$ находится двуокись углерода при $p_1 = 6 \cdot 10^5$ Па и температуре $t_1 = 527^\circ\text{C}$. Как изменится давление газа, если от температуры газа отнять 100 ккал? Принять зависимость $c = f(t)$ нелинейной.

5.7. До какой температуры нужно охладить $V = 0,8\text{ м}^3$ воздуха с начальным давлением $p_1 = 3 \cdot 10^5$ Па и температурой $t_1 = 15^\circ\text{C}$, чтобы давление при постоянном объеме понизилось до $p_2 = 10^5$ Па? Какое количество тепла нужно для этого отвести? Теплоемкость воздуха принять постоянной.

5.8. Сосуд объемом 60 л заполнен кислородом при давлении $p_1 = 1,25 \cdot 10^7$ Па. Определить конечное давление кислорода и количество сообщенного ему тепла (в кДж и ккал), если начальная тем-

пература кислорода $t_1 = 10^\circ\text{C}$, а конечная $t_2 = 30^\circ\text{C}$. Теплоемкость кислорода считать постоянной.

5.9. Определить количество тепла, необходимое для нагрева 2000 м^3 воздуха при постоянном давлении $p = 5 \cdot 10^5 \text{ Па}$ от $t_1 = 150^\circ\text{C}$ до $t_2 = 600^\circ\text{C}$. Зависимость теплоемкости от температуры считать нелинейной.

5.10. Какое количество тепла нужно затратить для нагрева $V, \text{ м}^3$ наружного воздуха при условии, что в установке воздушного отопления воздух при $t_1, ^\circ\text{C}$ нагревается в калорифере при $p = \text{const}$ до $t_2, ^\circ\text{C}$ согласно варианту:

Вариант	$t_1, ^\circ\text{C}$	$t_2, ^\circ\text{C}$	$V, \text{ м}^3$	$B,$ мм рт. ст.
1	-20	50	900	750
2	-18	53	920	753
3	-15	55	930	755
4	-12	57	950	757
5	-10	60	970	760
6	-8	62	980	762
7	-7	64	990	763
8	-5	65	1000	765
9	-3	67	1000	767
10	0	10	1050	770

Давление воздуха принять равным B , мм рт. ст. Теплоемкость воздуха считать постоянной.

5.11. В цилиндре находится воздух при давлении $p = 5 \cdot 10^5 \text{ Па}$ и температуре $t_1 = 400^\circ\text{C}$. От воздуха отводится тепло при постоянном давлении таким образом, что в конце процесса устанавливается $t_2 = 0^\circ\text{C}$. Объем цилиндра, в котором находится воздух, равен 400 л . Определить количество отведенного тепла, конечный объем, изменение внутренней энергии и совершенную работу сжатия. Зависимость теплоемкости от температуры считать нелинейной.

5.12. К 1 м^3 воздуха, находящегося в цилиндре со свободно движущимся нагруженным поршнем, подводится при постоянном давлении 335 кДж тепла. Объем воздуха при этом увеличивается до $1,5 \text{ м}^3$. Начальная температура воздуха равна 15°C . Определить ра-

боту расширения и температуру, которая установится в цилиндре. Зависимость теплоемкости от температуры считать линейной.

5.13. Воздух в количестве 800 м^3 при температуре $2000 \text{ }^\circ\text{C}$ охлаждается до $200 \text{ }^\circ\text{C}$ при постоянном давлении, равном $1,5 \text{ бар}$. Определить количество теплоты, выделенной при охлаждении.

5.14. Баллон емкостью 100 л заполнен окисью углерода под абсолютным давлением 50 ат и при температуре $-25 \text{ }^\circ\text{C}$, после внесения его в теплое помещение температура газа поднялась до $+20 \text{ }^\circ\text{C}$. Определить количество теплоты, приобретенное газом и давление в баллоне после нагревания.

5.15. Дымовые газы, образовавшиеся в топке парового котла, охлаждаются с 1200 до $250 \text{ }^\circ\text{C}$. Во сколько раз уменьшается их объем, если давление газов в начале и в конце газопроводов одинаково?

5.16. В закрытом сосуде емкостью $V = 0,3 \text{ м}^3$ содержится $2,75 \text{ кг}$ воздуха при давлении $p_1 = 0,8 \text{ МПа}$ и $t = 25 \text{ }^\circ\text{C}$. Определить давление и удельный объем после охлаждения воздуха до $0 \text{ }^\circ\text{C}$.

5.17. В закрытом сосуде находится газ при разрежении $p_1 = 2666 \text{ Па}$ и температуре $t_1 = 10 \text{ }^\circ\text{C}$. Показание барометра 100 кПа . После охлаждения газа разрежение стало равным 20 кПа . Определить конечную температуру газа t_2 .

5.18. В закрытом сосуде емкостью $V = 0,6 \text{ м}^3$ содержится воздух при давлении $p_1 = 0,5 \text{ МПа}$ и температуре $t_1 = 20 \text{ }^\circ\text{C}$. В результате охлаждения сосуда воздух, содержащийся в нем, теряет 105 кДж . Принимая теплоемкость воздуха постоянной, определить, какое давление и какая температура устанавливаются после этого в сосуде.

5.19. Сосуд объемом 60 л заполнен кислородом при давлении $p_1 = 12,5 \text{ МПа}$. Определить конечное давление кислорода и количество сообщенной ему теплоты, если начальная температура кислорода $t_1 = 10 \text{ }^\circ\text{C}$, а конечная $t_2 = 30 \text{ }^\circ\text{C}$. Теплоемкость кислорода считать постоянной.

5.20. $0,2 \text{ м}^3$ воздуха с начальной температурой $18 \text{ }^\circ\text{C}$ подогревают в цилиндре диаметром $0,5 \text{ м}$ при постоянном давлении $p = 0,2 \text{ МПа}$ до температуры $200 \text{ }^\circ\text{C}$. Определить работу расширения и перемещение поршня.

5.21. 2 м^3 воздуха с начальной температурой $t_1 = 15 \text{ }^\circ\text{C}$ расширяют при постоянном давлении до 3 м^3 вследствие сообщения газу

837 кДж теплоты. Определить конечную температуру, давления газа в процессе и работу расширения.

5.22. Определить какая часть теплоты, подводимой к газу в изобарном процессе, расходуется на работу и какая - на изменение внутренней энергии.

5.23. Для осуществления изотермического сжатия 0,8 кг воздуха при $p_1 = 0,1$ МПа и $t_1 = 25$ °С затрачена работа в 100 кДж. Найти давление p_2 сжатого воздуха и количество теплоты, которое необходимо при этом отвести от газа.

5.24. Воздуху в количестве $0,1\text{ м}^3$ при $p_1 = 1$ МПа и $t_1 = 200$ °С сообщается 125 кДж теплоты; температура его при этом не изменяется. Определить конечное давление p_2 , конечный объем V_2 и получаемую работу.

5.25. 1 кг воздуха с начальной температурой $t_1 = 30$ °С и давлением $p_1 = 0,1$ МПа сжимается адиабатно до конечного давления $p_2 = 1$ МПа. Определить конечный объем, конечную температуру и затрачиваемую работу.

5.26. 1 кг воздуха при температуре 0,1 МПа и начальном давлении $p_1 = 0,1$ МПа адиабатно сжимается до 0,8 МПа. Найти работу, конечный объем, конечную температуру.

5.27. Воздух при температуре $t_1 = 25$ °С адиабатно охлаждается до $t_2 = -55$ °С; давление при этом падает до 0,1 МПа. Определить начальное давление, работу расширения 1 кг воздуха.

5.28. Адиабатным сжатием повысили температуру воздуха в двигателе так, что она стала равной температуре воспламенения нефти; объем при этом уменьшился в 14 раз. Определить конечную температуру и конечное давление воздуха, если $p_1 = 0,1$ МПа и $t_1 = 100$ °С.

5.29. 2 кг воздуха при давлении 0,1 МПа и $t_1 = 15$ °С адиабатно сжимаются в цилиндре компрессора до давления $p_2 = 0,7$ МПа. Найти конечную температуру сжатого воздуха и работу, затраченную на сжатие.

5.30. 1 кг воздуха при температуре $t_1 = 17$ °С сжимается адиабатно до объема, составляющего $1/5$ начального, а затем расширяется изотермически до первоначального объема.

Определить работу, произведенную воздухом в результате обоих процессов.

5.31. 1 кг воздуха при давлении $p_1 = 0.5$ МПа и $t_1 = 111$ °С расширяется политропно до давления $p_2 = 0.7$ МПа. Определить конечное состояние воздуха, изменение внутренней энергии, количество подведенной теплоты, полученную работу, если показатель политропы $n = 1.2$.

5.32. 1,5 кг воздуха сжимают политропно от $p_1 = 0.09$ МПа и $t_1 = 18$ °С до $p_2 = 1$ МПа; температура при этом повышается до $t_2 = 125$ °С. Определить показатель политропы, конечный объем, затраченную работу, количество отведенной теплоты.

5.33. В политропном процессе температура газа увеличилась в 4 раза, а объем уменьшился в 3 раза. Чему равен показатель политропы? Где на p - v -диаграмме расположен этот процесс? Что происходит в процессе с газом?

5.34. Показатель политропы равен 2. Объем газа увеличился в 3 раза. Как изменились давление и температура газа? Что происходит с газом в этом процессе?

5.35. 5 кг воздуха сжато по политропе с показателем $n=2$ от 1 до 6 ат, начальная температура равна -23 °С. Определить работу сжатия, конечную температуру газа, начальный объем.

6 ВТОРОЙ ЗАКОН ТЕРМОДИНАМИКИ

Второй закон термодинамики определяет направление, в котором протекают процессы, устанавливает условия преобразования тепловой энергии в механическую, а также определяет максимальное значение работы, которая может быть произведена тепловым двигателем.

Второй закон термодинамики математически может быть выражен следующим образом:

$$dS \geq \frac{dQ}{T}, \text{ Дж}/(\text{кг}\cdot\text{К}) \quad (6.1)$$

где dS – бесконечно малое приращение энтропии системы, Дж/кг; dQ – бесконечно малое количество теплоты, полученной системой от источника теплоты, Дж/(кг·К); T – абсолютная температура от источника теплоты, К.

Знак неравенства соответствует необратимым процессам, а знак равенства – обратимым процессам. Следовательно, аналитическое выражение второго закона термодинамики для бесконечно малого обратимого процесса имеет вид

$$dQ = TdS, \text{ Дж}/\text{кг} \quad (6.2)$$

А так как согласно второму закону термодинамики

$$dQ = dU + pdV,$$

то уравнение (6.2) принимает вид

$$TdS = dU + pdV,$$

Энтропия идеального газа

Основным уравнением для определения изменения энтропии в обратимом процессе является выражение:

$$dS = \frac{dq}{T}, \text{ Дж}/(\text{кг}\cdot\text{К}) \quad (6.3)$$

Поскольку в технической термодинамике приходится иметь дело не с абсолютным значением энтропии, а с ее изменением, отсчет значений энтропии можно вести от любого состояния. Для газов принято считать значение энтропии равным нулю при нормальных условиях, т. е. при $p_0 = 101325 \text{ Па}$ и $T_0 = 273,15 \text{ К}$ (760 мм рт. ст. и 0° С).

Определение энтропии для любого состояния газа, отсчитанной от нормального состояния, производят по следующим формулам.

При *переменной теплоемкости*, исходя их линейной зависимости ее от температуры:

$$s = a_v \ln \frac{T}{273} + R \ln \frac{v}{v_H} + b(T - 273); \quad (6.4)$$

$$s = a_p \ln \frac{T}{273} - R \ln \frac{p}{p_H} + b(T - 273); \quad (6.5)$$

$$s = a_v \ln \frac{p}{p_H} + a_p \ln \frac{v}{v_H} + b(T - 273); \quad (6.6)$$

При *постоянной теплоемкости*

$$s = c_v \ln \frac{T}{273} + R \ln \frac{v}{v_H}; \quad (6.7)$$

$$s = c_p \ln \frac{T}{273} - R \ln \frac{p}{p_H}; \quad (6.8)$$

$$s = c_v \ln \frac{p}{p_H} + c_p \ln \frac{v}{v_H}; \quad (6.9)$$

Изменение энтропии между двумя произвольными состояниями газа 1 и 2 определяют по следующим формулам.

При *переменной теплоемкости*, считая зависимость ее от температуры линейной:

$$s_2 - s_1 = a_v \ln \frac{T_2}{T_1} + R \ln \frac{v_2}{v_1} + b(T_2 - T_1); \quad (6.10)$$

$$s_2 - s_1 = a_p \ln \frac{T_2}{T_1} - R \ln \frac{p_2}{p_1} + b(T_2 - T_1); \quad (6.11)$$

$$s_2 - s_1 = a_v \ln \frac{p_2}{p_1} + a_p \ln \frac{v_2}{v_1} + b(T_2 - T_1); \quad (6.12)$$

При *постоянной теплоемкости*

$$s_2 - s_1 = c_v \ln \frac{T_2}{T_1} + R \ln \frac{v_2}{v_1}; \quad (6.13)$$

$$s_2 - s_1 = c_p \ln \frac{T_2}{T_1} - R \ln \frac{p_2}{p_1}; \quad (6.14)$$

$$s_2 - s_1 = c_v \ln \frac{p_2}{p_1} + c_p \ln \frac{v_2}{v_1}; \quad (6.15)$$

Уравнения кривых различных термодинамических процессов в системе координат Ts имеют следующий вид (при постоянной теплоемкости):

уравнение изохоры

$$s_2 - s_1 = c_v \ln \frac{T_2}{T_1}; \quad (6.16)$$

уравнение изобары

$$s_2 - s_1 = c_p \ln \frac{T_2}{T_1}; \quad (6.17)$$

Взаимное расположение изохоры и изобары показано на рисунке 6.1.

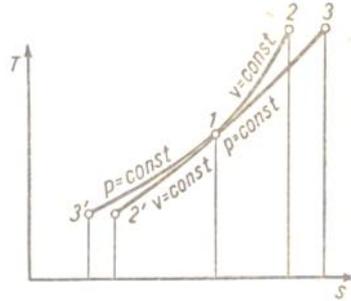


Рисунок 6.1. Взаимное расположение изохоры и изобары

уравнение изотермы

$$T = const \quad (6.18)$$

при этом изменение энтропии в изотермическом процессе

$$s_2 - s_1 = R \ln \frac{p_1}{p_2} = c_p \ln \frac{v_2}{v_1}; \quad (6.19)$$

уравнение адиабаты

$$s = const \quad (6.20)$$

Изображение изотермы и адиабаты в системе координат Ts дано соответственно на рисунках 6.2 и 6.3.

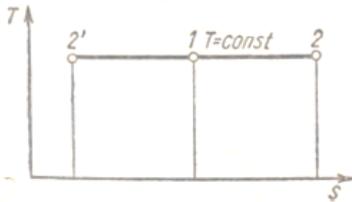


Рисунок 6.2. Изображение изотермы в координатах Ts

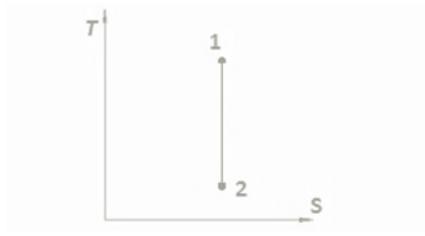


Рисунок 6.3. Изображение адиабаты в координатах Ts

Уравнение политропы

$$s_2 - s_1 = c_p \ln \frac{T_2}{T_1}, \quad (6.21)$$

где

$$c = c \frac{n - k}{n - 1}.$$

Широким распространением при решении термодинамических задач пользуется диаграмма Ts . Адиабаты в этой в этой диаграмме изображаются вертикалями, изотермы – горизонталями, изохоры и изобары идеального газа – логарифмическими кривыми.

Необходимо иметь в виду, что значения энтропии зависят от теплоёмкостей, поэтому для каждого газа нужна отдельная диаграмма Ts .

При пользовании диаграммой Ts значительно упрощается решение различных термодинамических задач, особенно в тех случаях, когда в расчётах не требуется большая точность.

Максимальная работа

Если работа совершается с помощью газа, параметры которого отличаются от параметров окружающей среды, то *максимальная работа*, которую может произвести этот газ, достижима лишь при условии его перехода от начального состояния к состоянию среды обратимым путём. При этом *максимальная полезная работа*

меньше максимальной работы на величину работы вытеснения воздуха окружающей среды.

Величина максимальной полезной работы определяется формулой

$$A_{\text{max полезн}} = (u_1 - u_2) - T_0(s_1 - s_2) - p_0(v_2 - v_1); \quad (6.22)$$

В этой формуле параметры, имеющие индекс 1 и 2, относятся соответственно к начальному и конечному состоянию источника работы, а параметры с индексом 0 относятся к рабочей среде.

Так как выражения

$$u_1 - u_2 \text{ и } T_0(s_1 - s_2)$$

представляют собой соответственно абсолютную величину работы адиабатного и изотермического процесса, то формулу (6.22) можно представить в виде

$$A_{\text{max полезн}} = A_{\text{ад}} - A_{\text{из}} - p_0(v_2 - v_1); \quad (6.23)$$

Примеры решения задач

Пример 6.1. Определить энтропию 1 кг кислорода при $p = 0,8$ МПа и $t = 250^\circ\text{C}$. Теплоёмкость считать постоянной.

Решение

По формуле (6.8)

$$s = c_p \ln \frac{T}{273} - R \ln \frac{p}{p_n}.$$

Так как для двухатомных газов $c_{\mu,p} = 29,3$ кДж/(кмоль · К), то

$$s = \frac{29,3}{32} \ln \frac{523}{273} - \frac{8,314}{32} \ln \frac{8}{1,013};$$

$$s = 0,5978 - 0,5373 = 0,0605 \text{ кДж}/(\text{кг} \cdot \text{К}).$$

Пример 6.2. Найти энтропию 1 кг кислорода при $p = 0,8$ МПа и $t = 250^\circ\text{C}$. Теплоёмкость считать переменной, приняв зависимость её от температуры линейной.

Решение

По формуле (6.5)

$$s = a_p \ln \frac{T}{273} - R \ln \frac{p}{p_n} + b(T - 273)..$$

Для кислорода

$$c_p = 0,9127 + 0,00012724t \text{ кДж}/(\text{кг} \cdot \text{К}).$$

Поэтому формула линейной зависимости истинной теплоёмкости будет иметь вид

$$c_p = 0,9127 + 0,00025448t \text{ кДж}/(\text{кг} \cdot \text{К}),$$

или

$$c_p = 0,9127 + 0,00025448(T - 273) \text{ кДж}/(\text{кг} \cdot \text{К}),$$

следовательно,

$$c_p = 0,8432 + 0,00025448t \text{ кДж}/(\text{кг} \cdot \text{К}).$$

Таким образом,

$$a = 0,8432; b = 0,00025448;$$

значение энтропии

$$s = 0,8432 \ln \frac{523}{273} - \frac{8,314}{32} \ln \frac{0,8}{0,1013} + 0,00025448 (523 - 273).$$

$$s = 0,5476 - 0,5371 + 0,0634 = 0,0739 \text{ кДж}/(\text{кг} \cdot \text{К}).$$

Для тех же условий, но при постоянной теплоёмкости (см. пример 6.1) значение энтропии $s = 0,0605 \text{ кДж}/(\text{кг} \cdot \text{К})$, т. е. меньше на

$$(0,0739 - 0,0605)/0,0739 = 0,0134/0,0739 = 18,1\%.$$

Этот результат показывает, что для повышенных и высоких температур следует пользоваться зависимостью $c = f(t)$.

Пример 6.3. 1 кг кислорода при температуре $t_1 = 127^\circ\text{C}$ расширяется до пятикратного объёма; температура его при этом падает до $t_2 = 27^\circ\text{C}$. Определить изменение энтропии. Теплоёмкость считать постоянной.

Решение. По уравнению (6.13)

$$s_2 - s_1 = c_v \ln \frac{T_2}{T_1} + R \ln \frac{v_2}{v_1} = \frac{20,93}{32} \ln \frac{300}{400} + 0,260 \ln 5 = 0,2324 \text{ кДж}/(\text{кг} \cdot \text{К}).$$

$$\text{Отв. } s = 1,94 \text{ кДж}/\text{К}.$$

Задачи

6.1. 1 кг воздуха сжимается от $p_1 = 10^5$ Па и $t_1 = 15$ °С до $p_2 = 5 \cdot 10^5$ Па и $t_2 = 100$ °С. Определить изменение энтропии. Теплоемкость считать постоянной.

6.2. Определить приращение энтропии 3 кг воздуха: а) при нагревании его по изобаре от 0 до 400 °С; б) при нагревании его по изохоре от 0 до 880 °С; в) при изотермическом расширении с увеличением объема в 16 раз. Теплоемкость считать постоянной.

6.3. 10 м³ воздуха, находящегося в начальном состоянии при нормальных условиях, сжимают до конечной температуры 400 °С. Сжатие производится: 1) изохорно; 2) изобарно; 3) адиабатно и 4) политропно с показателем политропы $m = 2,2$. Считая значения энтропии при нормальных условиях равным нулю и принимая теплоемкость воздуха постоянной, определить энтропию воздуха в конце каждого процесса.

6.4. Согласно варианту определить изменение энтропии при расширении или сужении 1 кг азота, температура которого изменяется от t_1 до t_2 , а объем от V_1 до V_2 при постоянной теплоемкости:

Вариант	$t_1, ^\circ\text{C}$	$t_2, ^\circ\text{C}$	$V_1, \text{м}^3/\text{кг}$	$V_2, \text{м}^3/\text{кг}$
1	127	27	1	5
2	127	47	1	3
3	150	75	5	10
4	50	150	15	5
5	37	127	5	1
6	148	28	1	10
7	45	165	10	1
8	164	34	3	15
9	19	129	16	4
10	185	45	3	15

7. КРУГОВЫЕ ПРОЦЕССЫ

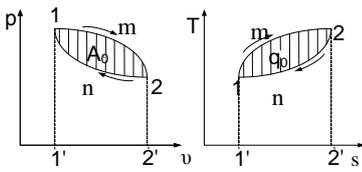


Рис. 7.1 Круговые процессы

Круговым процессом или циклом называется совокупность термодинамических процессов, в результате осуществления которых рабочее тело возвращается в исходное состояние.

Работа положительна, если цикл совершается по часовой стрелке, так называемый *прямой цикл*, и отрицательна, если против часовой стрелки – *обратный цикл*.

Прямой цикл, где $A > 0$ характерен для тепловых двигателей; обратный цикл, где $A < 0$ – для холодильных машин.

Обозначим q_1 -количество теплоты, заимствованного одним килограммом рабочего тела от внешнего (верхнего) источника теплоты; q_2 -количество теплоты, отданной одним килограммом рабочего тела внешнему источнику (нижний источник). Тогда работу цикла можно найти по формуле:

$$A_0 = q_1 - q_2, \text{ Дж/кг} \quad (7.1)$$

Степень совершенства процесса превращения теплоты в работу в круговых процессах характеризуется термическим к.п.д. Пользуясь T - s -диаграммой термический к.п.д. можно определить графическим путём:

$$\eta_t = (\text{пл. } 1m2n) / (\text{пл. } 1m22'1') \quad (7.2)$$

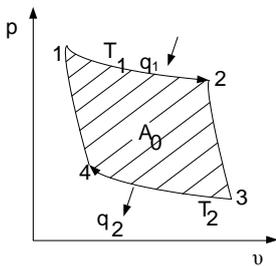


Рис. 7.2 Цикл Карно

Цикл Карно

Цикл Карно является наиболее совершенным из круговых процессов, обладает наибольшим η_t .

В точке 1 (рис. 7.2) рабочее тело приводится в соприкосновение с горячим источником тепла, имеющим температуру T_1 . За счет теплоты q_1 , полученной от этого источника происходит изотермический процесс расширения рабочего тела:

$$q_1 = RT_1 \ln(v_2/v_1), \text{ Дж/кг} \quad (7.3)$$

В точке 2 рабочее тело изолируется от горячего источника и продолжает расширяться адиабатно. При этом внутренняя энергия расходуется на совершение работы, в результате чего температура уменьшается до T_2 .

В точке 3 рабочее тело приводится в соприкосновение с охладителем, имеющем температуру T_2 . При этой температуре проходит процесс изотермического сжатия:

$$q_2 = RT_2 \ln(v_3/v_4), \text{ Дж/кг} \quad (7.4)$$

В точке 4 рабочее тело изолируется от охладителя и продолжает сжиматься адиабатно. При этом внутренняя энергия растёт и в точке 1 температура достигает значения T_1 , за счет энергии полученной газом в виде внешней работы, т.е. система возвращается в исходное состояние: $A_0 = q_1 - q_2$

$$\eta_i = (T_1 - T_2) / T_1 = 1 - T_2 / T_1, \text{ Дж/кг} \quad (7.5)$$

Примеры решения задач

Пример 7.1. 1 кг воздуха совершает цикл Карно между температурами $t_1 = 627 \text{ }^\circ\text{C}$ и $t_2 = 27 \text{ }^\circ\text{C}$, наивысшее давление при этом 6 МПа, а наинизшее – 0,1 МПа. Определить параметры состояния воздуха в характерных точках цикла, работу, термический к.п.д. цикла и количество подведённой и отведённой теплоты (рис.7.2).

Решение

Точка 1. $p_1 = 6 \text{ МПа}$, $T_1 = 900 \text{ К}$

Удельный объём газа находим из характеристического уравнения:

$$v_1 = \frac{RT_1}{p_1} = \frac{287 \cdot 900}{6 \cdot 10^4} = 0,043 \text{ м}^3/\text{кг}$$

Точка 2. $T_2 = 900 \text{ К}$;

Из уравнения адиабаты (линия 2-3)

$$\frac{p_2}{p_3} = \left(\frac{T_2}{T_3} \right)^{k/k-1} = 3^{1,4/0,4} = 46,8$$

$$p_2 = 0,1 \cdot 46,8 = 4,68 \text{ МПа}$$

Из уравнения изотермы (линия 1-2) получаем :

$$v_2 = p_1 v_1 / p_2 = 6 \cdot 0,043 / 4,68 = 0,055 \text{ м}^3 / \text{кг}$$

Точка 3. $p_3 = 0,1$ МПа ; $T_3 = 300$ К;

$$v_3 = RT_3 / p_3 = 287 \cdot 300 / 0,1 \cdot 10^6 = 0,861 \text{ м}^3 / \text{кг}$$

Точка 4. $T_4 = 300$ К;

Из уравнения адиабаты (линия 4-1) имеем:

$$p_1 / p_4 = (T_1 / T_4)^{k/k-1} = 4,68; \quad p_4 = \frac{p_1}{4,68} = 0,128 \text{ МПа};$$

Из уравнения изотермы (линия 3-4) получаем:

$$v_4 = \frac{p_3 v_3}{p_4} = \frac{0,1 \cdot 0,861}{0,128} = 0,671 \text{ м}^3 / \text{кг}$$

Термический к.п.д. цикла

$$\eta_t = (T_1 - T_2) / T_1 = (900 - 300) / 900 = 0,667$$

Подведённое количество теплоты

$$q_1 = RT_1 \ln \frac{v_2}{v_1} = 2,303 \cdot 0,287 \cdot 900 \cdot \lg \frac{0,055}{0,043} = 63,6 \frac{\text{кДж}}{\text{кг}}$$

Отведённое количество теплоты

$$q_2 = RT_3 \ln \frac{v_3}{v_4} = 2,303 \cdot 0,287 \cdot 300 \cdot \lg \frac{0,861}{0,671} = 21,3 \frac{\text{кДж}}{\text{кг}}$$

Работа цикла:

$$l_0 = q_1 - q_2 = 63,6 - 21,3 = 42,3 \text{ кДж/кг}$$

Для проверки можно воспользоваться формулой:

$$\eta_t = \frac{q_1 - q_2}{q_1} = \frac{l_0}{q_1} = \frac{42,3}{63,6} = 0,662.$$

Задачи

7.1. 1 кг воздуха совершает цикл Карно между температурами $t_1 = 327$ °С и $t_2 = 27$ °С наивысшее давление при этом 2 МПа, а наинизшее – 0,12 МПа. Определить параметры состояния воздуха в характерных точках цикла, работу, термический к.п.д. цикла и количество подведённой и отведённой теплоты.

7.2. 1 кг воздуха совершает цикл Карно в пределах температур $t_1 = 250$ °С и $t_2 = 30$ °С. Наивысшее давление $p_1 = 1$ МПа, наименьшее – $p_1 = 0,12$ МПа. Определить параметры состояния воздуха в характерных точках цикла, работу, термический к.п.д. цикла и количество подведённой и отведённой теплоты.

7.3. Определить термический к.п.д. цикла теплового двигателя и отведенное тепло Q_2 . Если подводимое в цикле тепло $Q_1=280$ кДж, а полезная работа $A_0=120$ кДж.

7.4. Цикл Карно совершается с 1 кг воздуха в интервале температур $t_1 = 927$ °С и $t_2 = 27$ °С. Подводимая в цикле теплота $Q_1=30$ кДж. Определить максимальное давление в цикле, работу, термический к.п.д., если минимальное давление в цикле 1 бар.

7.5. В цикле Карно подвод тепла осуществляется при $t_1 = 1200$ °С. Полезная работа, получаемая в цикле, $A_0=265$ кДж. Определить термический к.п.д. цикла, подведённое и отведённое тепло и температуру отвода тепла, если рабочее тело - 1 кг воздуха, а относительное изменение объемов в изотермических процессах равно 3.

8. ВОДЯНОЙ ПАР И ЕГО СВОЙСТВА

Пар может быть влажный, сухой насыщенный и перегретый. Удельный объем влажного насыщенного пара зависит от соотношения масс содержащих в нем сухого насыщенного пара и жидкости:

$$v_x = v'(1-x) + v''x = v' + x(v'' - v') \quad (8.1)$$

где v' и v'' – удельный объем жидкости и сухого насыщенного пара, м³/кг

Массовая доля пара:

$$x = (v_x - v') / (v'' - v') \quad (8.2)$$

Удельные объемы v' и v'' приводятся в таблицах насыщенного пара.

Величина x называется также степенью сухости пара; $(1-x)$ – степенью влажности пара.

Удельная теплота парообразования:

$$r = i'' - i', \text{ Дж/кг} \quad (8.3)$$

где i'' – энтальпия сухого насыщенного пара, i' – энтальпия жидкости.

Изменение внутренней энергии жидкости при получении сухого пара из 1 кг жидкости при 0 °С:

$$u'' = i'' - pv'', \text{ Дж/кг} \quad (8.4)$$

Для влажного насыщенного пара имеем следующие соотношения:

$$i_x = i' + rx \quad (8.5)$$

$$u_x = i_x - pv_x \quad (8.6)$$

Перегретый пар имеет более высокую температуру по сравнению с температурой сухого насыщенного пара. Разность температур перегретого и насыщенного пара того же давления называют перегревом пара.

Теплота перегрева может быть найдена из выражения:

$$q_n = i - i'' \quad (8.7)$$

Примеры решения задач

Пример 8.1. Манометр, установленный на паровом котле, показывает давление 12 ати. Барометрическое давление 1 ат. Какова температура пара в котле?

Решение. Пар в паровом котле соприкасается с водой, поэтому он может быть только влажным; температура такого пара равна температуре насыщения t_s . Пользуясь справочными таблицами, находим, что

$$p = p_m + p_{бар} = 12 + 1 = 13 \text{ ата и } t_s = 190,71 \text{ °С}$$

Пример 8.2. Определить состояние водяного пара, если давление его 0,5 МПа, а температура 172 °С.

Решение. Давлению 0,5 МПа соответствует температура насыщенного пара 151,8 °С. Так как эта температура ниже заданной в условии, то пар перегрет, причем перегрев составляет

$$t - t_s = 172 - 151,8 = 20,2 \text{ } ^\circ\text{C}$$

Пример 8.3. Определить состояние водяного пара, если давление его 0,6 МПа, а удельный объем $v = 0,3 \text{ м}^3/\text{кг}$.

Решение. Давлению 0,6 МПа соответствует удельный объем сухого насыщенного пара $v'' = 0,3156 \text{ м}^3/\text{кг}$. Так как для заданного состояния $v'' > v$, то пар является влажным. Степень сухости его по уравнению (6.2)

$$x = \frac{v_x - v'}{v'' - v'} = \frac{0,3 - 0,0011}{0,3156 - 0,0011} = 0,95$$

Пример 8.4. Найти внутреннюю энергию сухого насыщенного пара при давлении 1,5 МПа.

Решение. По формуле (6.4)

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

По справочным данным $i'' = 2792 \text{ кДж/кг}$; $v'' = 0,1317 \text{ м}^3/\text{кг}$.

Следовательно,

$$u'' = i'' - pv'' = 2792 - \frac{1,5 \cdot 10^6 \cdot 0,1317}{1000} = 2594 \text{ кДж/кг}$$

Задачи

8.1. Парциальное давление пара в атмосферном воздухе составляет 0,02 МПа, температура воздуха равна $70 \text{ } ^\circ\text{C}$. Определить относительную влажность воздуха.

8.2. Найти удельный объем влажного пара, если $p = 2 \text{ МПа}$, а $x = 0,9$.

8.3. Определить состояние водяного пара, если давление его $p = 0,6 \text{ МПа}$, а удельный объем $v = 0,3 \text{ м}^3/\text{кг}$.

8.4. Найти массу 10 м^3 пара при давлении $p = 1,4 \text{ МПа}$ и степени сухости $x = 96\%$.

8.5. Манометр парового котла показывает давление $p = 0,15 \text{ МПа}$. Показание барометра равно 764 мм рт. ст. Считая пар сухим насыщенным, найти его температуру и удельный объем.

8.6. Водяной пар имеет параметры: $p = 3 \text{ МПа}$, $t = 400 \text{ } ^\circ\text{C}$. Определить значения остальных параметров.

8.7. Найти состояние водяного пара, если его давление $2,9 \text{ МПа}$, а удельный объем $0,079 \text{ м}^3/\text{кг}$.

8.8. Найти массу, внутреннюю энергию, энтальпию и энтропию 6 м^3 насыщенного водяного пара при давлении $p=1,2 \text{ МПа}$ и степени сухости $x=0,9$.

8.9. Водяной пар имеет параметры: $p = 9 \text{ МПа}$, $t=500 \text{ °C}$. Определить значения остальных параметров.

8.10. Найти массу 9 м^3 пара при давлении $p=0,8 \text{ МПа}$ и степени влажности 10% .

9 ВЛАЖНЫЙ ВОЗДУХ

В воздухе всегда содержится то или иное количество влаги в виде водяного пара. Такую смесь сухого воздуха с водяным паром называют влажным воздухом.

Так как обычно расчеты, связанные с влажным воздухом, выполняют при давлениях, близких к атмосферному, и парциальное давление пара в нем невелико, то с достаточной точностью можно применять к влажному пару все формулы, полученные для идеальных газов. Поэтому в дальнейшем принимаем, что влажный воздух подчиняется уравнению состояния идеальных газов:

$$pV = mRT; \quad (9.1)$$

а также по закону Дальтона

$$p = p_v + p_n; \quad (9.2)$$

где p – давление влажного воздуха; p_v – парциальное давление сухого воздуха; p_n – парциальное давление пара;

Величины p , p_v и p_n измеряются в одних и тех же единицах.

Абсолютной влажностью воздуха называют массу водяного пара, содержащегося в 1 м^3 влажного воздуха, или (что то же) плотность пара ρ_n при его парциальном давлении и температуре воздуха.

Величину

$$\varphi = \frac{\rho_n}{\rho_{\max}}, \quad (9.3)$$

представляющую отношение абсолютной влажности воздуха при данной температуре ρ_n к его максимально возможной абсолютной

влажности ρ_{\max} при той же температуре, называют *относительной влажностью*.

Если температура влажного воздуха меньше или равна температуре насыщения водяного пара при давлении смеси, то ρ_{\max} будет равна плотности насыщенного пара при данной температуре, т.е. ρ_n , и значение ее определяется по таблицам насыщенного пара. Если же температура влажного воздуха больше температуры насыщения водяного пара при давлении смеси, то ρ_{\max} будет равна плотности перегретого пара при температуре и давлении смеси. Значения ρ_{\max} в этом случае определяют из таблиц для перегретого водяного пара.

Относительная влажность может быть также приближенно найдена из уравнения:

$$\varphi = \frac{p_n}{p_{\max}}, \quad (9.4)$$

где p_n – давление насыщения водяного пара температуре смеси (по таблицам насыщенного пара).

Для характеристики влажного воздуха пользуются также понятием *влажностное содержание*, под которым понимают отношение массы влаги (пара) во влажном воздухе к массе сухого воздуха в нем:

$$d = \frac{M_n}{M_B} = \frac{\rho_n}{\rho_B}, \quad (9.5)$$

Величину d обычно измеряют в г/кг (в граммах влаги на 1 кг сухого воздуха, содержащегося во влажном воздухе), Выражение (9.5) можно привести к следующему виду:

$$d = 622 \frac{p_n}{p - p_n}, \text{ г/кг} \quad (9.6)$$

Из этого уравнения следует, что

$$p_n = p \frac{d}{622 + d}. \quad (9.7)$$

Нетрудно видеть, что парциальное давление водяного пара при данном давлении влажного воздуха является функцией только

влажносодержания, и наоборот. Поэтому аналогично уравнениям (9.6) и (9.7) можно написать

$$d = 622 \frac{p_{\text{н}}}{p - p_{\text{н}}}, \quad (9.8)$$

$$p_{\text{н}} = p \frac{d_{\text{max}}}{622 + d_{\text{max}}}. \quad (9.9)$$

где d_{max} – максимально возможное влагосодержание влажного воздуха (если температура его ниже температуры насыщения водяного пара при давлении смеси).

Отношение влагосодержания d к максимально возможному влагосодержанию влажного воздуха (при той же температуре и давлении смеси) называют степенью насыщения и обозначают через

$$\psi = \frac{d}{d_{\text{max}}} \quad (9.10)$$

Из уравнений (9.7) и (9.9) получаем зависимость между ψ и φ :

$$\varphi = \psi \frac{622 + d_{\text{max}}}{622 + d} \quad (9.11)$$

Та температура, до которой надо охладить при постоянном давлении влажный воздух, чтобы он стал насыщенным ($\varphi = 100\%$), называется точкой росы t_r . Она, следовательно, может быть определена (по таблицам насыщенного пара) как температура насыщения при парциальном давлении пара.

Плотность влажного воздуха определяется из уравнения

$$\rho = \frac{p}{287T} - 0,0129\psi \frac{\varphi p_{\text{н}}}{T} \text{ кг/м}^3, \quad (9.12)$$

где p и $p_{\text{н}}$ выражены в Па, а T – в К.

Энтальпию I влажного воздуха определяем как сумму энтальпий сухого воздуха и водяного пара. Энтальпию влажного воз-

духа относят к 1 кг сухого воздуха, т.е. к $(1+d)$ кг влажного воздуха. Поэтому

$$I = i_b + i_n d, \quad (9.13)$$

или

$$I = i_b + \frac{i_n d}{1000}, \quad (9.14)$$

если d берем в г/кг.

Энтальпия 1 кг сухого воздуха, выраженная в кДж, численно равна его температуре t °С, так как теплоемкость сухого воздуха при постоянном давлении равна 1 кДж/(кг·К). Следовательно,

$$i_b = c_p t = 1 \cdot t, \text{ кДж/кг.}$$

Энтальпия водяного пара, содержащегося во влажном воздухе, с достаточной точностью определяется из формулы

$$i_n = 2500 + 1,93 \cdot t, \text{ кДж/кг.}$$

Таким образом, энтальпия влажного воздуха

$$I = t + 0,001 \cdot (2500 + 1,93 \cdot t), \text{ кДж/кг} \quad (9.15)$$

При сушке различных продуктов нагретым воздухом влаго-содержание его увеличивается за счет испарения воды. Этот процесс называют адиабатным испарением воды, если теплоту, необходимую для испарения, берем только из окружающего воздуха. Температура воздуха при этом понижается, причем если этот процесс продолжается до полного насыщения воздуха, то температура его понижается до так называемой температуры адиабатного насыщения воздуха, известной также под названием *истинной температуры мокрого термометра*.

На практике для определения относительной влажности воздуха часто пользуются психрометром – прибором, состоящим из двух термометров. Шарик одного из них обернут влажной тканью, вследствие чего, показания сухого и мокрого термометров различны. Температура, показываемая мокрым термометром психрометра, не равна истинной температуре мокрого термометра, а всегда не-

сколько выше ее. Объясняется это притоком теплоты через выступающий столбик ртути и восприятием шариком термометра теплоты, излучаемой окружающими предметами.

Истинная температура мокрого термометра t_m определяется из формулы

$$t_m = t'_m - \frac{x(t_c - t'_m)}{1000}, \text{ } ^\circ\text{C} \quad (9.16)$$

где t'_m – показания мокрого термометра; $t_c - t'_m$ – психрометрическая разность; x – поправка к показанию мокрого термометра в процентах, определяемая из диаграммы приложения 3.

Отклонения показания мокрого термометра от истинной температуры мокрого термометра значительно уменьшается, если шарик термометра омывается потоком воздуха, имеющим большую скорость, а также если шарик и столбик термометра защищены от восприятия теплоты, отдаваемой окружающими предметами.

Диаграмма Id влажного воздуха, предложенная проф. Л.К. Рамзиным (рис.9.1), весьма удобна для определения параметров влажного воздуха.

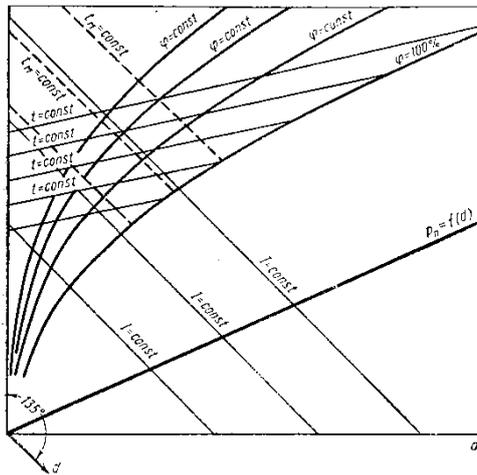


Рис. 9.1. Диаграмма Id влажного воздуха

Она также значительно упрощает решение различных задач, связанных с изменением состояния влажного воздуха и особенно с процессами осушения. В этой диаграмме по оси абсцисс отложено влагосодержание d , а по оси ординат – энтальпия I влажного воздуха (на 1 кг сухого воздуха). Барометрическое давление принято $B = 745$ мм рт.ст. (среднегодовое давление для центральной полосы России). Для более удобного расположения отдельных линий на диаграмме координатные оси в ней проведены под углом 135° .

В выполненных диаграммах наклонная ось влагосодержания не вычерчивается, а вместо нее из начала координат проводится горизонталь, на которую значения d спроектированы с наклонной оси. Поэтому линии $I = \text{const}$ идут наклонно, параллельно наклонной оси абсцисс, линии же $d = \text{const}$ идут вертикально, параллельно оси ординат. В диаграмме Id построены также изотермы ($t = \text{const}$), весьма близкие к прямым.

Кривая $\varphi = 100\%$ является своего рода пограничной кривой, кривой насыщения. Вся область над линией $\varphi = 100\%$ соответствует влажному насыщенному воздуху (для различных значений φ). Область, лежащая под этой линией, характеризует состояние воздуха, насыщенного водяным паром.

Кроме указанных кривых, в последних изданиях диаграмм Id приведены также линии постоянных истинных температур мокрого термометра t_m . Внизу диаграммы построена кривая $p_n = f(d)$ по формуле (9.7) в прямоугольной системе координат. По оси ординат отложено парциальное давление в мм рт. ст., а по оси абсцисс – влагосодержание.

В приложении 4 дана диаграмма Id для воздуха при барометрическом давлении $B = 745$ мм рт. ст. Процесс подогрева или охлаждения влажного воздуха изображается на этой диаграмме как процесс при постоянном влагосодержании ($d = \text{const}$), а процесс сушки – как процесс с постоянной энтальпией ($i = \text{const}$). Диаграмма Id дает возможность по двум каким-либо параметрам влажного воздуха (обычно φ и t) определить I , d и p_n . По этой диаграмме можно также найти точку росы. Для этого нужно из точки, характеризующей данное состояние воздуха, провести вертикаль ($d = \text{const}$) до пересече-

ния с линией $\varphi = 100\%$. Изотерма, проходящая через эту точку, определяет температуру точки росы.

Состояние влажного воздуха можно также определить по диаграмме Id , если известны показания сухого и мокрого термометров психрометра. Внося необходимую поправку в показания мокрого термометра по формуле (9.12), находим истинную температуру мокрого термометра. Далее из точки, соответствующей относительной влажности $\varphi = 100\%$ и истинной температуре мокрого термометра, проводим изотерму t_m прямую до пересечения с изотермой сухого термометра t_c . Полученная точка характеризует состояние влажного воздуха.

Примеры решения задач

Пример 9.1. Определить абсолютную влажность воздуха, если парциальное давление пара в нем $p_n = 0,014$ МПа, а температура $t = 60$ °С. Барометрическое давление равно 10 325 Па (760 мм рт. ст.).

Решение. Температуре $t = 60$ °С по табл. насыщенного водяного пара соответствует давление $p_n = 0,019917$ МПа. Следовательно, при парциальном давлении $p_n = 0,014$ МПа пар перегрет. По табл. перегретого пара для $p = 0,014$ МПа и $t = 60$ °С имеем $v = 10,95$ м³/кг.

Следовательно, абсолютная влажность

$$\rho_n = \frac{1}{v} = \frac{1}{10,95} = 0,0913 \text{ кг/м}^3$$

Пример 9.2. Определить влагосодержание воздуха при температуре $t = 60$ °С и барометрическом давлении $B = 99325$ Па (745 мм рт. ст.), если относительная влажность воздуха $\varphi = 60\%$.

Решение. По формуле (9.5)

$$d = \frac{p_n}{p_b},$$

а так как по уравнению (9.4)

$$\varphi = \frac{p_n}{p_n^*},$$

то

$$p_n = \varphi \cdot p_n^*,$$

p_n определяют по табл. насыщенного водяного пара для температуры $t = 60\text{ }^\circ\text{C}$. Из этой таблицы $p_n = 0,01917\text{ МПа}$ и, следовательно,

$$p_n = 0,6 \cdot 0,01917 = 0,012\text{ МПа.}$$

По таблицам перегретого пара для $p = 0,012\text{ МПа}$ и $t = 60\text{ }^\circ\text{C}$ находим $v = 12,78\text{ м}^3/\text{кг}$. Тогда

$$\rho_n = \frac{1}{12,78} = 0,078\text{ кг/м}^3.$$

Парциальное давление воздуха

$$p_v = p - p_n = 99\,325 - 12\,000 = 87\,325\text{ Па} = 0,0873\text{ МПа.}$$

Плотность влажного воздуха

$$\rho_v = \frac{p_v}{RT} = \frac{0,0873 \cdot 10^6}{287(273 + 60)} = 0,913\text{ кг/м}^3,$$

поэтому

$$d = \frac{0,078}{0,913} = 0,0854\text{ кг/кг} = 85,4\text{ г/кг,}$$

Значение d можно также определить из формулы (9.6):

$$d = 622 \cdot \frac{p_n}{B - p_n} = 622 \frac{0,012}{0,0873} = 85,2\text{ г/кг,}$$

Пример 9.3. Каково состояние воздуха, если температура его равна $50\text{ }^\circ\text{C}$, а парциальное давление пара в нем $p_n = 800\text{ Па}$ (60 мм рт. ст.).

Решение. По табл. насыщенного водяного пара определяем p_n . При температуре $t = 50\text{ }^\circ\text{C}$

$$p_n = 0,012335\text{ МПа (93 мм рт. ст.).}$$

Так как

$$p_n = 800\text{ Па} < p_n = 12335\text{ Па,}$$

то пар воздуха перегрет, а следовательно, воздух при этом не насыщен.

Задачи

1. Определить абсолютную влажность воздуха, если парциальное давление пара $p = 0,3$ ат, а температура $t = 80$ °С. Барометр показывает $B = 745$ мм рт. ст.

2. Определить влагосодержание воздуха при температуре $t = 60$ °С и давлении барометра $B = 745$ мм рт. ст., если относительная влажность воздуха $\varphi = 60$ %.

3. Каково состояние воздуха, если температура его равна 50 °С, а парциальное давление пара $p_n = 60$ мм рт. ст.?

4. Задано состояние влажного воздуха $t_b = 80$ °С, $p_n = 0,15$ ат. Определить относительную влажность, влагосодержание и плотность. Давление барометра $B = 745$ мм рт. ст.

5. Газовый двигатель всасывает 500 м³/ч воздуха при $t = 25$ °С. Относительная влажность воздуха $\varphi = 0,4$. Какое количество водяного пара всасывается двигателем в час?

6. Наружный воздух, имеющий температуру $t = 20$ °С и влагосодержание $d = 6$ г/кг, подогревается до температуры 45 °С. Определить относительную влажность наружного и подогретого воздуха. Барометрическое давление принять равным 1 ат.

Библиографический список

Основной:

1. *Кириллин В.А.* Техническая термодинамика : Учебник для вузов / В.А. Кириллин, В.В. Сычев, А.Е. Шейндлин. -5-е изд., перераб. и доп. – М.: Изд. дом МЭИ, 2008, 495 с.
2. Теплотехника: Учебник для вузов / В.Н. Луканин и др.; под ред. В.Н. Луканина.- М.: Высш. шк., 2009, 670 с.
3. Термодинамика: Учебное пособие для вузов. В 2-х ч. Ч1. Основной курс /В.П. Бурдаков, Д.В. Дзюбенко, С.Ю. Меснянкин, Т.В. Михайлова. – М.: Дрофа, 2009, 480 с.
4. Техническая термодинамика и теплотехника : Учебное пособие для вузов /Л.Т. Бахшиева и др.; под ред. А.А. Захаровой. – М.: Академия, 2008, 272 с.

Дополнительный:

5. *Востриков В.А.* Практикум по технической термодинамике / В.А. Востриков, Е.И. Павлова. – М.:Изд.дом «Руда и металлы». 2000, 174 с.
6. *Ерохин В.Г.* Сборник задач по основам теплотехники и гидравлики/ В.Г. Ерохин, М.Г. Маханько. - М.: Энергия. 1972, 176 с.
7. Сборник задач по технической термодинамике / Т.Н. Андрианов, В.В. Дзамнов и др. М.: Энергия. 1971, 263 с.
8. *Рабинович О.М.* Сборник задач по технической термодинамике. - М.: Машиностроение. 1973, 344 с.
9. *Юдаев Б.Н.* Техническая термодинамика и теплопередача. М.: Высшая школа. 1988, 479 с.

ПРИЛОЖЕНИЕ 1

Единицы некоторых величин и соотношения между ними
в разных системах единиц

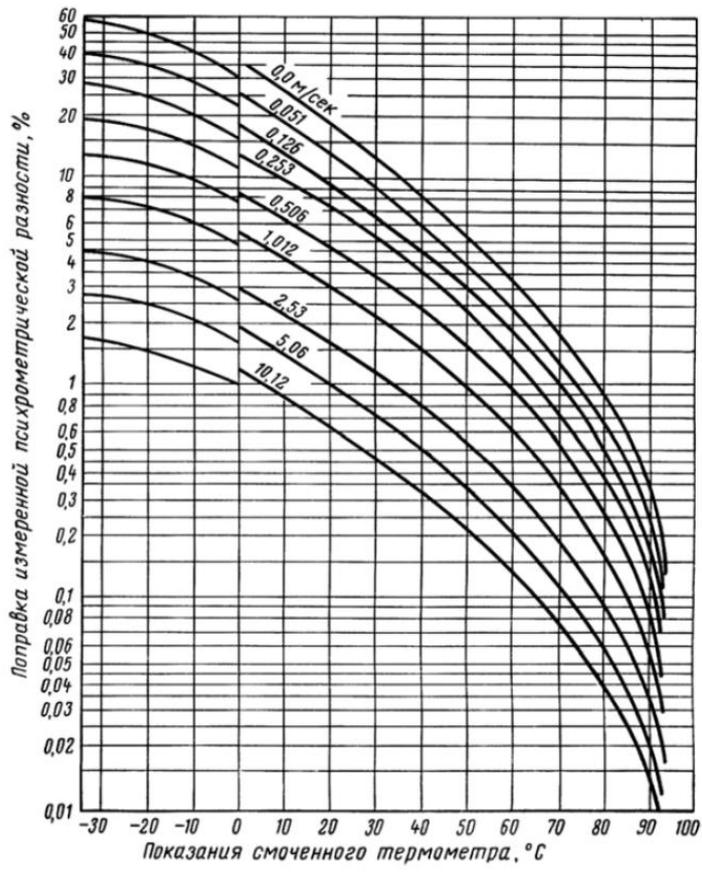
Величина	Система единиц		
	Международная (СИ)	Техническая (МКГСС)	Физическая (СГС)
Длина	1 м	1 м	1 см = 10^{-2} м
Масса	1 кг	1 кг · с ² /м	1 г = 10^{-3} кг
Время	1 с	1 с	1 с
Сила	1 Н = 1 кг · м/с ²	1 кгс = 9,81 Н	1 дин = 1 г · м/с ² = 10^{-5} Н
Плотность	1 кг/м ³	1 кгс · с ² /м ⁴	1 г/см ³
Удельный вес	1 Н/м ³	1 кгс/м ³	1 дин/см ³
Динамический коэффициент вязкости	1 кг/(м · с)	1 кгс · с/м ²	1 П (пуаз) = 1 г/(см · с)
Кинематический коэффициент вязкости	1 м ² /с	1 м ² /с	1 Ст (стокс) = 1 см ² /с
Давление	1 Па = 1 Н/м ² (10^5 Па = 1 бар)	1 кгс/м ² (10^4 кгс/м ² = 1 ат)	1 дин/см ²
Энергия (работа)	1 Дж = 1 Н · м	1 кгс · м	1 эрг = 1 дин · см

ПРИЛОЖЕНИЕ 2

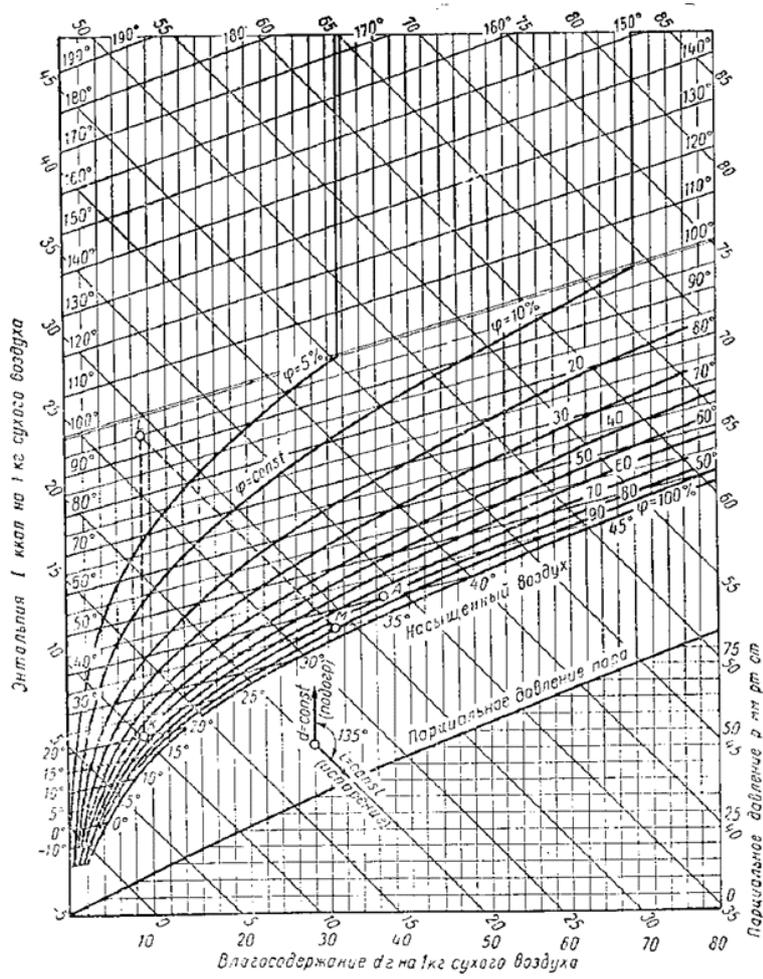
Приближенные значения молярных теплоемкостей при постоянном объеме и постоянном давлении ($p = const$)

Газы	Теплоемкость в кДж/(кмоль · К)	
	c_{mv}	c_{mp}
Одноатомные	12,56	20,93
Двухатомные	20,93	29,31
Трех- и многоатомные	29,31	37,68

ПРИЛОЖЕНИЕ 3



ПРИЛОЖЕНИЕ 4



Оглавление

Введение.....	4
1 Параметры состояния тела	4
1.1 Основные понятия термодинамики	4
1.2 Основные параметры состояния газообразных тел.....	5
Примеры решения задач	6
Задачи	7
2 Идеальные газы и основные газовые законы.....	8
Примеры решения задач	10
Задачи	11
3 Газовые смеси	13
Примеры решения задач	15
Задачи	16
4 Законы термодинамики. теплоемкость.....	19
4.1 Уравнения первого и второго начал термодинамики	19
4.2 Теплоемкость	20
Примеры решения задач	21
Задачи	24
5 Основные газовые процессы	25
5.1 Изобарный процесс	25
5.2 Изохорный процесс	25
5.3 Изотермический процесс	26
5.4 Адиабатный процесс	26
5.5 Политропный процесс.....	27
Примеры решения задач	28
Задачи	32
6 Второй закон термодинамики	37
Энтропия идеального газа	37
Максимальная работа.....	41
Примеры решения задач	42
Задачи	44
Цикл Карно.....	45
Примеры решения задач	46
Задачи	47
8. Водяной пар и его свойства.....	48

Примеры решения задач	49
Задачи	50
9 Влажный воздух	51
Примеры решения задач	57
Задачи	59
Библиографический список	60
Приложение 1	61
Приложение 2	61
Приложение 3	62
Приложение 4	63