

**МИНИСТЕРСТВО СЕЛЬСКОГО ХОЗЯЙСТВА
И ПРОДОВОЛЬСТВИЯ РЕСПУБЛИКИ БЕЛАРУСЬ**

**Учреждение образования
«БЕЛОРУССКИЙ ГОСУДАРСТВЕННЫЙ
АГРАРНЫЙ ТЕХНИЧЕСКИЙ УНИВЕРСИТЕТ»**

Кафедра энергетики

ТЕХНИЧЕСКАЯ ТЕРМОДИНАМИКА

*Методические указания к практическим занятиям
для студентов специальности 1–74 06 05 02
«Энергетическое обеспечение сельского хозяйства
(теплоэнергетика)», специализации 1–74 06 05 02 01
«Теплоснабжение сельского хозяйства»*

Минск 2009

УДК 621.1.016.7 (076)
ББК 31.31
Т 34

Рекомендовано научно-методическим советом агроэнергетического факультета БГАТУ.

Протокол № 11 от 18 июня 2008 г.

Составители:

канд. техн. наук, доц. *А. Г. Цубанов*;
канд. техн. наук, доц. *А. Л. Сияков*;
ст. преподаватель *И. А. Цубанов*

Рецензент:

канд. техн. наук, доц. *В.А. Пашинский*

Т 34 **Техническая** термодинамика : методические указания к практическим занятиям / сост.: А. Г. Цубанов [и др.]. – Минск : БГАТУ, 2009. – 96 с.

ISBN 978-985-519-086-9.

УДК 621.1.016.7 (076)
ББК 31.31

ISBN 978-985-519-086-9

© БГАТУ, 2009

СОДЕРЖАНИЕ

Предисловие	4
1. Первый закон термодинамики	5
2. Второй закон термодинамики	10
3. Идеальные газы и газовые смеси	14
4. Теплоемкость газов и газовых смесей	19
5. Термодинамические процессы	24
6. Влажный воздух	30
7. Рабочий процесс поршневого компрессора	38
8. Прямые циклы тепловых машин.	
Циклы поршневых двигателей внутреннего сгорания	44
9. Циклы газотурбинных установок	52
10. Вода и водяной пар	55
11. Циклы паросиловых установок	59
12. Циклы холодильных машин	65
13. Истечение и дросселирование газов и паров	72
Ответы к задачам	78
Литература	82
Приложения	83

ПРЕДИСЛОВИЕ

Методические указания предназначены для формирования у студентов практических навыков по выполнению термодинамических расчетов и анализа эффективности работы тепловых машин и установок.

Они содержат краткие теоретические сведения, решения типовых задач и условия задач по дисциплине «Техническая термодинамика», а также по разделу «Техническая термодинамика» дисциплин «Теплотехника» и «Техническая термодинамика и теплопередача». Все задачи снабжены ответами. Приложения включают необходимый справочный материал.

В методических указаниях использованы обозначения физических величин согласно рекомендуемому списку (приложение А).

Для управляемой самостоятельной работы студентов составлены многовариантные контрольные задачи.

Разделы методических указаний соответствуют темам практических занятий, приведенным в рабочих программах дисциплин. Количество и содержание задач определены на основе опыта преподавания дисциплин на кафедре энергетики Белорусского государственного аграрного технического университета.

Отдельные задачи имеют свои прототипы в ранее опубликованных задачниках, указанных в списке рекомендуемой литературы.

При решении задач необходимо:

- записать условие задачи и исходные данные;
- решение задач сопровождать кратким пояснительным текстом с обоснованием выбора расчетных уравнений;
- для используемых формул дать расшифровку буквенных обозначений в той последовательности, в которой они приведены в уравнении;
- вычисления производить в единицах СИ; после числового значения размерной величины как результата расчета обязательно проставлять обозначение единицы величины (без заключения его в скобки);
- при записи результатов расчета использовать правила округления чисел.

Исходные данные к контрольным задачам выбираются в зависимости от последней и предпоследней цифр шифра (номера зачетной книжки или номера варианта).

Контрольные задачи выполняются рукописным или машинописным способами на листах формата А4 или в школьных тетрадях с отведенными полями. При рукописном способе выполнения используют чернила или пасту одного цвета (синего, фиолетового или черного). Высота букв составляет не менее 2,5 мм, а расстояние между строками – 7–10 мм.

Описки и неточности допускается исправлять аккуратно подчисткой или закрашиванием белой краской с написанием на подчищенном (закрашенном) месте исправленного текста.

Титульный лист оформляют в соответствии с приложением Б.

1. ПЕРВЫЙ ЗАКОН ТЕРМОДИНАМИКИ

Первый закон термодинамики представляет закон сохранения и превращения энергии в применении к тепловым процессам.

Уравнение первого закона термодинамики записывают:

– для вещества массой равной 1 кг

$$q = u_2 - u_1 + l; \quad (1.1)$$

– для m кг вещества

$$Q = U_2 - U_1 + L, \quad (1.2)$$

где индексы «1» и «2» означают начальное и конечное состояние системы.

Количество теплоты

$$Q = cm(T_2 - T_1) = cm(t_2 - t_1). \quad (1.3)$$

При подводе теплоты количество теплоты записывают со знаком «плюс», при отводе – со знаком «минус».

Изменение внутренней энергии

$$U_2 - U_1 = c_v m (T_2 - T_1). \quad (1.4)$$

При этом удельная изохорная теплоемкость

$$c_v = \frac{C_{mv}}{\mu}, \quad (1.6)$$

где C_{mv} – молярная изохорная теплоемкость.

Молярная масса μ , кг/моль,

$$\mu = 10^{-3} M_r, \quad (1.6)$$

где M_r – относительная молекулярная масса.

Данные о некоторых газах и их молярных теплоемкостях приведены в приложениях В и Г.

При совершении работы системой (газом) ее значение записывают со знаком «плюс», при затрате работы извне на сжатие системы (газа) – со знаком «минус».

Для расчета удельных величин используют следующие зависимости:

$$q = c(T_2 - T_1) = c(t_2 - t_1); \quad (1.7)$$

$$u_2 - u_1 = c_v(T_2 - T_1) = c_v(t_2 - t_1). \quad (1.8)$$

В тепловых расчетах применяют понятие КПД, под которым подразумевают отношение полезно использованной энергии ко всей затраченной:

$$\eta = \frac{E_n}{E_3}, \quad (1.9)$$

где E_n – полезно использованная энергия; E_3 – затраченная энергия.

Во многих случаях затраченной энергией является теплота, выделяющаяся при сгорании топлива:

$$Q = Q_n^p m_T, \quad (1.10)$$

где Q_n^p – теплота сгорания топлива, кДж/кг; m_T – масса использованного топлива.

Теплофизические свойства некоторых материалов и веществ даны в приложении Д.

Решения типовых задач

Т.1.1. В котельной электрической станции сожжено 62 т топлива, имеющего теплоту сгорания 30 МДж/кг. Время работы – 5 ч, КПД электростанции – 35 %.

Определить среднюю электрическую мощность электростанции за указанный промежуток времени.

Решение. Исходные данные: масса топлива $m_T = 62000$ кг; теплота сгорания $Q_n^p = 30$ МДж/кг; время работы $\tau = 18000$ с; КПД $\eta = 0,35$.

Затраченную энергию определим как количество теплоты при сгорании топлива по формуле (1.10):

$$E_3 = 30 \times 62000 = 1860000 \text{ МДж.}$$

Полезной является электрическая энергия, ее расчет производим по уравнению (1.9):

$$E_n = 1\,860\,000 \times 0,35 = 651\,000 \text{ МДж.}$$

Среднюю электрическую мощность находим по выражению:

$$N = N = E_n / \tau = 651\,000 / 18\,000 = 36,2 \text{ МВт.}$$

Т.1.2. К воздуху массой 2 кг подведено 260 кДж теплоты, на сжатие его затрачена работа, равная 150 кДж.

Определить конечную температуру воздуха, если его начальная температура $t_1 = 10^\circ\text{C}$.

Решение. Исходные данные: масса $m = 2$ кг, теплота $Q = 260$ кДж, работа $L = -150$ кДж, температура $t_1 = 10^\circ\text{C}$. При записи количеств теплоты и работы учтено правило знаков.

Изменение внутренней энергии воздуха в данном процессе по уравнению (1.2):

$$U_2 - U_1 = Q - L = 260 - (-150) = 410 \text{ кДж.}$$

Для воздуха выписываем из приложений В и Г:

– относительную молекулярную массу $M_r = 28,96$;

– газовую постоянную $R = 287$ Дж/(кг·К);

– молярную изохорную теплоемкость (как для двухатомного газа):

$$C_{mv} = 20,8 \text{ Дж/(моль·К).}$$

Удельная изохорная теплоемкость воздуха по уравнению (1.5):

$$c_v = \frac{20,8}{28,96 \times 10^{-3}} = 718 \text{ Дж/(кг·К)} = 0,718 \text{ кДж/(кг·К).}$$

Конечная температура воздуха по формуле (1.4):

$$t_2 = 10 + \frac{410}{0,718 \times 2} = 295,5^\circ\text{C.}$$

Задачи

1.1. Двигатель передвижной электростанции расходует в час 13 кг топлива с теплотой сгорания 43 МДж/кг. Эффективный КПД двигателя – 30 %, КПД электрогенератора – 85 %.

Какое количество электроэнергии выработано за 5 часов работы?

1.2. Для определения мощности двигателя при испытании используются охлаждаемые водой тормоза. При этом работа, произведенная двигателем, расходуется на преодоление трения и превращается в теплоту. Около 75 % этой теплоты отводится водой.

Определить массовый расход воды, если мощность двигателя составляет 70 кВт. При расчете принять начальную температуру воды равной 10°C , а конечную – равной допустимой температуре воды 80°C .

1.3. Автомобиль движется со скоростью 70 км/ч, при этом работа двигателя характеризуется средним значением мощности в 25 кВт.

Определить расход топлива на 100 км пути, если КПД силовой установки составляет 25 %, а теплота сгорания топлива равна 43 МДж/кг.

1.4. Определить время нагрева 500 л воды от 10°C до температуры кипения при атмосферном давлении. Мощность электронагревателя 25 кВт.

Теплопотери принять в размере 10 % от теплоты, необходимой для нагрева воды.

1.5. Мощность тепловой электрической станции составляет 100 МВт.

Определить расход топлива, если КПД электростанции равен 35 %, а теплота сгорания топлива равна 30 МДж/кг.

1.6. Определить эффективный КПД автомобильного двигателя мощностью 73,6 кВт, если расход бензина равен 22 кг/ч при теплоте сгорания 40 МДж/кг.

1.7. При испытании теплового двигателя было установлено, что удельный расход топлива равен 64 г/МДж (из расчета на 1 МДж произведенной механической энергии).

Определить эффективный КПД двигателя, если теплота сгорания топлива равна 42 000 кДж/кг.

1.8. В сосуд, содержащий 0,5 л воды при температуре 20°C помещен кипятильник мощностью 800 Вт. Определить время нагрева воды до 100°C .

При расчете принять теплопотери в размере 20 % от теплоты нагрева воды.

1.9. В машине происходит нагрев ее стальных деталей массой 300 кг на 40°C за 20 мин.

Определить потери мощности машины.

1.10. В топке водогрейного котла сжигается 96 кг/ч торфа с теплотой сгорания 10 100 кДж/кг.

Определить КПД котла, если в нем подогревается вода от 70 до 115°C . Расход воды – 4 т/ч.

1.11. От 7 кг азота отведено 2 500 кДж теплоты, при этом температура газа увеличилась от 100 до 250°C .

Определить работу, характерную для рассматриваемого термодинамического процесса, и установить, как изменился объем газа, если его давление возросло в три раза.

Изобразите схематично процесс в диаграмме pV .

1.12. Кислород массой 12 кг находится в цилиндре. К кислороду подведена теплота в количестве 250 кДж и в процессе расширения им совершена работа, равная 360 кДж.

Определить изменение температуры газа в данном процессе, считая теплоемкость постоянной. Представить схематично процесс в диаграмме pV .

1.13. В процессе сжатия водорода от него отводится теплота в 200 кДж/кг, а его температура увеличивается на 95 °С.

Определить удельную работу в процессе, приняв теплоемкость постоянной. Привести график процесса в диаграмме pV .

1.14. В цилиндре двигателя происходит сжатие воздуха, при этом затрачивается работа в 380 кДж/кг и отводится теплота в размере 30 кДж/кг.

Определить температуру воздуха в конце процесса сжатия, если начальная температура составляет 30 °С. Изобразить схематично процесс в диаграмме pV .

1.15. На четыре стальных стержня опирается груз массой 1800 кг. Длина каждого стержня – 1,2 м; его масса – 50 кг; термический коэффициент линейного расширения стержня – $1,1 \cdot 10^{-5} \text{ К}^{-1}$.

Рассчитать теплоту, подведенную к стержням, при их нагреве на 100 °С. Нагревом опор стержней и груза пренебречь.

2. ВТОРОЙ ЗАКОН ТЕРМОДИНАМИКИ

Рассмотрение и обобщение опытных фактов условий протекания тепловых процессов привели к необходимости введения особой функции состояния – *энтропии*. Используя эту функцию, были записаны уравнения второго закона термодинамики.

В обратимом изотермическом процессе

$$S_2 - S_1 = \frac{Q}{T}, \quad (2.1)$$

где $S_2 - S_1$ – изменение энтропии в процессе, кДж/К; Q – количество теплоты в данном процессе, кДж; T – термодинамическая температура, К.

Расчет выполняется с использованием правила знаков при количестве теплоты (см. раздел 1).

В обратимом процессе, не являющемся изотермическим,

$$S_2 - S_1 = mc \ln \frac{T_2}{T_1}, \quad (2.2)$$

где m – масса вещества, кг; c – удельная теплоемкость вещества, кДж/(кг·К); T_2 и T_1 – конечная и начальная термодинамические температуры, К.

Уравнение (2.2) получено, считая удельную теплоемкость постоянной, не зависящей от температуры вещества.

При расчете энтропии (изменения энтропии) термодинамической системы пользуются законом аддитивности. Согласно этому закону значение величины, соответствующее целому объекту, равно сумме значений величин, соответствующих его частям, независимо от того, каким образом был разбит объект на части.

При выполнении термодинамических расчетов не представляет практической значимости абсолютное значение энтропии системы в том или ином состоянии. Поэтому расчет энтропии производят от условного нуля, за который принимают ее значение в произвольно принятом состоянии.

Удельную энтропию идеального газа s , кДж/(кг·К) отсчитывают от состояния при нормальных условиях ($p_0 = 101,3 \text{ кПа}$, $t_0 = 0 \text{ °С}$):

$$s = c_p \ln \frac{T}{T_0} - R \ln \frac{p}{p_0}, \quad (2.3)$$

где c_p – удельная изобарная теплоемкость, кДж/(кг·К); R – удельная газовая постоянная, кДж/(кг·К).

Значения удельных газовых постоянных приведены в приложении В, удельные изобарные теплоемкости находят согласно формуле:

$$c_p = \frac{C_{mp}}{\mu}, \quad (2.4)$$

где C_{mp} – молярная изобарная теплоемкость, кДж/(моль·К).
Изменение удельной энтропии идеального газа

$$s_2 - s_1 = c_p \ln \frac{T_2}{T_1} - R \ln \frac{p_2}{p_1}. \quad (2.5)$$

Увеличение энтропии системы ΔS , кДж/К, сопровождается потерей ее работоспособности, кДж,

$$\Delta L = T_0 \Delta S, \quad (2.6)$$

где T_0 – термодинамическая температура окружающей среды.

Решения типовых задач

Т.2.1. Найти изменение энтропии водного льда массой 20 кг и температурой равной -10 °С в процессе его таяния при атмосферном давлении.

Удельная теплота плавления льда равна 345 кДж/кг.

Решение. Принимаем исходные данные: масса льда $m = 20$ кг; начальная температура льда $T_1 = 273,15 + (-10) = 263,15$ К; температура таяния льда при атмосферном давлении $T = 273,15$ К; конечная температура тающего льда $T_2 = 273,15 + 0 = 273,15$ К и теплота плавления $r = 345$ кДж/кг. По приложению Д находим значение теплоемкости льда $c = 2,3$ кДж/(кг·К).

В условиях задачи процесс таяния льда включает процессы подогрева льда до температуры таяния и собственно таяние льда. Первый из этих процессов является неизотермическим, а второй – изотермическим при температуре таяния льда.

Определяем:

– изменение энтропии льда в процессе его подогрева по формуле (2.2):

$$\Delta S_1 = 20 \times 2,3 \times \ln(273,15/263,15) = 1,72 \text{ кДж/К};$$

– количество теплоты, подводимой непосредственно для таяния льда,

$$Q = r m, \quad (2.6)$$

где r – удельная теплота плавления льда, кДж/кг; m – масса льда, кг;
 $Q = 345 \times 20 = 6900$ кДж;

– изменение энтропии в изотермическом процессе таяния льда по уравнению (2.1)

$$\Delta S_2 = 6900/273,15 = 25,26 \text{ кДж/К};$$

– изменение энтропии водного льда

$$\Delta S = \Delta S_1 + \Delta S_2 = 1,72 + 25,26 = 26,98 \text{ кДж/К}.$$

Т.2.2. Стальной шар массой 10 кг и температурой 500 °С погружается в воду массой 18 кг и температурой 15 °С. Определить изменение энтропии в процессе установления теплового равновесия в системе «шар–вода».

Решение. Исходные данные к расчету: масса шара $m_1 = 10$ кг; масса воды $m_2 = 18$ кг; их начальные температуры $t_1 = 500$ °С и $t_2 = 15$ °С. Соответственно находим: $T_1 = 773,15$ К и $T_2 = 288,15$ К.

Выписываем из приложения Д теплоемкости:

стали $c_1 = 0,5$ кДж/(кг·К) и воды $c_2 = 4,18$ кДж/(кг·К).

Из теплового баланса выражаем температуру теплового равновесия в системе «шар–вода»:

$$t_3 = \frac{c_1 m_1 t_1 + c_2 m_2 t_2}{c_1 m + c_2 m_2}. \quad (2.7)$$

Отсюда находим:

$$t_3 = \frac{0,5 \times 10 \times 500 + 4,18 \times 18 \times 15}{0,5 \times 10 + 4,18 \times 18} = 45,22 \text{ °С}.$$

Определим изменения энтропии шара и воды по уравнению (2.2):

$$\Delta S_1 = 10 \times 0,5 \times \ln(318,37/773,15) = -4,44 \text{ кДж/К};$$

$$\Delta S_2 = 18 \times 4,18 \times \ln(318,37/288,15) = 7,5 \text{ кДж/кг}.$$

При этом температура теплового равновесия $T_3 = 318,37$ К использована в качестве конечной температуры при охлаждении шара и нагреве воды.

Изменение энтропии в системе «шар–вода» согласно закону аддитивности:

$$\Delta S = \Delta S_1 + \Delta S_2 = -4,44 + 7,5 = 3,06 \text{ кДж/кг}.$$

Задачи

2.1. По условиям типовой задачи Т.2.1 определить изменение энтропии в расширенной системе «окружающая среда–водный лед». Окружающую среду рассматриваем как теплоисточник с постоянной температурой, равной 5 °С.

2.2. Рассчитать удельную энтропию кислорода при давлении 1 МПа и температуре 300 °С.

2.3. Воздух массой 10 кг давлением 0,12 МПа и температурой равной 25 °С сжимается до давления 0,8 МПа. При этом его температура увеличивается до 180 °С. Найти изменение энтропии воздуха.

2.4. Определить изменение энтропии кипящей воды в процессе парообразования 5 кг сухого насыщенного пара при атмосферном давлении.

Теплота парообразования составляет 2260 кДж/кг.

2.5. Найти изменение энтропии системы «теплоисточник–кипящая вода» в условиях задачи 2.4, приняв температуру теплоисточника постоянной и равной 150 °С.

2.6. Найти изменение энтропии при смешивании порций воды с разными температурами. Одна порция массой 10 кг и температурой 80 °С, а другая – массой 5 кг и температурой 20 °С.

2.7. Установить изменение энтропии системы, в которой происходит теплообмен между двумя телами до их перехода в состояние теплового равновесия между ними. Первое тело массой 20 кг, температурой 400 °С и теплоемкостью 0,5 кДж/(кг·К). Второе тело массой 50 кг, температурой 40 °С и теплоемкостью 0,9 кДж/(кг·К).

2.8. По данным задачи 2.7 определить потерю работоспособности системы с этими двумя телами, приняв температуру окружающей среды постоянной и равной 30 °С.

2.9. Вода нагревается от 70 до 115 °С в процессе передачи ей теплоты в количестве 20 МДж. Температура теплоисточника поддерживается постоянной и равной 200 °С. Рассчитать потерю работоспособности системы при температуре окружающей среды равной 20 °С.

3. ИДЕАЛЬНЫЕ ГАЗЫ И ГАЗОВЫЕ СМЕСИ

Идеальные газы характеризуются следующими уравнениями состояния:

$$pv = RT; \quad (3.1)$$

$$pV = mRT; \quad (3.2)$$

$$pV_m = R_m T, \quad (3.3)$$

где V_m – молярный объем, м³/моль; R_m – универсальная (молярная) газовая постоянная, Дж/(моль·К).

Универсальная газовая постоянная $R_m = 8,314$ Дж/(моль·К).

Удельная газовая постоянная, Дж/(кг·К):

$$R = \frac{8,314}{\mu}, \quad (3.4)$$

где μ – молярная масса, кг/моль, согласно уравнению (1.6).

Смеси идеальных газов подчиняются законам идеальных газов. Газ (компонент) в составе смеси сохраняет свои свойства и ведет себя так, как если бы он один занимал весь объем смеси. Каждый компонент находится под своим парциальным давлением.

Давление газовой смеси

$$P_{CM} = \sum_1^n P_i, \quad (3.5)$$

где P_i – парциальное давление компонента.

Состав газовой смеси может быть задан массовыми и объемными (молярными) долями.

Если массовая доля представляет собой отношение массы компонента к массе газовой смеси, то объемная доля – отношение парциального объема компонента к объему газовой смеси. Парциальный объем данного компонента приведен к температуре и давлению газовой смеси.

Для газовой смеси:

$$m_{CM} = \sum_1^n m_i, \quad (3.6)$$

где m_i – масса компонента;

$$V_{CM} = \sum_1^n V_i, \quad (3.7)$$

где V_i – парциальный (приведенный) объем компонента, м³.
Плотность газовой смеси

$$\rho_{CM} = \sum_1^n r_i \rho_i, \quad (3.8)$$

где r_i – объемная доля компонента; ρ_i – плотность компонента, кг/м³;

$$\rho_{CM} = \frac{1}{\sum_1^n \frac{g_i}{\rho_i}}, \quad (3.8a)$$

где g_i – массовая доля компонента.
Кажущаяся молярная масса смеси идеальных газов

$$\mu_{CM} = \sum_1^n r_i \mu_i, \quad (3.9)$$

где μ_i – молярная масса компонента;

$$\mu_{CM} = \frac{1}{\sum_1^n \frac{g_i}{\mu_i}}. \quad (3.9a)$$

Удельную газовую постоянную рассчитывают по формуле (3.4) с использованием кажущейся молярной массы или с учетом состава газовой смеси по уравнению:

$$R_{CM} = \sum_1^n g_i R_i. \quad (3.10)$$

Характеризуя газовую смесь, пользуются уравнениями состояния идеального газа.

Соотношение между массовыми и объемными долями устанавливает зависимость:

$$g_i = r_i \mu_i / \mu_{CM}. \quad (3.11)$$

Парциальное давление компонента

$$P_i = r_i P_{CM}. \quad (3.12)$$

Молекулярные массы и удельные газовые постоянные некоторых газов приведены в приложении В.

Решение типовой задачи

Т.3.1. Компрессор нагнетает воздух в количестве 4 м³/мин при температуре 17 °С и давлении 100 кПа в резервуар объемом 10 м³. За какое время давление в резервуаре увеличится от 0,1 до 0,9 МПа? При расчете принять, что температура воздуха в резервуаре не изменяется и равна 17 °С.

Решение. Начальные параметры воздуха: давление $p_1 = 0,1$ МПа, температура $T_1 = 290,15$ К. Конечные параметры: давление $p_2 = 0,9$ МПа и температура $T_2 = 290,15$ К. Подача компрессора $Q_v = 4$ м³/мин определена при начальных параметрах воздуха. Объем резервуара $V = 10$ м³.

По приложению В принимаем для воздуха удельную газовую постоянную $R = 287$ кДж/(кг·К).

В условиях задачи резервуар заполняется воздухом, при этом увеличивается масса воздуха в резервуаре по мере работы компрессора.

Масса воздуха в резервуаре по формуле (3.2):

– к началу работы компрессора

$$m_1 = \frac{0,1 \times 10^6 \times 10}{287 \times 290,15} = 12 \text{ кг};$$

– после достижения конечного давления

$$m_2 = \frac{0,9 \times 10^6 \times 10}{287 \times 290,15} = 108,1 \text{ кг}.$$

Плотность воздуха при его начальных параметрах по зависимости (3.1):

$$\rho = \frac{1}{g} = \frac{P}{RT} = \frac{100 \times 10^3}{287 \times 290,15} = 1,2 \text{ кг/м}^3.$$

По условию задачи задана объемная подача компрессора, требуется определить его массовую подачу:

$$Q_m = p Q_v, 1,2 \times 4 = 4,8 \text{ кг/мин}.$$

Время работы компрессора при нагнетании воздуха в резервуар:

$$\tau = \frac{m_2 - m_1}{Q_m} = \frac{108,1 - 12}{4,8} = 20 \text{ мин.}$$

Задачи

- 3.1. Найти плотность углекислого газа при нормальных условиях.
- 3.2. Какой объем занимают 100 кг азота при температуре 70 °С и давлении 0,2 МПа?
- 3.3. Определить массу воздуха в аудитории площадью 120 м² и высотой 3,5 м. Температура воздуха в аудитории равна 18 °С, а барометрическое давление составляет 100 кПа.
- 3.4. Определить число атомов в молекуле кислорода, если в объеме, равном 10 л, при температуре 30 °С и давлении 0,5 МПа находится 63,5 г кислорода.
- 3.5. В резервуаре вместимостью 8 м³ содержится воздух при давлении 10 МПа и температуре 27 °С. После израсходования части воздуха давление понизилось до 5 МПа, а температура – до 20 °С. Определить массу израсходованного воздуха.
- 3.6. Компрессор нагнетает газ в резервуар объемом 10 м³. При этом давление в резервуаре увеличивается с 0,2 до 0,7 МПа при постоянной температуре газа 20 °С. Определить время работы компрессора, если его подача 180 м³/ч. Подача определена при нормальных условиях.
- 3.7. Компрессор нагнетает воздух в резервуар объемом 7 м³, при этом давление в резервуаре увеличивается от 0,1 до 0,6 МПа. Температура также растет от 15 до 50 °С. Определить время работы компрессора, если его подача составляет 30 м³/ч, будучи отнесенной к нормальным условиям.
- 3.8. Для определения теплоты сгорания топлива используют calorиметрическую бомбу объемом 0,4 л, заполняемую кислородом. В процессе заряда достигается давление кислорода в бомбе, равное 2,2 МПа. Кислород поступает из баллона объемом 6 л. На сколько зарядов хватит кислорода в баллоне, если его начальное давление 12 МПа? При расчете принять температуру кислорода равной 20 °С.
- 3.9. Пуск стационарного двигателя осуществляется сжатым воздухом из баллона емкостью 40 л. На один запуск расходуется объем воздуха при нормальных условиях равный 0,1 м³.
- Определить число запусков двигателя, если давление в баллоне снижается от 2,5 до 1 МПа. Температуру воздуха принять равной 10 °С.

3.10. Сварочной горелкой расходуется из баллона за 1 ч кислород объемом, равным 1320 л при давлении 150 кПа и температуре 20 °С. Найти время, за которое давление кислорода в баллоне объемом 60 л уменьшится от 15 до 0,3 МПа. Температура кислорода в баллоне равна 30 °С.

3.11. Определить необходимый объем азота, наполненного водородом, если его подъемная сила на высоте 7 км равна 39200 Н. Состояние воздуха на указанной высоте характеризуется параметрами: $p = 41 \text{ кПа}$, $t = -30 \text{ °С}$.

3.12. Парциальное давление водяного пара в воздухе комнаты составляет 1,5 кПа.

Определить массу водяного пара в составе воздуха температурой 20 °С, если объем комнаты равен 90 м³.

3.13. Определить диаметр воздуховода для подачи воздуха температурой 17 °С и давлением 100 кПа. Скорость воздуха в воздуховоде – 10 м/с, его массовый расход – 10 000 кг/ч.

3.14. Атмосферный воздух имеет следующий состав: объемная доля кислорода – 0,21, объемная доля азота – 0,79.

Определить массовый состав, удельную газовую постоянную воздуха и парциальные давления кислорода и азота, если атмосферное давление равно 100 кПа.

3.15. Определить плотность газообразного топлива при нормальных условиях, если его объемный состав: $\text{CH}_4 = 84,5 \%$; $\text{C}_2\text{H}_6 = 3,8 \%$; $\text{C}_3\text{H}_8 = 1,9 \%$; $\text{C}_4\text{H}_{10} = 1,2 \%$; $\text{N}_2 = 7,8 \%$; $\text{O}_2 = 0,8 \%$.

3.16. Найти плотность влажного воздуха при температуре 70 °С и давлении 100 кПа, если парциальное давление водяного пара 20 кПа. Сравнить с плотностью сухого воздуха при тех же параметрах воздуха.

3.17. Определить массовый состав газовой смеси, состоящей из углекислого газа и азота. Парциальное давление углекислого газа – 120 кПа, а давление газовой смеси 300 кПа.

3.18. Сосуд заполнен смесью, состоящей из 10 кг кислорода и 15 кг азота при давлении 0,3 МПа и температуре 27 °С.

Определить объем сосуда.

4. ТЕПЛОЕМКОСТЬ ГАЗОВ И ГАЗОВЫХ СМЕСЕЙ

Теплоемкость определяет количество теплоты, которое необходимо подвести к телу (к системе), чтобы повысить температуру на 1 °С (на 1 К).

Теплоемкость относят к единице массы, к единице объема и к единице количества вещества. Соответственно различают удельную, объемную и молярную теплоемкости (обозначения c , c' и C_m).

Между указанными теплоемкостями существует функциональная связь:

$$c = \frac{c'}{\rho} = \frac{C_m}{\mu}. \quad (4.1)$$

Объемную теплоемкость газа принято относить к объему при нормальных условиях. Поэтому при ее расчете используют плотность газа при нормальных условиях.

Теплоемкость газа зависит от характера процесса подвода (отвода) теплоты, от природы газа, его температуры и давления.

Особое значение в тепловых расчетах имеют теплоемкости газа в процессах при постоянном давлении и постоянном объеме – соответственно изобарная и изохорная теплоемкости. Их связывают между собой уравнения Майера:

$$c_p - c_v = R, \quad (4.2)$$

где c_p и c_v – удельные изобарная и изохорная теплоемкости;

$$C_{mp} - C_{mv} = R_m, \quad (4.2a)$$

где C_{mp} и C_{mv} – молярные изобарная и изохорная теплоемкости.

Отношение этих теплоемкостей называют показателем адиабаты:

$$k = \frac{c_p}{c_v}. \quad (4.3)$$

Для приближенных расчетов при невысоких температурах можно принимать постоянные значения молярных теплоемкостей и показателей адиабаты (приложение Г). В этом случае считают теплоемкость газа постоянной.

С учетом зависимости теплоемкости от температуры различают истинные и средние теплоемкости. Истинную теплоемкость опреде-

ляют при малом (бесконечно малом) изменении температуры, а среднюю – при конечном (заданном) интервале температур.

Среднюю теплоемкость в интервале температур от значения t_1 до значения t_2 принято рассчитывать как

$$C_{t_1}^{t_2} = \frac{C_2 t_2 - C_1 t_1}{t_2 - t_1}, \quad (4.4)$$

где C_2 и C_1 – средние теплоемкости в интервалах температур от 0 °С до t_2 и от 0 °С до t_1 .

Значения средних удельных изобарных теплоемкостей распространенных газов приведены в приложении Е.

Теплоемкости смеси газов:

– удельная

$$C_{CM} = \sum_i^n (g_i C_i), \quad (4.5)$$

где C_i – удельная теплоемкость компонента;

– объемная

$$C'_{CM} = \sum_i^n (r_i C'_i), \quad (4.6)$$

где C'_i – объемная теплоемкость компонента.

Решения типовых задач

Т.4.1. В сосуде 1 объемом 50 л содержится азот при давлении 2 МПа и температуре 200 °С, а в сосуде 2 объемом 200 л – углекислый газ при давлении 0,5 МПа и температуре 600 °С. Найти давление и температуру, которые установятся после соединения сосудов в адиабатных условиях. Расчет выполнить при постоянной теплоемкости.

Решение. Исходные данные: $V_1 = 0,05 \text{ м}^3$; $p_1 = 2 \text{ МПа}$; $T_1 = 473 \text{ К}$; $V_2 = 0,2 \text{ м}^3$; $p_2 = 0,5 \text{ МПа}$; $T_2 = 873 \text{ К}$.

Выписываем из приложений В и Г необходимые данные:

– для азота

$M_r = 28,01$; $C_{mv} = 20,8 \text{ Дж}/(\text{моль} \cdot \text{К})$; $R = 296,8 \text{ Дж}/(\text{кг} \cdot \text{К})$;

– для углекислого газа

$M_r = 44$; $C_{mv} = 29,1 \text{ Дж}/(\text{моль} \cdot \text{К})$; $R = 189 \text{ Дж}/(\text{кг} \cdot \text{К})$.

При смешивании газов в заданных условиях остается постоянной их суммарная внутренняя энергия. Исходя из принципа сохранения внутренней энергии, находим температуру образовавшейся газовой смеси по уравнению аналогичному формуле (2.7). При этом используем удельные изохорные теплоемкости газов, так как изменение внутренней энергии определяется значениями этих теплоемкостей.

Рассчитываем удельные изохорные теплоемкости по уравнению (4.1):

– для азота $C_{v1} = 20,8 / (28,01 \times 10^{-3}) = 743 \text{ Дж}/(\text{кг}\cdot\text{К})$;

– для углекислого газа $C_{v2} = 29,1 / (44 \times 10^{-3}) = 661 \text{ Дж}/(\text{кг}\cdot\text{К})$.

Определяем массы компонентов по формуле (3.2):

$$m_1 = \frac{2 \times 10^6 \times 0,05}{296,8 \times 473} = 0,712 \text{ кг};$$

$$m_2 = \frac{0,5 \times 10^6 \times 0,2}{189 \times 873} = 0,606 \text{ кг}.$$

Масса газовой смеси

$$m_{\text{см}} = 0,712 + 0,606 = 1,32 \text{ кг}.$$

Температуру газовой смеси после установлении теплового равновесия найдем по уравнению (2.7) с учетом вышесказанного:

$$T_3 = \frac{743 \times 0,712 \times 473 + 661 \times 0,606 \times 873}{743 \times 0,712 + 661 \times 0,606} = 645 \text{ К}.$$

Массовые доли компонентов:

$$g_1 = 0,712 / 1,32 = 0,54; g_2 = 0,606 / 1,32 = 0,46.$$

Удельная газовая постоянная смеси по выражению (3.10):

$$R_{\text{см}} = 0,54 \times 296,8 + 0,46 \times 189 = 247 \text{ Дж}/(\text{кг}\cdot\text{К}).$$

Суммарный объем газов $V_{\text{см}} = 0,05 + 0,2 = 0,25 \text{ м}^3$.

Давление газовой смеси по формуле (3.2):

$$p_{\text{см}} = \frac{1,32 \times 247 \times 645}{0,25} = 0,84 \times 10^6 \text{ Па} = 0,84 \text{ МПа}.$$

Т.4.2. Определить среднюю удельную изохорную теплоемкость углекислого газа в интервале температур от 100 до 300 °С.

Решение. Выписываем для углекислого газа (CO_2):

– из приложения В удельную газовую постоянную

$$R = 189 \text{ Дж}/(\text{кг}\cdot\text{К});$$

– из приложения Е средние удельные изобарные теплоемкости в интервалах температур от 0 до 100 °С и от 0 до 300 °С:

$$c_p|_0^{100} = 0,8658 \text{ кДж}/(\text{кг}\cdot\text{К}); c_p|_0^{300} = 0,9487 \text{ кДж}/(\text{кг}\cdot\text{К}).$$

Находим по уравнению (4.2) средние удельные изохорные теплоемкости в указанных интервалах температур:

$$c_g|_0^{100} = 0,8658 - 0,189 = 0,677 \text{ кДж}/(\text{кг}\cdot\text{К});$$

$$c_g|_0^{300} = 0,9487 - 0,189 = 0,76 \text{ кДж}/(\text{кг}\cdot\text{К}).$$

Определяем по выражению (4.4) среднюю удельную изохорную теплоемкость углекислого газа в интервале температур от 100 до 300 °С:

$$c_g|_{100}^{300} = \frac{0,76 \times 300 - 0,677 \times 100}{300 - 100} = 0,801 \text{ кДж}/(\text{кг}\cdot\text{К}).$$

Задачи

4.1. Найти удельную и объемную теплоемкости воздуха в процессе при постоянном давлении, считая теплоемкость постоянной. Плотность воздуха при нормальных условиях $\rho = 1,29 \text{ кг}/\text{м}^3$.

4.2. Вычислить изохорную и изобарную объемные теплоемкости кислорода, отнесенные к нормальным условиям. Теплоемкости считать постоянными.

4.3. Два разделенных сосуда содержат разные газы: в первом из них объемом 100 л – азот при давлении 0,3 МПа и температуре 10 °С, а во втором объемом 50 л – кислород при давлении 2 МПа и температуре 100 °С. Определить давление и температуру смеси, образовавшейся после соединения сосудов в условиях адиабатного смешивания газов. Расчет выполнить, считая теплоемкость постоянной.

4.4. Сосуд разделен перегородкой на две части. В первой из них объемом 2 м³ находится воздух при давлении 1,5 МПа и температуре 50 °С, а во второй объемом 0,5 м³ – кислород при давлении 0,2 МПа и температуре 200 °С. Определить температуру и давление смеси газов, образовавшейся после удаления перегородки. Теплообменом с окружающей средой пренебречь. Расчет выполнить при постоянной теплоемкости газов.

4.5. Определить средние удельные изобарную и изохорную теплоемкости воздуха в интервале температур от 100 до 1000 °С, используя табличные данные о средних теплоемкостях. Сравнить полученные значения с результатами расчета в задаче 4.1.

4.6. Какое количество теплоты подводится к 50 кг газовой смеси при ее нагреве в изобарном процессе от 300 до 700 °С. Объемный

состав газовой смеси: $r_{N_2} = 0,7$, $r_{CO_2} = 0,2$ и $r_{O_2} = 0,1$. Расчет выполнить с учетом зависимости теплоемкости от температуры.

Контрольная задача 1

Газообразные продукты сгорания топлива охлаждаются в изобарном процессе от температуры t_1 до температуры t_2 . Состав газов задан в объемных долях: r_{N_2} , r_{CO_2} и r_{H_2O} .

Найти количество теплоты, отведенное от продуктов сгорания объемом 1 м^3 . Объем определен при нормальных условиях.

Исходные данные принять по таблице 4.1 в зависимости от шифра (номера варианта).

Таблица 4.1 – Исходные данные к контрольной задаче 1

Последняя цифра шифра	Объемный состав, %			Предпоследняя цифра шифра	Температуры	
	r_{CO_2}	r_{N_2}	r_{H_2O}		$t_1, \text{ }^\circ\text{C}$	$t_2, \text{ }^\circ\text{C}$
1	17	72	11	1	800	200
2	25	67	8	2	700	300
3	19	75	6	3	1 500	400
4	15	64	21	4	1400	500
5	16	70	14	5	800	600
6	14	57	29	6	1 200	200
7	14	73	13	7	1 100	300
8	10	70	20	8	1 000	400
9	14	79	7	9	900	500
0	11	73	16	0	1300	600

5. ТЕРМОДИНАМИЧЕСКИЕ ПРОЦЕССЫ

При расчете термодинамических процессов используют уравнения термодинамических процессов, состояния идеальных газов и законов термодинамики.

Политропные процессы характеризуются постоянной теплоемкостью газа. Основные термодинамические процессы (изохорный, изобарный, изотермический и адиабатный) являются частными случаями политропного процесса, если они протекают при постоянной теплоемкости газа.

Уравнение политропного процесса

$$pv^n = const, \quad (5.1)$$

где n – показатель политропы.

Удельная теплоемкость газа в политропном процессе

$$c_n = c_v \frac{n-k}{n-1}. \quad (5.2)$$

Каждому процессу соответствуют определенные значения показателя политропы и удельной теплоемкости:

- изохорный $n = \pm \infty$, $c_n = c_v$;
- изобарный $n = 0$, $c_n = c_p$;
- изотермический $n = 1$, $c_n = \pm \infty$;
- адиабатный $n = k$, $c_n = 0$.

Изменение состояния характеризуется объединенным газовым законом:

$$\frac{pv}{T} = const. \quad (5.3)$$

Соотношения между параметрами состояния идеального газа:

$$\frac{p_2}{p_1} = \left(\frac{v_1}{v_2} \right)^n; \quad \frac{T_2}{T_1} = \left(\frac{v_1}{v_2} \right)^{n-1}; \quad \frac{T_2}{T_1} = \left(\frac{p_2}{p_1} \right)^{\frac{n-1}{n}}. \quad (5.4)$$

Изменение внутренней энергии рассчитывают по формулам (1.4) и (1.8).

Удельная работа:

- в политропном процессе с показателем политропы n :

$$l_n = \frac{1}{n-1}(p_1 v_1 - p_2 v_2) = \frac{R}{n-1}(T_1 - T_2); \quad (5.5)$$

$$l_n = \frac{p_1 v_1}{n-1} \left[1 - \left(\frac{v_1}{v_2} \right)^{n-1} \right]; \quad (5.6)$$

$$l_n = \frac{p_1 v_1}{n-1} \left[1 - \left(\frac{p_2}{p_1} \right)^{\frac{n-1}{n}} \right]. \quad (5.7)$$

– в изотермическом процессе:

$$l_T = RT \ln \frac{v_2}{v_1} = RT \ln \frac{p_1}{p_2}; \quad (5.8)$$

$$l_T = p_1 v_1 \ln \frac{v_2}{v_1} = p_2 v_2 \ln \frac{v_2}{v_1}. \quad (5.8a)$$

Удельная теплота

$$q_n = c_n(T_2 - T_1) = c_n(t_2 - t_1). \quad (5.9)$$

Энергетические особенности политропных процессов:

- изохорный процесс $q_v = u_2 - u_1; l_v = 0$;
- изобарный процесс $q_p = h_2 - h_1$, где h_2 и h_1 – удельные энтальпии;
- изотермический процесс $q_T = l_T, \Delta u_T = 0$;
- адиабатный процесс $q_{ад} = 0, l_{ад} = u_1 - u_2$.

Решение типовой задачи

Т.5.1. В закрытом сосуде объемом $0,8 \text{ м}^3$ содержится углекислый газ при $P_1 = 2,2 \text{ МПа}$ и $t_1 = 100 \text{ }^\circ\text{C}$. Газу сообщается теплота в количестве 4600 кДж .

Определить температуру и давление в конце процесса. Расчет выполнить при постоянной и переменной теплоемкостях.

Решение. Процесс является изохорным.

Выписываем для углекислого газа (CO_2) его характеристики из приложений В и Г:

- молекулярная масса $M_r = 44$;
- газовая постоянная $R = 189 \text{ Дж}/(\text{кг}\cdot\text{К})$;

– молярная изохорная теплоемкость $C_{mv} = 29,1 \text{ Дж}/(\text{моль}\cdot\text{К})$.

Определяем молярную массу по формуле (1.6):

$$\mu = 10^{-3} \times 44 = 0,044 \text{ кг}/\text{моль}.$$

Выполним расчет при постоянной теплоемкости.

Удельная изохорная теплоемкость по зависимости (1.5)

$$c_g = \frac{29,1}{0,044} = 660 \text{ Дж}/(\text{кг}\cdot\text{К}) = 0,66 \text{ кДж}/(\text{кг}\cdot\text{К}).$$

Масса углекислого газа в сосуде по уравнению (3.2)

$$m = \frac{2,2 \times 10^6 \times 0,8}{189 \times (100 + 273,15)} = 24,96 \text{ кг}.$$

Используя формулу (1.3), находим конечную температуру:

$$t_2 = t_1 + \frac{Q}{c_g m} = 100 + \frac{4600}{0,66 \times 24,96} = 379 \text{ }^\circ\text{C}.$$

Исходя из соотношения давлений и температур в изохорном процессе, определяем конечное давление углекислого газа:

$$p_2 = p_1 \frac{T_2}{T_1} = 2,2 \times \frac{379 + 273,15}{100 + 273,15} = 3,84 \text{ МПа}.$$

Выполним расчет при переменной теплоемкости, используя данные о средних теплоемкостях (приложение Е).

Учитывая более высокие (по сравнению с постоянной теплоемкостью) значения средней удельной изохорной теплоемкости углекислого газа, принимаем предварительно конечную температуру углекислого газа ниже рассчитанной выше: $t_2 = 330 \text{ }^\circ\text{C}$.

Выписываем значения средних удельных изобарных теплоемкостей из приложения Е:

$$c_p \Big|_0^{100} = 0,8658 \text{ кДж}/(\text{кг}\cdot\text{К}); \quad c_p \Big|_0^{300} = 0,9487 \text{ кДж}/(\text{кг}\cdot\text{К});$$

$$c_p \Big|_0^{400} = 0,9826 \text{ кДж}/(\text{кг}\cdot\text{К}).$$

Находим средние удельные изохорные теплоемкости по уравнению (4.2):

$$c_g \Big|_0^{100} = 0,8658 - 0,189 = 0,677 \text{ кДж}/(\text{кг}\cdot\text{К});$$

$$c_g \Big|_0^{300} = 0,9487 - 0,189 = 0,76 \text{ кДж}/(\text{кг}\cdot\text{К});$$

$$c_g \Big|_0^{400} = 0,9826 - 0,189 = 0,7936 \text{ кДж}/(\text{кг}\cdot\text{К}).$$

Выполняем расчет средней теплоемкости в интервале температур от 0 до 330 °С, используя линейную интерполяцию:

$$c_{p,г}|_{100}^{330} = 0,76 + \frac{0,7936 - 0,76}{100} \times 30 = 0,77 \text{ кДж/(кг·К)}.$$

Средняя теплоемкость в процессе по формуле (4.2)

$$c_{p,г}|_{100}^{330} = \frac{0,77 \times 330 - 0,677 \times 100}{330 - 100} = 0,81 \text{ кДж/(кг·К)}.$$

Конечная температура газа в процессе

$$t_2 = 100 + \frac{4600}{0,81 \times 24,96} = 327,5 \text{ °С}.$$

Учитывая малое расхождение между рассчитанным значением и ранее принятым ($t_2 = 330 \text{ °С}$), не уточняем расчет теплоемкостей и принимаем $t_2 = 327,5 \text{ °С}$.

Конечное давление

$$P_2 = 2,2 \times \frac{327,5 + 273,15}{100 + 273,15} = 3,54 \text{ МПа}.$$

Очевидно, что расчет при условии постоянной теплоемкости дает приближенные значения температуры и давления в конце процесса.

Задачи

5.1. В газгольдере объемом 15 м³ находится метан при давлении 0,8 МПа и температуре 10 °С. Из-за солнечной радиации температура газа увеличилась до 25 °С.

Как изменилось давление метана в газгольдере? Какое количество теплоты израсходовано на нагрев газа?

5.2. В баллоне вместимостью 50 л находится воздух при давлении 1 МПа и температуре 27 °С. При охлаждении баллона от газа отведена теплота в количестве 20 кДж. Определить давление в баллоне после охлаждения.

5.3. В емкости объемом $V = 90$ л содержится воздух при температуре 30 °С и давлении 0,8 МПа. К воздуху подводится теплота в 500 кДж.

Считая теплоемкость переменной, определить конечную температуру и давление воздуха.

5.4. Определить мощность электрокалорифера для нагрева воздуха от $t_1 = -20 \text{ °С}$ до $t_2 = 20 \text{ °С}$, в процессе при постоянном давлении $p = 100 \text{ кПа}$. Объемный расход воздуха при его начальных параметрах равен 1800 м³/ч.

5.5. Какое количество кислорода необходимо взять, чтобы при изобарном расширении от 100 до 700 °С газ совершил работу в 250 кДж?

Какое количество теплоты должно быть при этом отведено или подведено? Расчет выполнить при постоянной и переменной теплоемкостях.

5.6. Воздух массой 2 кг сжимается при постоянной температуре 27 °С. Давление увеличивается в 5 раз.

Определить работу сжатия и теплоту, отведенную от воздуха. Представить процесс в диаграмме $p-v$.

5.7. При изотермическом сжатии 10 кг азота, начальные параметры которого $p_1 = 0,1 \text{ МПа}$ и $t_1 = 25 \text{ °С}$, затрачена работа в 1000 кДж.

Найти давление сжатого газа и количество отведенной теплоты.

5.8. Баллон объемом 40 л заполнен кислородом при давлении 14 МПа и температуре 20 °С. После открытия выпускного вентиля кислород вытекает в атмосферу в условиях отсутствия теплообмена с окружающей средой. Давление в баллоне после выпуска становится равным 7 МПа. Затем вентиль закрывается.

Определить температуру кислорода сразу после окончания его выпуска. Какая масса кислорода выпущена из баллона?

5.9. В цилиндре емкостью 0,2 л находится под поршнем-крышкой воздух при давлении 10 МПа и температуре 20 °С.

Определить скорость вылета поршня-крышки при его внезапном освобождении, если воздух расширяется в адиабатном процессе в 3 раза, прежде чем перестает действовать на поршень-крышку.

Какой будет температура воздуха в конце его расширения? При расчете принять массу поршня-крышки равной 1 кг.

5.10. Двухатомный газ в адиабатном процессе расширяется в 5 раз, а затем сжимается изотермически до первоначального объема. Во сколько раз изменится давление газа по сравнению с первоначальным значением?

Представить процессы в диаграммах $p-v$ и $T-s$.

5.11. Определить минимальную необходимую степень сжатия воздуха в адиабатном процессе для достижения им температуры, достаточной для самовоспламенения топлива. Температура самовоспламенения равна 650 °С. Начальная температура воздуха $t_1 = 7 \text{ °С}$.

5.12. Кислород расширяется в политропном процессе ($n = 1,2$). Начальные параметры $p_1 = 3 \text{ МПа}$ и $t_1 = 600 \text{ °С}$. Конечная температура $t_2 = 420 \text{ °С}$.

Найти удельную теплоту, удельную работу и удельную теплоемкость кислорода в данном процессе. Представить процесс в диаграммах $p-v$ и $T-s$.

5.13. При политропном сжатии водорода массой 0,5 кг давление повышается от 0,1 до 10 МПа, а температура – от 18 до 180 °С. Определить показатель политропы, работу и теплоту процесса. Представить процесс в диаграммах $p\nu$ и Ts .

5.14. Окись углерода расширяется политропно от начальных значений: объема 10 м^3 , давления 1,3 МПа и температуры 227 °С до давления 0,16 МПа. Увеличение объема происходит в 5 раз.

Определить показатель политропы, работу и теплоту процесса. Представить процесс в диаграммах $p\nu$ и Ts .

5.15. Воздух, начальная температура которого равна 17 °С, сжимается в адиабатном процессе до объема, составляющего 15 % от начального объема. После этого воздух расширяется при постоянном давлении до первоначального объема.

Изобразить процессы в диаграммах $p\nu$ и Ts , рассчитать удельную работу, совершенную воздухом в результате этих процессов.

5.16. Азот сжимается в адиабатном процессе до объема меньше начального в 5 раз, а затем расширяется изотермически до первоначального объема.

Определить удельную работу в данных процессах.

Представить процессы в диаграммах $p\nu$ и Ts . Начальную температуру принять равной 27 °С.

5.17. В цилиндре двигателя происходит сжатие воздуха, при этом затрачивается работа в 380 кДж и отводится теплота в размере 30 кДж.

Определить показатель политропы и изобразить процесс в диаграммах $p\nu$ и Ts .

5.18. К кислороду подведена теплота в количестве 250 кДж и в процессе расширения им совершена работа, равная 360 кДж.

Определить показатель политропы и изобразить процесс в диаграммах $p\nu$ и Ts .

5.19. Азот начальным объемом $0,5 \text{ м}^3$ расширяется в 5 раз от начального давления 1,2 МПа до давления 150 кПа. Найти показатель политропы, работу и теплоту в процессе.

Представить процесс в диаграммах $p\nu$ и Ts .

5.20. В процессе политропного расширения воздуху сообщается 80 кДж теплоты. Определить показатель политропы, изменение внутренней энергии и произведенную работу, если объем воздуха увеличился в 10 раз, а его давление уменьшилось в 5 раз.

Изобразить процесс в диаграммах $p\nu$ и Ts .

6. ВЛАЖНЫЙ ВОЗДУХ

Влажный воздух принято рассматривать как смесь идеальных газов – смесь сухого воздуха и водяного пара.

Согласно закону Дальтона атмосферное давление B равно сумме парциальных давлений сухого воздуха $p_{св}$ и водяного пара $p_{п}$:

$$B = p_{св} + p_{п}. \quad (6.1)$$

Водяной пар в составе влажного воздуха может находиться в состоянии перегретого пара, когда его парциальное давление меньше давления насыщения при температуре влажного воздуха, или в состоянии сухого насыщенного пара, при котором парциальное давление пара равно давлению насыщения. Свойства водяного пара могут быть определены по таблицам теплофизических свойств воды и водяного пара (приложение Ж).

При характеристике влажного воздуха используют относительную влажность φ %, влагосодержание d , г/кг, и энтальпию h , кДж/кг. Влагосодержание и энтальпия отнесены к 1 кг сухого воздуха.

Относительная влажность определяется как отношение плотности водяного пара, содержащегося во влажном воздухе, к максимально возможной плотности водяного пара при той же температуре влажного воздуха. Максимально возможная плотность водяного пара – это плотность сухого насыщенного пара при заданной температуре.

В связи с этим

$$\varphi = \frac{\rho_{п}}{\rho_{s}} \times 100 \%, \quad (6.2)$$

где $\rho_{п}$ – плотность водяного пара; ρ_{s} – плотность сухого насыщенного пара при температуре влажного воздуха.

Расчет может быть произведен по уравнению

$$\varphi = \frac{p_{п}}{p_s} \times 100 \%, \quad (6.2a)$$

где p_s – давление насыщения водяного пара при температуре влажного воздуха.

При температуре воздуха $t \geq 100$ °С давление насыщения принимается равным атмосферному давлению.

Влагосодержанием принято называть отношение массы водяного пара в составе влажного воздуха к массе сухого воздуха и рассчитывать по формуле:

$$d = 622 \frac{P_{\text{п}}}{B - P_{\text{п}}}. \quad (6.3)$$

Энтальпию влажного воздуха также относят к 1 кг сухого воздуха и определяют при $t \leq 150$ °С по уравнению:

$$h = 1,01 t + (2500 + 1,88t) \frac{d}{1000}, \quad (6.4)$$

где h – энтальпия влажного воздуха, кДж/кг; t – температура, °С; d – влагосодержание, г/кг.

Диаграмма влажного воздуха hd упрощает определение параметров воздуха и анализ процессов во влажном воздухе. Положение точки, характеризующей состояние воздуха, может быть определено любыми двумя из пяти параметров состояния (t , ϕ , d , h и $p_{\text{п}}$).

Основной характеристикой процессов изменения состояния влажного воздуха является угловой коэффициент (тепловлажностное отношение):

$$\varepsilon = \frac{Q}{m_w} = \frac{\Delta h}{\Delta d}, \quad (6.5)$$

где ε – угловой коэффициент, кДж/г; Q – количество теплоты, подводимой или отводимой от воздуха, кДж; m_w – масса влаги, поступающей в воздух или удаляемой из него, г; Δh – изменение энтальпии, кДж/кг; Δd – изменение влагосодержания, г/кг.

Количества теплоты и влаги, отводимые от воздуха, записываются со знаком «минус». Линии процессов с одним и тем же угловым коэффициентом параллельны друг другу.

При расчете процессов изменения тепловлажностного состояния воздуха рекомендуется использовать зависимости:

$$\frac{\Delta t}{\Delta h} = 0,98 - \frac{2,45}{\varepsilon}, \quad (6.6)$$

где Δt – изменение температуры воздуха в процессе, °С;

$$\frac{\Delta d}{\Delta t} = \frac{1,02}{\varepsilon - 2,5}. \quad (6.6a)$$

Процессы нагревания и охлаждения воздуха происходят при постоянном влагосодержании и характеризуются значением $\varepsilon = \pm \infty$. Процесс охлаждения воздуха может продолжаться до температуры точки росы, определяемой в точке пересечения линии постоянного влагосодержания и линии относительной влажности $\phi = 100$ %. Парциальное давление водяного пара в точке росы равняется давлению насыщения пара при температуре точки росы.

При дальнейшем охлаждении воздуха ниже температуры точки росы наблюдается конденсация водяного пара и снижение влагосодержания. В этом случае процесс изменения состояния воздуха условно изображается протекающим по линии относительной влажности $\phi = 100$ % в сторону уменьшения температуры.

Процесс адиабатического увлажнения воздуха $\varepsilon = 0$ в оросительных камерах происходит в результате контакта воздуха с капельками воды или ее тонким слоем. Он является изоэнтальпийным и изображается линией при $h = const$. Такой же особенностью обладает теоретический процесс сушки в сушильных установках.

Характеристикой процесса сушки является теоретический расход воздуха на испарение 1 кг влаги, кг/кг, из продукта, подвергающегося сушке:

$$l_{\text{тс}} = \frac{1000}{d_2 - d_1}, \quad (6.7)$$

где d_2 и d_1 – влагосодержание влажного воздуха в конце и начале теоретического процесса сушки, г/кг.

Теоретический расход теплоты на испарение 1 кг влаги, кДж/кг, равен:

$$q_{\text{тс}} = l_{\text{т}} (h_1 - h_0), \quad (6.8)$$

где h_1 и h_0 – энтальпии влажного воздуха в конце и начале процесса его нагрева, кДж/кг.

Процесс смешивания воздуха с разными параметрами смешиваемых масс изображается прямой линией, соединяющей точки состояния этих масс влажного воздуха. Точка, соответствующая состоянию воздушной смеси, располагается на этой прямой и делит ее согласно правилу рычага на отрезки, обратно пропорциональные смешиваемым массам.

Расчет процесса смешивания может быть выполнен по уравнениям:

$$d = \frac{m_1 d_1 + m_2 d_2}{m_1 + m_2}; \quad (6.7)$$

$$h = \frac{m_1 h_1 + m_2 h_2}{m_1 + m_2}, \quad (6.8)$$

где d , h – параметры воздушной смеси; m_1 , m_2 – массы влажного воздуха; d_1 , h_1 – параметры влажного воздуха массой m_1 ; d_2 , h_2 – параметры влажного воздуха массой m_2 .

Точка, характеризующая состояние воздушной смеси, может оказаться ниже кривой относительной влажности $\varphi = 100\%$. Ее необходимо перенести по линии постоянной энтальпии на кривую относительной влажности $\varphi = 100\%$. При смешивании воздуха в этих условиях будет наблюдаться некоторое выпадение влаги.

Решения типовых задач

Т.6.1. Состояние воздуха характеризуется температурой $t = 25\text{ }^\circ\text{C}$ и относительной влажностью $\varphi = 80\%$. Барометрическое давление $B = 100\text{ кПа}$.

Определить влагосодержание, энтальпию, парциальное давление водяного пара и температуру точки росы.

Расчет выполнить с использованием диаграммы hd и аналитическим методом.

Решение. На диаграмме hd [1,5] строим точку с использованием заданных параметров: $t = 25\text{ }^\circ\text{C}$ и $\varphi = 80\%$.

Находим по соответствующим линиям:

$$d = 16\text{ г/кг и } h = 66\text{ кДж/кг.}$$

Строим точку в пересечении линии $d = 16\text{ г/кг}$ с линией относительной влажности $\varphi = 100\%$. Определяем температуру точки росы $t_p = 21,5\text{ }^\circ\text{C}$.

В точке пересечения линии $d = 16\text{ г/кг}$ с линией парциального давления водяного пара определяем $p_n = 2,5\text{ кПа}$.

Расчет аналитическим методом производим в следующей последовательности.

Определяем по приложению Ж с использованием линейной интерполяции давление насыщения водяного пара при температуре $t = 25\text{ }^\circ\text{C}$:

$$p_s = (3,36 + 2,982)/2 = 3,17\text{ кПа.}$$

По формуле (6.2a):

$$p_n = 3,17 \times 80/100 = 2,54\text{ кПа.}$$

По уравнению (6.3):

$$d = 622 \times 2,54/(100 - 2,54) = 16,2\text{ г/кг.}$$

По формуле (6.4):

$$h = 1,01 \times 25 + (2500 + 1,88 \times 25) \times \frac{16,2}{1000} = 66,5\text{ кДж/кг.}$$

Для определения температуры точки росы используем равенство парциального давления пара давлению насыщения при этой температуре. В таком случае $p_s = p_n = 2,53\text{ кПа}$. Этому давлению насыщения соответствует по приложению Ж температура точки росы $t_p = 21,3\text{ }^\circ\text{C}$.

Результаты расчета параметров аналитическим и графическим методами практически совпадают.

Т.6.2. Наружный воздух температурой $-20\text{ }^\circ\text{C}$ и относительной влажностью 80% подогревается до температуры $40\text{ }^\circ\text{C}$. Масса воздуха $m = 8000\text{ кг}$. Определить количество теплоты, необходимое для подогрева воздуха.

Решение. Выполним расчет на основании формулы (6.6). При нагреве воздуха угловой коэффициент $\varepsilon = \infty$. В таком случае $\Delta t/\Delta h = 0,98$. Отсюда следует:

$$\Delta h = \Delta t/0,98 = [40 - (-20)]/0,98 = 61,2\text{ кДж/кг.}$$

Количество теплоты при изобарном нагреве воздуха:

$$Q = m \times \Delta h = 8000 \times 61,2 = 490\,000\text{ кДж.}$$

Т.6.3. Воздух с температурой $20\text{ }^\circ\text{C}$ и относительной влажностью 60% охлаждается до температуры $6\text{ }^\circ\text{C}$. Масса воздуха 500 кг , барометрическое давление $B = 100\text{ кПа}$.

Определить количество отводимой теплоты и массу сконденсированной влаги.

Решение. При заданных начальных параметрах на диаграмме hd влажного воздуха строим точку, в которой определяем $d_1 = 8,7\text{ г/кг}$ и $h_1 = 42\text{ кДж/кг}$.

При постоянном влагосодержании опускаемся до линии относительной влажности $\varphi = 100\%$ и на этой линии находим точку, в которой $t_2 = 6\text{ }^\circ\text{C}$; $h_2 = 20,5\text{ кДж/кг}$ и $d_2 = 5,7\text{ г/кг}$.

Количество отведенной теплоты

$$Q = m (h_2 - h_1) = 500 \times (20,5 - 42) = -10750\text{ кДж.}$$

Количество сконденсированной влаги

$$m_w = m (d_2 - d_1) = 500 \times (5,7 - 8,7) = -1500\text{ г.}$$

Задачи

6.1. В жилом помещении поддерживаются параметры внутреннего воздуха $t = 20\text{ }^\circ\text{C}$, $\varphi = 40\%$. Барометрическое давление равно 98 кПа.

Определить влагосодержание, энтальпию влажного воздуха и температуру точки росы аналитическим и графическим методами.

6.2. Параметры воздуха внутри коровника составляют: $t = 10\text{ }^\circ\text{C}$, $\varphi = 75\%$. Барометрическое давление равно 101,3 кПа.

Определить влагосодержание, энтальпию влажного воздуха и температуру точки росы. Расчет выполнить аналитическим и графическим методами.

6.3. В свинарнике для свиноматок поддерживаются температура воздуха $20\text{ }^\circ\text{C}$ и относительная влажность 75% . Барометрическое давление $B = 100\text{ кПа}$.

Определить влагосодержание, энтальпию, парциальное давление водяного пара и температуру точки росы. Расчет выполнить графическим методом.

6.4. В отопительно-вентиляционной системе здания подогревается воздух от -26 до $1,5\text{ }^\circ\text{C}$. Относительная влажность поступающего воздуха 70% . Расход воздуха $m_t = 10\ 200\text{ кг/ч}$.

Определить тепловую мощность калориферов.

6.5. При сушке семенного зерна производится подогрев воздуха от 10 до $55\text{ }^\circ\text{C}$. Начальная влажность воздуха 70% . Расход воздуха $m_t = 5000\text{ кг/ч}$.

Определить тепловую мощность воздухоподогревателя.

6.6. Воздух при начальной температуре $25\text{ }^\circ\text{C}$ и влажности $\varphi = 80\%$ охлаждается до температуры $10\text{ }^\circ\text{C}$. Масса охлаждаемого воздуха составляет $12\ 000\text{ кг}$. Барометрическое давление $B = 100\text{ кПа}$.

Определить количество теплоты, отводимой от воздуха при охлаждении, и массу влаги, выпавшей на поверхности воздухоохладителя.

Расчет выполнить аналитическим методом.

6.7. Наружный воздух с параметрами $t_1 = 35\text{ }^\circ\text{C}$ и $\varphi_1 = 25\%$ при атмосферном давлении равном 98 кПа подвергается адиабатическому увлажнению в оросительной камере. Его температура снижается до $23\text{ }^\circ\text{C}$.

Аналитическим методом определить влагосодержание, относительную влажность и энтальпию воздуха после увлажнения.

6.8. Воздух температурой $55\text{ }^\circ\text{C}$ и относительной влажностью 5% используется в процессе сушки. Рассчитать энтальпию, влагосодержание и относительную влажность воздуха после окончания теоре-

тического процесса сушки при температуре воздуха на выходе сушильной камеры $t_2 = 40\text{ }^\circ\text{C}$.

Определить также удельный расход воздуха на испарение 1 кг влаги из зерна. Барометрическое давление $B = 100\text{ кПа}$.

6.9. При вентиляции производственного помещения происходит изменение тепловлажностного состояния воздуха внутри помещения. Начальные параметры воздуха: $t_1 = 24\text{ }^\circ\text{C}$ и $\varphi_1 = 65\%$, а конечные: $t_2 = 28\text{ }^\circ\text{C}$ и $\varphi_2 = 60\%$.

Определить угловой коэффициент процесса.

6.10. При вентиляции коровника наружный воздух температурой $10\text{ }^\circ\text{C}$ и влажностью 70% изменяет состояние в процессе с угловым коэффициентом $\varepsilon = 4,75\text{ кДж/кг}$. При этом температура воздуха увеличивается до $t_2 = 17\text{ }^\circ\text{C}$.

Определить влагосодержание, относительную влажность и энтальпию воздуха в конечном состоянии.

6.11. В камере смешиваются два потока воздуха. Первый поток массой 1000 кг характеризуется параметрами: $t_1 = 20\text{ }^\circ\text{C}$ и $\varphi_1 = 60\%$, а второй поток массой 3000 кг – параметрами: $t_2 = 40\text{ }^\circ\text{C}$ и $\varphi_2 = 50\%$.

Определить параметры воздуха после смешения.

Контрольная задача 2

Атмосферный воздух давлением 100 кПа с начальными параметрами t_0 и φ_0 подогревается в калориферах до температуры t_1 , а затем используется в качестве сушильного агента в сушильной камере. В изохальпийном процессе сушки воздух увлажняется и охлаждается до температуры t_2 .

Определить удельные расходы воздуха и теплоты на испарение 1 кг влаги. Расчет выполнить аналитическим методом и по диаграмме влажного воздуха. Исходные данные принять по таблице 6.1.

Таблица 6.1 – Исходные данные к контрольной задаче 2

Номер варианта	$T_0, \text{ }^\circ\text{C}$	$\varphi_0, \%$	$T_1, \text{ }^\circ\text{C}$	$t_2, \text{ }^\circ\text{C}$
01	15	70	60	29
02	5	40	60	25
03	12	85	60	28
04	20	80	60	34
06	18	75	60	30

Окончание таблицы 6.1

Номер варианта	$T_0, ^\circ\text{C}$	$\varphi_0, \%$	$T_1, ^\circ\text{C}$	$t_2, ^\circ\text{C}$
07	18	50	60	40
08	10	85	60	32
09	25	50	60	32
10	10	60	50	24
11	15	70	50	28
12	5	40	50	22
13	12	85	50	30
14	20	80	50	28
15	25	40	50	26
16	18	75	50	28
17	18	50	50	25
18	10	85	50	27
19	25	50	50	27
20	10	60	55	29
21	15	70	55	30
22	5	40	55	24
23	12	85	55	32
24	20	80	55	32
25	25	40	55	35
26	18	75	55	30
27	18	50	55	26
28	10	85	55	34
29	25	50	55	31
30	10	60	60	40

7. РАБОЧИЙ ПРОЦЕСС ПОРШНЕВОГО КОМПРЕССОРА

Теоретический рабочий процесс одноступенчатого поршневого компрессора рассматривают при следующих допущениях:

- процессы всасывания (заполнения цилиндра) и нагнетания сжатого газа происходят при постоянных давлениях;
- вредное пространство отсутствует, что означает полное вытеснение сжатого газа из цилиндра;
- в ходе процессов в компрессоре отсутствует трение.

В этих условиях удельная работа привода компрессора из расчета на сжатие 1 кг газа составляет:

- при изотермическом сжатии

$$l_{\text{ИП}} = -RT_1 \ln \frac{p_2}{p_1}, \quad (7.1)$$

где T_1 – начальная температура газа (перед сжатием); p_1 и p_2 – давления газа вначале и после сжатия;

- при адиабатном сжатии

$$l_{\text{ИП}} = \frac{k}{k-1} RT_1 \left[1 - \left(\frac{p_2}{p_1} \right)^{\frac{k-1}{k}} \right]; \quad (7.2)$$

$$l_{\text{ИП}} = \frac{k}{k-1} R(T_1 - T_2); \quad (7.2a)$$

- при политропном сжатии

$$l_{\text{ИП}} = \frac{n}{n-1} RT_1 \left[1 - \left(\frac{p_2}{p_1} \right)^{\frac{n-1}{n}} \right]; \quad (7.3)$$

$$l_{\text{ИП}} = \frac{n}{n-1} R(T_1 - T_2). \quad (7.3a)$$

Параметры сжатого воздуха рассчитывают по уравнениям, приведенным в разделе 5.

Теоретическая мощность привода компрессора, кВт,

$$N = m_i |l_{\text{пр}}|, \quad (7.4)$$

где m_i – массовый расход газа, кг/с.

Количество отводимой в процессах сжатия теплоты вычисляют, используя зависимости, изложенные в разделах 4 и 5.

Удельную энтропию идеального газа находят по формуле (2.3).

Многоступенчатое сжатие используют для достижения заданного большого давления сжатого газа. При этом принимаются одинаковые значения степени повышения давления в каждой из ступеней. После каждой ступени предусматривают охлаждение сжатого газа в изобарном процессе.

Решение типовой задачи

Т.7.1. Подача воздушного поршневого компрессора $Q_v = 240 \text{ м}^3/\text{ч}$ определена при начальных параметрах воздуха: $p_1 = 100 \text{ кПа}$ и $t_1 = 30 \text{ }^\circ\text{C}$. Конечное давление сжатого газа $p_2 = 700 \text{ кПа}$. Показатель политропы процесса сжатия $n = 1,1$.

Определить:

- удельный объем и удельную энтропию перед сжатием;
- удельные объемы, температуры и удельные энтропии сжатого воздуха при изотермическом, политропном и адиабатном сжатии;
- теоретическую мощность привода компрессора при политропном сжатии, а также тепловой поток при охлаждении сжимаемого газа, расход охлаждающей воды.

Повышение температуры охлаждающей воды $\Delta t = 10 \text{ }^\circ\text{C}$.

Решение. Выписываем из приложений В и Г справочные данные для воздуха:

$M_r = 28,96$; $R = 0,287 \text{ кДж}/(\text{кг}\cdot\text{К})$; $k = 1,4$; $C_{\text{пр}} = 29,1 \text{ Дж}/(\text{моль}\cdot\text{К})$.

Определяем для воздуха:

– молярную массу по формуле (1.6)

$$\mu = 10^{-3} \times 28,96 = 0,02896 \text{ кг/моль};$$

– удельную изобарную и удельную изохорную теплоемкости по уравнениям (2.4) и (4.3):

$$c_p = \frac{29,1}{0,02896} = 1005 \text{ Дж}/(\text{кг}\cdot\text{К}) = 1,005 \text{ кДж}/(\text{кг}\cdot\text{К});$$

$$c_g = \frac{1,005}{1,4} = 0,72 \text{ кДж}/(\text{кг}\cdot\text{К}).$$

Рассчитываем по формулам (3.1) и (2.3):

– удельный объем перед сжатием:

$$v_1 = \frac{0,287 \times 303}{100} = 0,87 \text{ м}^3/\text{кг};$$

– удельную энтропию

$$s_1 = 1,005 \ln \frac{303}{273,15} - 0,287 \ln \frac{100}{101,3} = 0,108 \text{ кДж}/(\text{кг}\cdot\text{К}).$$

Вычисляем параметры сжатого воздуха по уравнениям (3.1), (5.4) и (2.3):

– при изотермическом сжатии:

$$T_{2T} = T_1 = 303 \text{ К};$$

$$v_{2T} = \frac{0,287 \times 303}{700} = 0,12 \text{ м}^3/\text{кг};$$

$$S_{2T} = 1,005 \ln \frac{303}{273,15} - 0,287 \ln \frac{700}{101,3} = -0,45 \text{ кДж}/(\text{кг}\cdot\text{К});$$

– при политропном сжатии:

$$T_2 = 303 \times \left(\frac{700}{100} \right)^{\frac{1,1-1}{1,1}} = 362 \text{ К};$$

$$v_2 = \frac{0,287 \times 362}{700} = 0,15 \text{ м}^3/\text{кг};$$

$$S_2 = 1,005 \ln \frac{362}{273,15} - 0,287 \ln \frac{700}{101,3} = -0,27 \text{ кДж}/(\text{кг}\cdot\text{К});$$

– при адиабатном сжатии:

$$T_{2\text{ад}} = 303 \times \left(\frac{700}{100} \right)^{\frac{1,4-1}{1,4}} = 528 \text{ К};$$

$$g_{2\text{ад}} = \frac{0,287 \times 528}{700} = 0,216 \text{ м}^3/\text{кг};$$

$$S_{2\text{ад}} = 1,005 \ln \frac{528}{273,15} - 0,287 \ln \frac{700}{101,3} = 0,108 \text{ кДж}/(\text{кг}\cdot\text{К}).$$

Удельная работа привода компрессора по уравнению (7.3а):

$$l_{\text{пр}} = -\frac{1,1}{1,1-1} \times 0,287 \times (362 - 303) = -186 \text{ кДж/кг.}$$

Массовый расход воздуха

$$m_t = \frac{Q_V}{3600 \times g_1} = \frac{240}{3600 \times 0,87} = 0,0766 \text{ кг/с.}$$

Теоретическая мощность привода по формуле (7.4):

$$N = 0,0766 \times 186 = 14,2 \text{ кВт.}$$

Удельная теплоемкость воздуха по зависимости (5.2) при политропном сжатии:

$$c_n = 0,72 \times \frac{1,1 - 1,4}{1,1 - 1} = -2,16 \text{ кДж/(кг·К).}$$

Удельная теплота, отводимая от воздуха при его сжатии,

$$q_n = -2,16 \times (362 - 303) = -128 \text{ кДж/кг.}$$

Тепловой поток при охлаждении воздуха

$$\Phi = m_t \times |q_n| = 0,0766 \times 128 = 9,8 \text{ кВт.}$$

Расход охлаждающей воды

$$m_{\text{в}} = \frac{3600\Phi}{c_B \Delta t} = \frac{3600 \times 9,8}{4,2 \times 10} = 840 \text{ кг/ч,}$$

где $c_B = 4,2 \text{ кДж/(кг·К)}$ – удельная теплоемкость воды.

Задачи

7.1. Подача компрессора составляет $280 \text{ м}^3/\text{ч}$, будучи определенной при температуре $t_1 = 30 \text{ °C}$ и давлении $p_1 = 0,1 \text{ МПа}$.

Определить теоретическую мощность привода компрессора при адиабатном сжатии азота до конечного давления $p_2 = 0,8 \text{ МПа}$.

7.2. Определить подачу поршневого компрессора при изотермическом сжатии воздуха до давления $0,6 \text{ МПа}$, если теоретическая мощность привода равна 40 кВт . Начальные параметры воздуха: $p_1 = 0,1 \text{ МПа}$ и $t_1 = 20 \text{ °C}$.

7.3. Компрессор всасывает каждую минуту 100 м^3 газа при температуре 20 °C и давлении $0,1 \text{ МПа}$. Давление сжатого газа $p_2 = 0,8 \text{ МПа}$.

Определить теоретическую мощность компрессора при адиабатном сжатии.

7.4. Подача поршневого компрессора $1500 \text{ м}^3/\text{ч}$, будучи определенной при нормальных условиях. Параметры воздуха во всасывающей трубке компрессора: давление $p_1 = 95 \text{ кПа}$ и температура $t_1 = 15 \text{ °C}$. Давление воздуха увеличивается в 10 раз.

Определить для политропного процесса сжатия ($n = 1,25$):

- температуру сжатого воздуха;
- объемный расход сжатого воздуха на выходе компрессора;
- теоретическую мощность привода компрессора;
- расход охлаждающей воды при $\Delta t = 15 \text{ °C}$.

7.5. Рассчитать изотермический процесс сжатия по исходным данным задачи 7.4. Определить требуемые по условиям задачи 7.4. величины.

7.6. Поршневой компрессор сжимает $600 \text{ м}^3/\text{ч}$ воздуха от начального давления $0,1 \text{ МПа}$ до конечного давления, равного $0,6 \text{ МПа}$.

Определить теоретическую мощность привода компрессора при изотермическом, адиабатном и политропном ($n = 1,3$) сжатии. Подача компрессора определена при нормальных условиях, начальная температура газа $t_1 = 20 \text{ °C}$.

7.7. В результате уменьшения расхода охлаждающей воды ухудшились условия охлаждения в компрессоре, и температура сжатого азота увеличилась от 100 до 180 °C . Как и насколько изменилась теоретическая мощность привода компрессора? Степень повышения давления осталась прежней, равной пяти. Массовый расход азота не изменился. Начальную температуру азота принять равной 17 °C .

7.8. Определить относительное изменение теоретической мощности привода компрессора при переходе от одноступенчатого сжатия к двухступенчатому сжатии. При этом предусмотрено охлаждение сжатого газа после первой ступени до первоначальной температуры. Повышение давления в 9 раз, при двухступенчатом сжатии – в каждой ступени в 3 раза. Сжатие политропное при $n = 1,25$.

7.9. Доля объема вредного пространства в цилиндре компрессора по отношению к геометрическому объему цилиндра составляет 7 %.

Определить, при какой степени повышения давления подача компрессора станет равной нулю. Процесс расширения оставшегося сжатого газа принять политропным при $n = 1,3$.

Контрольная задача 3

В одноступенчатом поршневом компрессоре с объемной подачей Q_V сжимается смесь газов от давления $p_1 = 100 \text{ кПа}$ до давления p_2 . Начальная температура газовой смеси t_1 , ее состав задан массовыми

долями g_{H_2} , g_{CO} , g_{CO_2} , g_{N_2} . Подача компрессора приведена к нормальным условиям ($t_0 = 0^\circ\text{C}$, $p_0 = 101,3$ кПа).

Определить удельный объем и удельную энтропию газовой смеси перед сжатием.

Рассчитать для изотермического, адиабатного и политропного (с показателем политропы n) процессов сжатия:

– температуру, удельный объем и удельную энтропию смеси газов в конце процесса сжатия;

– теоретическую мощность привода;

– расход охлаждающей воды при повышении температуры воды в рубашке компрессора на 10°C .

Расчет выполнить без учета влияния вредного пространства, принимая теплоемкость смеси газов постоянной в каждом из процессов.

Построить в масштабе рабочий процесс компрессора в диаграммах $p-v$ и Ts .

Исходные данные принять по таблице 7.1.

Таблица 7.1 – Исходные данные к контрольной задаче 3

Последняя цифра шифра	Состав смеси, массовые доли газов, %				Предпоследняя цифра шифра	P_2 , кПа	n	$t_1, ^\circ\text{C}$	Q_v , м ³ /ч
	g_{H_2}	g_{CO}	g_{CO_2}	g_{N_2}					
1	25	5	10	60	1	500	1,1	5	30
2	15	10	15	60	2	550	1,12	10	50
3	20	15	15	50	3	600	1,14	15	80
4	35	20	10	35	4	650	1,16	20	100
5	10	40	5	45	5	700	1,18	30	120
6	15	30	15	40	6	750	1,2	5	150
7	25	15	20	40	7	800	1,23	10	200
8	20	25	5	50	8	850	1,26	20	250
9	20	10	15	55	9	900	1,29	25	300
0	30	15	10	45	0	1000	1,32	30	400

8. ПРЯМЫЕ ЦИКЛЫ ТЕПЛОВЫХ МАШИН. ЦИКЛЫ ПОРШНЕВЫХ ДВИГАТЕЛЕЙ ВНУТРЕННЕГО СГОРАНИЯ

Задачей расчета прямых циклов тепловых машин является определение параметров состояния рабочего тела в характерных точках цикла; работы и теплоты в процессах, составляющих цикл; термического КПД.

Параметры состояния рабочего тела, количества теплоты и работы рассчитывают по уравнениям, приведенным в разделах 3–5.

Термический КПД цикла:

$$\eta_T = \frac{l}{q_1}, \quad (8.1)$$

где l – удельная работа цикла; q_1 – удельная теплота, подведенная в цикле к рабочему телу.

При этом

$$l = q_1 - |q_2|, \quad (8.2)$$

где q_2 – удельная теплота, отведенная в цикле от рабочего тела.

Выполняя расчет циклов поршневых двигателей внутреннего сгорания (ДВС) вводят параметры цикла:

– степень сжатия как отношение начального удельного объема рабочего тела к его удельному объему в конце сжатия

$$\epsilon_{ц} = \frac{v_1}{v_2};$$

– степень повышения давления в изохорном процессе подвода теплоты

$$\lambda_{ц} = \frac{p_3}{p_2};$$

– степень предварительного расширения как отношение удельных объемов рабочего тела в конце и начале изобарного подвода теплоты:

– в двигателях с изобарным подводом теплоты

$$\rho_{\text{ц}} = \frac{v_3}{v_2};$$

– в двигателях со смешанным подводом теплоты

$$\rho_{\text{ц}} = \frac{v_4}{v_3}.$$

Индексы при параметрах состояния означают номера характерных точек.

Процессы сжатия (расширения) без подвода (отвода) теплоты считают адиабатными.

Процессы отвода теплоты принимают изохорными.

Термический КПД выражают в зависимости от вышеприведенных параметров цикла.

Для циклов поршневых ДВС:

– при изохорном подводе теплоты

$$\eta_{\text{T}} = 1 - \frac{1}{\varepsilon_{\text{ц}}^{k-1}}; \quad (8.3)$$

– при изобарном подводе теплоты

$$\eta_{\text{T}} = 1 - \frac{\rho_{\text{ц}}^k - 1}{k\varepsilon_{\text{ц}}^{k-1}(\rho_{\text{ц}} - 1)}; \quad (8.4)$$

– при смешанном подводе теплоты

$$\eta_{\text{T}} = 1 - \frac{1}{\varepsilon_{\text{ц}}^{k-1}} \times \frac{\lambda_{\text{ц}} \rho_{\text{ц}}^k - 1}{\lambda_{\text{ц}} - 1 + k\lambda_{\text{ц}}(\rho_{\text{ц}} - 1)}, \quad (8.5)$$

где k – показатель адиабаты.

Решение типовой задачи

Т.8.1. В цикле поршневого ДВС со смешанным подводом теплоты начальные параметры рабочего тела: $p_1 = 0,1$ МПа и $t_1 = 27^\circ\text{C}$; параметры цикла: $\varepsilon_{\text{ц}} = 12,7$, $\lambda_{\text{ц}} = 1,4$ и $\rho_{\text{ц}} = 1,6$. Рабочим телом является воздух.

Определить параметры состояния p , v , T и S в характерных (узловых) точках цикла, удельные количества работы и теплоты в процессах, удельную работу цикла и его термический КПД.

Решение. Изображаем цикл в диаграммах $p-v$ и $T-s$ (рисунок 8.1).

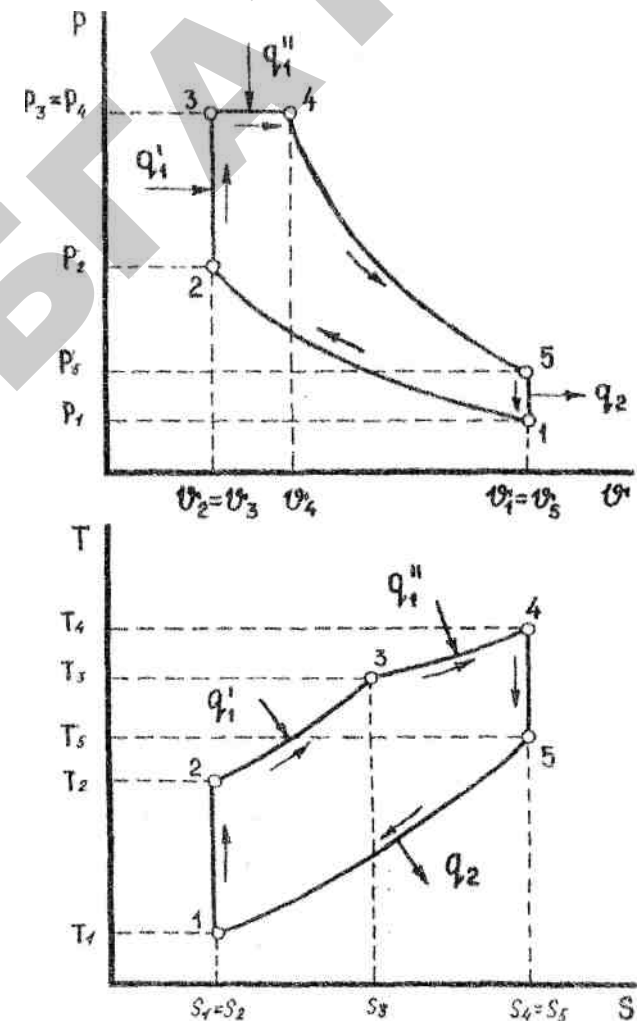


Рисунок 8.1 – Цикл поршневого ДВС со смешанным подводом теплоты в диаграммах $p-v$ и $T-s$

Выписываем свойства воздуха (см. приложения Г и Д, решения типовых задач Т.1.2 и Т.7.1):

- газовая постоянная $R = 0,287$ кДж/(кг·К);
- удельная изохорная теплоемкость $c_v = 0,718$ кДж/(кг·К);
- удельная изобарная теплоемкость $c_p = 1,005$ кДж/(кг·К);
- показатель адиабаты $k = 1,4$.

Рассчитываем параметры состояния в характерных точках цикла.

Точка 1

Давление $p_1 = 0,1$ МПа = 100 кПа.

Температура $T_1 = 27 + 273,15 = 300,15$ К.

Удельный объем по уравнению (3.1)

$$v_1 = \frac{0,287 \times 300,15}{100} = 0,86 \text{ м}^3/\text{кг}.$$

Удельная энтропия по формуле (2.3)

$$s_1 = 1,005 \ln \frac{300,15}{273,15} - 0,287 \ln \frac{100}{101,3} = 0,1 \text{ кДж}/(\text{кг}\cdot\text{К}).$$

Точка 2

При расчете используем соотношения (5.4) в адиабатном процессе 1–2 с учетом $n = k$:

$$v_2 = \frac{v_1}{\epsilon_{\text{ц}}} = \frac{0,86}{12,7} = 0,068 \text{ м}^3/\text{кг};$$

$$T_2 = T_1 \left(\frac{v_1}{v_2} \right)^{k-1} = 300,15 \times 12,7^{1,4-1} = 830 \text{ К};$$

$$p_2 = p_1 \left(\frac{v_1}{v_2} \right)^k = 100 \times 12,7^{1,4} = 3,51 \text{ МПа};$$

$$s_2 = 1,005 \ln \frac{830}{273,15} - 0,287 \ln \frac{3510}{101,3} = 0,1 \text{ кДж}/(\text{кг}\cdot\text{К}).$$

Точка 3

Процесс 2–3 является изохорным.

$$v_3 = v_2 = 0,068 \text{ м}^3/\text{кг};$$

$$p_3 = p_2 \lambda_{\text{ц}} = 3510 \times 1,4 = 4910 \text{ кПа} = 4,91 \text{ МПа};$$

$$T_3 = T_2 \lambda_{\text{ц}} = 830 \times 1,4 = 1162 \text{ К};$$

$$s_3 = 1,005 \ln \frac{1162}{273,15} - 0,287 \ln \frac{4910}{101,3} = 0,34 \text{ кДж}/(\text{кг}\cdot\text{К}).$$

Точка 4

$$p_4 = p_3 = 4910 \text{ кПа} = 4,91 \text{ МПа};$$

$$v_4 = v_3 \rho_{\text{ц}} = 0,068 \times 1,6 = 0,109 \text{ м}^3/\text{кг};$$

$$T_4 = T_3 \rho_{\text{ц}} = 1162 \times 1,6 = 1859 \text{ К};$$

$$s_4 = 1,005 \ln \frac{1859}{273,15} - 0,287 \ln \frac{4910}{101,3} = 0,814 \text{ кДж}/(\text{кг}\cdot\text{К}).$$

Точка 5

Процесс 4–5 является адиабатным. Используем соотношения (5.4). При этом учитываем равенство удельных объемов в точках 1 и 5:

$$v_5 = v_1 = 0,86 \text{ м}^3/\text{кг}.$$

В таком случае

$$p_5 = p_4 \left(\frac{v_4}{v_5} \right)^k = 4910 \times \left(\frac{0,109}{0,86} \right)^{1,4} = 272 \text{ кПа}.$$

Исходя из уравнения (3.1), находим:

$$T_5 = \frac{272 \times 0,86}{0,287} = 815 \text{ К}.$$

Удельная энтропия

$$s_5 = 1,005 \ln \frac{815}{273,15} - 0,287 \ln \frac{272}{101,3} = 0,815 \text{ кДж}/(\text{кг}\cdot\text{К}).$$

Определяем теплоту и работу в процессах, составляющих цикл, используя уравнения (5.5) и (5.9).

Процесс 1–2 является адиабатным. В таком процессе:

- удельная теплота $q_{1,2} = 0$;
- удельная работа

$$l_{1-2} = \frac{R}{k-1}(T_1 - T_2) = \frac{0,287}{1,4-1} \times (300,15 - 830) = -380,2 \text{ кДж/кг.}$$

Знак «минус» указывает на то, что работа затрачивается извне на сжатие рабочего тела.

В изохорном процессе 2–3 удельная работа равна нулю, а удельная теплота определяется как

$$q_{2-3} = c_V(T_3 - T_2) = 0,718 \times (1162 - 830) = 238,4 \text{ кДж/кг.}$$

Процесс 3–4 является изобарным.

Удельная работа

$$l_{3-4} = P_3(\vartheta_4 - \vartheta_3) = 4910 \times (0,109 - 0,068) = 201,3 \text{ кДж/кг.}$$

Удельная теплота

$$q_{3-4} = c_P(T_4 - T_3) = 1,005 \times (1859 - 1162) = 700,5 \text{ кДж/кг.}$$

В адиабатном процессе 4–5 удельная теплота равна нулю, а удельная работа рассчитывается по уравнению

$$l_{4-5} = \frac{R}{k-1}(T_4 - T_5) = \frac{0,287}{1,4-1} \times (1859 - 815) = 749,1 \text{ кДж/кг.}$$

Процесс 5–1 является изохорным, в котором работа равна нулю.

Удельная теплота

$$q_{5-1} = c_V(T_1 - T_5) = 0,718 \times (300,15 - 815) = -369,7 \text{ кДж/кг.}$$

Знак «минус» указывает на отвод теплоты от рабочего тела.

Удельная работа цикла

$$l = l_{1-2} + l_{3-4} + l_{4-5} = -380,2 + 201,3 + 749,1 = 570,2 \text{ кДж/кг.}$$

Удельная теплота, подведенная в цикле к рабочему телу:

$$q_1 = 238,4 + 700,5 = 938,9 \text{ кДж/кг.}$$

Термический КПД цикла по уравнению (8.1):

$$\eta_T = \frac{570,2}{938,9} = 0,607.$$

Проверка

Удельная работа по формуле (8.2):

$$l = 938,9 - |-369,7| = 569,2 \text{ кДж/кг.}$$

Термический КПД по уравнению (8.5):

$$\eta_T = 1 - \frac{1}{12,7^{0,4}} \times \frac{1,4 \times 1,6^{1,4} - 1}{1,4 - 1 + 1,4 \times 1,4(1,6 - 1)} = 0,608.$$

Полученные значения достаточно близки к ранее рассчитанным данным (различие в результатах вычислений не превышает 0,2 %).

Задачи

8.1. Определить термический КПД и удельную работу цикла поршневого ДВС с изобарным подводом теплоты. При расчете принять: $p_1 = 0,098 \text{ МПа}$, $t_1 = 30 \text{ }^\circ\text{C}$, $\varepsilon_{ц} = 14$ и $\rho_{ц} = 1,7$. Рабочее тело – воздух.

Изобразить цикл схематично в диаграммах pV и Ts .

8.2. Рассчитать цикл поршневого ДВС с изохорным подводом теплоты, если дано: $p_1 = 0,1 \text{ МПа}$, $t_1 = 17 \text{ }^\circ\text{C}$, $\varepsilon_{ц} = 4$, $\lambda_{ц} = 2,2$. Рабочее тело – воздух.

Определить основные параметры в узловых точках, удельные теплоты и работу в процессах, удельную работу и термический КПД цикла.

Изобразить цикл схематично в диаграммах pV и Ts .

8.3. Найти параметры p , v , T в узловых точках, удельные количества подведенной и отведенной теплоты, удельную работу цикла, термический КПД цикла поршневого ДВС с изобарным подводом теплоты.

Дано: $p_1 = 100 \text{ кПа}$, $t_1 = 27 \text{ }^\circ\text{C}$, $\varepsilon_{ц} = 20$ и $\rho_{ц} = 1,8$. Рабочее тело – воздух.

8.4. Рассчитать термический КПД цикла поршневого ДВС с изобарным подводом теплоты, если известны температуры в узловых точках: $t_1 = 40 \text{ }^\circ\text{C}$, $t_2 = 600 \text{ }^\circ\text{C}$, $t_4 = 270 \text{ }^\circ\text{C}$. Принять показатель адиабаты $k = 1,4$.

8.5. Найти термический КПД цикла поршневого ДВС с изобарным подводом теплоты при заданных параметрах в узловых точках: $p_1 = 100 \text{ кПа}$, $t_1 = 0 \text{ }^\circ\text{C}$, $p_3 = 5,5 \text{ МПа}$ и $p_4 = 300 \text{ кПа}$. Рабочее тело – двухатомный газ.

8.6. Рассчитать термический КПД цикла, составленного из следующих процессов:

1–2 – изотермический процесс сжатия;

2–3 – изобарный процесс;

3–1 – адиабатный процесс.

Рабочее тело – воздух. Представить цикл в диаграммах pV и Ts .

При расчете принять отношение удельных объемов $\frac{v_3}{v_2} = 2$.

8.7. Рассчитать термический КПД цикла, составленного из следующих процессов:

1–2 – изотермический процесс сжатия;

2–3 – изохорный процесс;

3–1 – адиабатный процесс.

Рабочее тело – воздух. Представить цикл в диаграммах $p-v$ и $T-s$.

При расчете принять отношение давлений $\frac{p_3}{p_2} = 3$.

Контрольная задача 4

Рассчитать цикл поршневого ДВС по заданным начальным параметрам состояния рабочего тела p_1, t_1 и параметрам цикла $\epsilon_{ц}, \lambda_{ц}, \rho_{ц}$. В качестве рабочего тела принять воздух.

При расчете определить основные параметры состояния (p, v, T и S) в характерных точках цикла, подведенную и отведенную удельную теплоту, термический КПД и удельную работу цикла.

Построить цикл в масштабе в диаграммах $p-v$ и $T-s$. Исходные данные принять по таблице 8.1.

Таблица 8.1 – Исходные данные к контрольной задаче 4

Параметры цикла	Последняя цифра шифра									
	0	1	2	3	4	5	6	7	8	9
$\epsilon_{ц}$	7	18	13	8	20	15	9	23	12	6
$\lambda_{ц}$	1,8	1,0	1,2	1,7	1,0	1,3	2,0	1,0	1,4	1,9
ρ	1,0	2,0	1,5	1,0	2,3	1,7	1,0	1,9	1,5	1,0
Начальные параметры	Предпоследняя цифра шифра									
	0	1	2	3	4	5	6	7	8	9
$P_1, \text{кПа}$	95	120	100	150	180	110	98	102	96	95
$t_1, \text{°C}$	40	30	25	27	17	20	35	27	7	0

9. ЦИКЛЫ ГАЗОТУРБИННЫХ УСТАНОВОК

Широкое применение получили газотурбинные установки (ГТУ) с изобарным подводом теплоты. Параметрами их циклов являются: – степень повышения давления в процессе сжатия рабочего тела

$$\beta_{ц} = \frac{p_2}{p_1};$$

– степень предварительного расширения (отношение удельных объемов рабочего тела в конце и начале изобарного подвода теплоты)

$$\rho_{ц} = \frac{v_3}{v_2}.$$

Термический КПД циклов ГТУ с изобарным подводом теплоты рассчитывают по формуле (8.3) или в зависимости от степени повышения давления в адиабатном процессе сжатия

$$\eta_T = 1 - \frac{1}{\beta_{ц}^{\frac{\kappa}{\kappa-1}}}. \quad (9.1)$$

В случае использования в цикле регенерации теплоты термический КПД увеличивается и при полной регенерации теплоты вычисляется как

$$\eta_T = 1 - \frac{T_1}{T_4}, \quad (9.2)$$

где T_4 – термодинамическая температура рабочего тела на выходе из газовой турбины, К.

При исследовании циклов ГТУ используют основные положения, изложенные выше в разделе 8.

Задачи

9.1. Определить параметры p, v, T в узловых точках, термический КПД и удельную работу цикла ГТУ с изобарным подводом теплоты.

Дано: $p_1 = 98 \text{ кПа}, t_1 = 20 \text{ °C}, t_3 = 590 \text{ °C}, \beta_{ц} = 8$. Рабочее тело – воздух.

Представить цикл в диаграммах $p\nu$ и Ts .

9.2. Начальные параметры воздуха, поступающего в компрессор ГТУ с изобарным подводом теплоты: $p_1 = 0,1$ МПа и $t_1 = 20$ °С. Степень повышения давления в компрессоре $\beta_{\text{ц}} = 6$. Температура рабочего тела перед адиабатным расширением в турбине $t_3 = 700$ °С.

Определить параметры p , ν , T и S в узловых точках цикла, удельную работу цикла и термический КПД; удельную теплоту в процессах подвода (отвода) теплоты и теоретическую мощность ГТУ. Представить цикл в диаграммах $p\nu$ и Ts .

Объемный расход воздуха задан при его начальных параметрах и равен $200\,000$ м³/ч.

9.3. Выполнить расчет по условиям задачи 9.2, изменив температуру рабочего тела перед турбиной и приняв $t_3 = 800$ °С.

Ответить на вопрос, как влияет температура рабочего тела при входе в газовую турбину на термический КПД цикла?

9.4. В цикле ГТУ с изобарным подводом теплоты начальные параметры рабочего тела–воздуха: $t_1 = 10$ °С и $p_1 = 0,1$ МПа. Найти термический КПД и удельную работу цикла при степени повышения давления равной восьми, если температура рабочего тела на входе в газовую турбину равна 800 °С. Представить цикл в диаграммах $p\nu$ и Ts .

9.5. При условиях задачи 9.4 рассчитать термический КПД цикла с полной регенерацией теплоты.

9.6. Построить графики изменения термического КПД и удельной работы цикла ГТУ с изобарным подводом теплоты в зависимости от степени повышения давления в компрессоре, приняв начальные параметры рабочего тела: $t_1 = 30$ °С и $p_1 = 0,095$ МПа. Максимальная температура рабочего тела равна 1000 °С. Рабочее тело – воздух. Степень повышения давления принять равной 4, 6, 8, 10, 12, 14, 16, 18 и 20.

9.7. Выполнить расчет аналогичный условиям задачи 9.6, приняв максимальную температуру рабочего тела равной 700 °С. Сравнить результаты расчетов в данной задаче и в задаче 9.6.

Контрольная задача 5

Для цикла ГТУ с изобарным подводом теплоты определить параметры p , ν , T и S рабочего тела (воздуха) в характерных точках цикла, подведенную и отведенную удельную теплоту, удельную работу и термический КПД цикла, теоретическую мощность ГТУ.

Начальное давление $p_1 = 0,1$ МПа, начальная температура $t_1 = 27$ °С. Степень повышения давления в компрессоре $\beta_{\text{ц}}$, температуру рабочего тела перед турбиной t_3 и расход рабочего тела m , выбрать по таблице 9.1 в зависимости от шифра (номера варианта).

Изобразить цикл в масштабе в диаграммах $p\nu$ и Ts .

Таблица 9.1 – Исходные данные к контрольной задаче 5

Параметр цикла	Последняя цифра шифра									
	0	1	2	3	4	5	6	7	8	9
$\beta_{\text{ц}}$	6	6,5	7	7,5	8	8,5	9	10	11	12
Параметры работы	Предпоследняя цифра шифра									
	0	1	2	3	4	5	6	7	8	9
$t_3, \text{°C}$	600	625	650	675	700	725	750	775	800	825
$m, \text{кг/с}$	20	25	30	40	50	60	70	80	90	100

10. ВОДА И ВОДЯНОЙ ПАР

Расчеты термодинамических процессов с водяным паром производят с помощью термодинамических таблиц и диаграмм состояний водяного пара [4]. Особое значение для расчета процессов имеет диаграмма hs , каждая точка на которой соответствует определенному состоянию водяного пара и определенным параметрам состояния p , v , T , h и s .

На диаграмму нанесены изобары, изохоры, изотермы и линии постоянной степени сухости. Адиабатный обратимый процесс изображается вертикальной линией при значении $S = const$.

В приложении Ж приведены некоторые данные о теплофизических свойствах воды и водяного пара. В приложении и дана диаграмма hs водяного пара.

Для расчета параметров влажного насыщенного пара предложены зависимости:

$$v_x = xv'' + (1-x)v' \approx xv'', \quad (10.1)$$

где v_x – удельный объем влажного насыщенного пара, м³/кг; v'' и v' – удельные объемы сухого насыщенного пара и воды при температуре насыщения, м³/кг; x – степень сухости пара;

$$h_x = h' + xr, \quad (10.2)$$

где h_x – удельная энтальпия влажного насыщенного пара, кДж/кг; h' – удельная энтальпия воды при температуре насыщения, кДж/кг; r – удельная теплота парообразования при температуре насыщения, кДж/кг;

$$s_x = s' + x \frac{r}{T_s}, \quad (10.3)$$

где s_x – удельная энтропия влажного насыщенного пара, кДж/(кг·К); s' – удельная энтропия воды при температуре насыщения, кДж/(кг·К); T_s – температура насыщения, К.

Удельную энтальпию воды, кДж/кг, допустимо рассчитывать как

$$h_B = c_B t_B, \quad (10.4)$$

где c_B – удельная теплоемкость воды, кДж/(кг·К); t_B – температура воды, °С.

Изменение удельной внутренней энергии в любом процессе определяют как

$$u_2 - u_1 = h_2 - h_1 - (p_2 v_2 - p_1 v_1). \quad (10.5)$$

Процессы подогрева (охлаждения) воды, парообразования (конденсации) и перегрева пара являются изобарными. Расчет количеств теплоты производят с использованием разности энтальпий в процессе:

$$Q = m(h_2 - h_1). \quad (10.6)$$

Решение типовой задачи

Т.10.1. Паровой котел имеет паропроизводительность 72 т/ч при давлении пара 4 МПа и его температуре 440 °С. Теплота сгорания топлива составляет 12 600 кДж/кг. Температура питательной воды, поступающей непосредственно в котел, равна 145 °С.

Определить КПД котла, если расход топлива равен 4,9 кг/с.

Решение. Находим по приложению Ж энтальпию перегретого пара

$$h_{II} = 3\,307,7 \text{ кДж/кг.}$$

Энтальпия поступающей (питательной) воды по выражению (10.4):

$$h_{IV} = 4,2 \times 145 = 609 \text{ кДж/кг.}$$

Количество теплоты, расходуемой в течение одного часа на получение пара, по формуле (10.6):

$$Q_P = 72\,000 \times (3307,7 - 609) = 1,94 \times 10^8 \text{ кДж.}$$

Количество теплоты, полученной за один час при сгорании топлива, определим по уравнению (1.10):

$$Q_T = 4,9 \times 3600 \times 12600 = 2,22 \cdot 10^8 \text{ кДж.}$$

КПД котла:

$$\eta_K = \frac{Q_P}{Q_T} = \frac{1,94 \times 10^8}{2,22 \times 10^8} = 0,87.$$

Задачи

10.1. Найти массу водяного пара объемом 10 м³ при давлении 1,4 МПа и степени сухости 0,96.

10.2. Найти удельную теплоту в процессе получения сухого насыщенного пара давлением 0,15 МПа из воды температурой 20 °С.

10.3. Определить расход топлива за один час в котельном агрегате, паропроизводительность которого 6,5 т/ч. Пар вырабатывается сухой насыщенный давлением 1,37 МПа.

При расчете принять:

- теплота сгорания топлива составляет 25 МДж/кг;
- температура воды, поступающей в котельный агрегат, равна 100 °С;
- КПД котельного агрегата равен 78 %.

10.4. Рассчитать диаметр паропровода, по которому протекает сухой насыщенный водяной пар при давлении 0,15 МПа. Расход пара – 1 т/ч, скорость пара – 50 м/с.

10.5. В барабане котла объемом 11 м³ содержатся водяной пар и вода при температуре насыщения и давлении 1,4 МПа. Водяной пар занимает объем в 10 м³.

Определить массы пара и воды в барабане.

10.6. Определить расход пара давлением 0,15 МПа и степенью сухости, равной 0,95 на запаривание зерна в кормозапарнике. Начальную температуру зерна принять равной 18 °С.

Масса зерна составляет 2,5 т, температуру запаривания принять равной 95 °С.

При запаривании кормозапарник заполняется холодной водой при температуре 5 °С из расчета 1,5 кг воды на 1 кг зерна.

Теплопотери при расчете пренебречь.

10.7. В барабане парового котла находится кипящая вода и сухой насыщенный пар.

Во сколько раз масса кипящей воды превышает массу сухого насыщенного пара, если объем барабана равен 5 м³, а объем кипящей воды составляет 2 м³?

Давление в барабане котла равняется 1 МПа.

10.8. В теплообменнике подогревается мазут от 20 до 90 °С. Определить часовой расход пара, параметры которого на входе в теплообменник: давление – 0,9 МПа, степень сухости – 0,94. При расчете принять, что расход мазута равен 600 кг/ч. Пар конденсируется полностью без переохлаждения конденсата.

10.9. Водяной пар расширяется в адиабатном процессе от начальных параметров $p_1 = 5$ МПа и $t_1 = 500$ °С до конечного давления $p_2 = 4$ кПа. Найти удельную работу и изменение удельной внутренней энергии.

10.10. В пароводяном теплообменнике происходит нагрев воды в количестве 10 т/ч от 10 до 90 °С. В качестве теплоносителя исполь-

зуется водяной пар, параметры которого на входе в теплообменник: $p = 0,8$ МПа, $x = 0,92$. Пар конденсируется полностью без переохлаждения конденсата.

Определить расход пара.

10.11. Рассчитать КПД котла производительностью 200 кг/ч при давлении вырабатываемого сухого насыщенного пара 0,15 МПа.

В течение часа сожжено 80 кг топлива теплотой сгорания 10 МДж/кг. Температура питательной воды составляет 20 °С.

10.12. В сепаратор-расширитель котельной установки подается продувочная вода при температуре насыщения и давлении 1,4 МПа. В сепараторе поддерживается давление 0,2 МПа. Сколько образуется сухого насыщенного пара в течение 1 ч из продувочной воды, расход которой составляет 700 кг/ч?

10.13. При пастеризации молока предусматривается нагрев горячей воды за счет ее смешивания с водяным паром в инжекторе. Найти часовой расход пара для подогрева воды от 74 до 78 °С при расходе воды 12 т/ч. Пар используется влажный насыщенный, давлением 0,15 МПа и степенью сухости 0,95.

11. ЦИКЛЫ ПАРСИЛОВЫХ УСТАНОВОК

Водяной пар используют в качестве рабочего тела в современных паросиловых установках.

Основным циклом паросиловых установок является цикл Ренкина, характеризующийся полной конденсацией отработавшего водяного пара (рисунок 11.1).

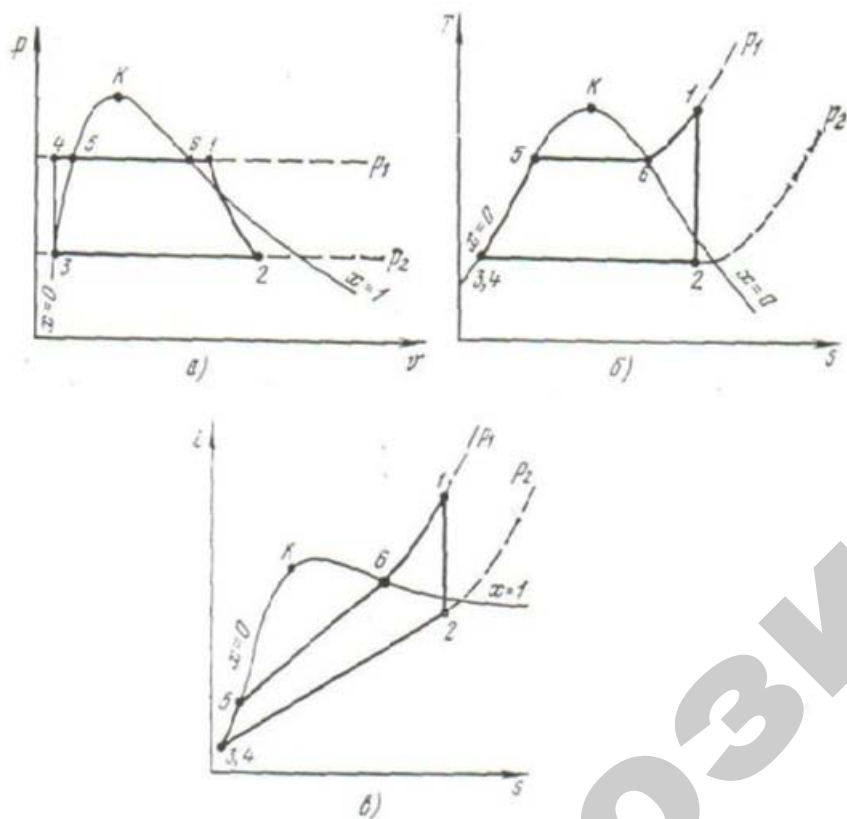


Рисунок 11.1 – Цикл Ренкина:

а – диаграмма $p-v$; б – диаграмма $T-s$; в – диаграмма $h-s$

Цикл Ренкина состоит из следующих процессов:

- 1–2 – адиабатное расширение перегретого пара в паровой турбине;
- 2–3 – полная конденсация пара в конденсаторе;

- 3–4 – повышение давления воды в насосе;
- 4–5 – подогрев воды в котле до температуры насыщения;
- 5–6 – парообразование в котле;
- 6–1 – перегрев пара в пароперегревателе котла.

Параметры цикла:

– удельная работа цикла

$$l_{ц} = h_1 - h_2; \quad (11.1)$$

– подведенная удельная теплота

$$q_1 = h_1 - h_3; \quad (11.2)$$

– отведенная удельная теплота

$$q_2 = h_2 - h_3; \quad (11.3)$$

– термический КПД

$$\eta_T = \frac{h_1 - h_2}{h_1 - h_2'}, \quad (11.4)$$

где $h_2' = h_3$ – удельная энтальпия воды при температуре насыщения при давлении p_2 ;

– удельный расход пара, кг/кВтч,

$$d = \frac{3600}{h_1 - h_2}. \quad (11.5)$$

При расчете цикла Ренкина обычно не учитывают работу на привод насоса.

С целью повышения степени сухости отработавшего в турбине пара применяют промежуточный (повторный) перегрев пара после частичной его отработки в паровой турбине.

В таком случае удельная работа цикла суммируется из работ пара в первой и второй частях турбины как сумма разностей энтальпий при расширении пара в первой и второй частях турбины. Количество подведенной теплоты находят как сумму количества теплоты, подведенной в котле и первом пароперегревателе, и количества теплоты, подведенной к пару во втором пароперегревателе.

Термический КПД находят согласно уравнению (8.1).

Решения типовых задач

Т.11.1. Определить термический КПД цикла Ренкина и удельный расход пара в паросиловой установке при начальных параметрах пара (перед паровой турбиной): $p_1 = 5$ МПа и $t_1 = 500$ °С.

Конечное давление пара составляет $p_2 = 10$ кПа.

Решение. Для определения параметров пара в точках 1 и 2 используем диаграмму hs (приложение И). Построение точек показано на рисунке 11.1.

Решение задачи начинаем с нахождения точки 1 (состояние перегретого пара). По заданным значениям давления и температуры определяем неизвестные параметры:

$$h_1 = 3430 \text{ кДж/кг}; s_1 = 7 \text{ кДж/(кг·К)}.$$

Затем на пересечении изобары p_2 и вертикальной линии, соответствующей значению постоянной энтропии $S_1 = S_2$, находим точку 2 и параметры влажного насыщенного пара:

$$h_2 = 2210 \text{ кДж/кг}; x_2 = 0,84.$$

Для проверки полученных значений используем табличные данные (приложение Ж):

$$h_1 = 3433,8 \text{ кДж/кг}; s_1 = 6,9768 \text{ кДж/(кг·К)}.$$

Энтальпию h_2 можно рассчитать по формуле, полученной на основе зависимостей (10.2) и (10.3):

$$h_2 = h_2' + (s_1 - s_2')T_{s_2}, \quad (11.6)$$

где значения h_2' , s_2' , T_{s_2} определены при давлении p_2 .

По приложению Ж:

$$h_2' = 191,84 \text{ кДж/кг}; s_2' = 0,6493 \text{ кДж/(кг·К)}; t_{s_2} = 45,83 \text{ °С}.$$

$$h_2 = 191,84 + (6,9768 - 0,6493) \times (45,87 + 273,15) = 2210 \text{ кДж/кг}.$$

Учитывая малое отличие расчетных значений и определяемых по диаграмме, используем в дальнейшем значения, найденные по диаграмме.

Термический КПД по формуле (11.4):

$$\eta_T = \frac{3430 - 2210}{3430 - 191,84} = 0,38.$$

Удельный расход пара по уравнению (11.5):

$$d = \frac{3600}{3430 - 2210} = 2,95 \text{ кг/(кВт ч)}.$$

Т.11.2. Параметры водяного пара в паросиловой установке: $p_1 = 15$ МПа, $t_1 = 550$ °С и $p_2 = 5$ кПа. Предусмотрен промежуточный перегрев пара при давлении, равном 4 МПа, до первоначальной температуры 550 °С. Вычислить термический КПД этого цикла.

Решение. По диаграмме водяного пара (приложение И) находим:
– удельную энтальпию пара при давлении 15 МПа и температуре 550 °С:

$$h_1 = 3460 \text{ кДж/кг};$$

– удельную энтальпию пара после изоэнтропного расширения в первой части турбины:

$$h_2 = 3060 \text{ кДж/кг};$$

– удельную энтальпию пара при давлении 4 МПа и температуре 550 °С:

$$h_3 = 3560 \text{ кДж/кг};$$

– удельную энтальпию пара после изоэнтропного расширения во второй части турбины низкого давления до давления $p_2 = 5$ кПа = 0,005 МПа:

$$h_4 = 2200 \text{ кДж/кг}.$$

По приложению Ж определяем удельную энтальпию воды при температуре насыщения при давлении P_2 :

$$h_2' = 138 \text{ кДж/кг}.$$

Удельная работа пара:

– в первой части турбины $l_1 = 3460 - 3060 = 400$ кДж/кг;

– во второй части турбины $l_2 = 3560 - 2200 = 1360$ кДж/кг;

– во всей турбине $l = 400 + 1360 = 1760$ кДж/кг.

Удельная теплота, подведенная:

– в котле и основном пароперегревателе $q_1' = 3460 - 138 = 3322$ кДж/кг;

– в промежуточном пароперегревателе $q_1'' = 3560 - 3060 = 500$ кДж/кг;

– в паросиловой установке в целом $q = 3322 + 500 = 3822$ кДж/кг.

Термический КПД цикла по формуле (8.1):

$$\eta_T = 1760/3822 = 0,46.$$

Задачи

11.1. Паровая турбина мощностью 100 МВт работает паром давлением $p_1 = 10$ МПа и $t_1 = 550$ °С. Давление в конденсаторе $p_2 = 5$ кПа. Определить теоретический часовой расход пара на турбину.

11.2. Паровая турбина работает при следующих начальных параметрах пара: давление 3 МПа, температура 350 °С. Конечное давление составляет 6 кПа. Мощность электростанции равна 50 МВт.

Определить часовой расход пара и термический КПД.

11.3. Начальные параметры пара: $p_1 = 4$ МПа, $t_1 = 400$ °С, конечное давление отработавшего пара $p_2 = 5$ кПа. Мощность турбины 20 МВт.

Определить расход воды в конденсаторе, если температура воды на входе в конденсатор составляет 24 °С, а на выходе конденсатора равна 32 °С.

11.4. Мини-ТЭЦ работает по циклу Ренкина на водяном паре давлением 1,4 МПа. При этом используются турбины с противодавлением, равным 0,12 МПа. Определить, какой должна быть температура пара, поступающего в турбину, при условии обеспечения степени сухости пара на выходе из турбины не менее 0,9. Найти также термический КПД цикла при минимально допустимой температуре пара на входе в турбину.

11.5. В паросиловой установке, работающей при начальном давлении пара 10 МПа и его начальной температуре 500 °С, введен промежуточный перегрев пара при давлении 3 МПа до температуры 450 °С. Определить термический КПД цикла, приняв конечное давление пара равным 4 кПа.

11.6. В паросиловой установке с начальными параметрами пара 30 МПа и 650 °С предусмотрен промежуточный перегрев пара при давлении 6 МПа до температуры 580 °С. Определить термический КПД цикла при конечном давлении пара равным 5 кПа.

11.7. В паросиловой установке водяной пар с параметрами $p = 3$ МПа и $x = 0,92$ вначале перегревается при постоянном давлении, а затем расширяется в адиабатном процессе до давления 0,1 МПа и степени сухости 0,9. Определить изменение внутренней энергии пара в каждом из этих процессов и максимальную температуру пара.

Контрольная задача 6

Рассчитать идеальный цикл паросиловой установки – цикл Ренкина согласно заданным начальным параметрам перегретого водяного пара p_1 и t_1 и заданному давлению пара в конденсаторе p_2 .

Определить параметры состояния воды и водяного пара (p , t , v , h , s , x) в характерных точках цикла (рисунок 11.1), удельную работу цикла, термический КПД и удельный расход пара. При этом не учитывать удельную работу, затрачиваемую в насосе.

Изобразить цикл в диаграммах $p-v$ и $T-s$. Показать стрелками процессы подвода и отвода теплоты, а штриховкой – удельную работу цикла.

Состояние пара в точке $5'$ характеризуется давлением p_1 и степенью сухости x_5 .

Исходные данные принять по таблице 11.1.

Таблица 11.1 – Исходные данные к контрольной задаче 6

Параметры цикла	Последняя цифра шифра									
	0	1	2	3	4	5	6	7	8	9
p_1 , МПа	4,5	2,0	3,0	3,5	1,5	2,5	4,0	5,0	3,5	2,0
t_1 , °С	490	480	450	470	440	420	430	500	410	450
Параметры цикла	Предпоследняя цифра шифра									
	0	1	2	3	4	5	6	7	8	9
p_2 , кПа	4,0	3,0	4,5	4,5	5,0	30	20	7,5	40	10
x_5 , %	87	95	96	92	98	95	88	97	95	90

12. ЦИКЛЫ ХОЛОДИЛЬНЫХ МАШИН

Схема и цикл парокompрессионной холодильной машины представлены на рисунке 12.1.

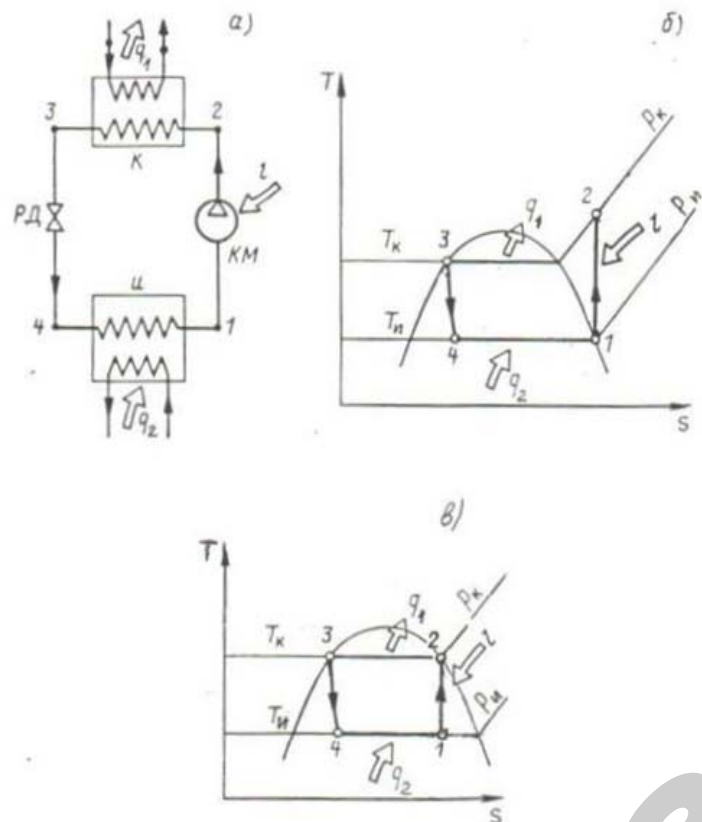


Рисунок 12.1 – Парокompрессионная холодильная машина.

a – принципиальная схема; *б* – цикл при полном испарении в испарителе;
в – цикл при неполном испарении в испарителе

В состав цикла входят следующие процессы:

- адиабатное сжатие 1–2 в компрессоре КМ;
- конденсация 2–3 в конденсаторе К;
- дросселирование 3–4 в регуляторе давления (терморегулирующем вентиле) РД;
- испарение 4–1 в испарителе И.

Холодильный агент на входе в компрессор может быть в состоянии влажного насыщенного пара с высокой степенью сухости, сухо насыщенного пара или перегретого пара (в зависимости от степени испарения холодильного агента в испарителе).

В холодильных машинах предусматривают перегрев пара холодильного агента перед компрессором и переохлаждение (до температур ниже температуры насыщения) конденсата после конденсатора. С этой целью устанавливают теплообменники-охладители конденсата, в которых за счет конденсата холодильного агента организуется перегрев пара после испарителя.

Наибольшее распространение в компрессионных холодильных машинах нашли аммиак и хладоны (фреоны). Они обладают низкими температурами кипения при давлениях несколько выше атмосферного и достаточно высокими температурами конденсации при давлениях, не превышающих 2 МПа.

При расчете термодинамических процессов в холодильных машинах используют таблицы и диаграммы свойств холодильных агентов (приложение К, таблицы К.1, К.2, К.3).

В приложении К даны таблицы термодинамических свойств хладона R12 и аммиака. При нахождении энтальпии жидких холодильных агентов допустимо использовать энтальпии жидкостей на линии насыщения при заданной температуре.

Параметры влажного насыщенного пара определяют по уравнениям (10.1), (10.2) и (10.3).

При расчете цикла парокompрессионной холодильной машины расчет количеств теплоты выполняют через разности энтальпий как для изобарных процессов подвода (отвода) теплоты. Учитывают особенность процесса дросселирования, заключающуюся в равенстве энтальпий до и после дросселирования: $h_3 = h_4$.

Удельная работа, затрачиваемая на привод компрессора,

$$l_{\text{пр}} = h_3 - h_4. \quad (12.1)$$

Холодильный коэффициент цикла

$$\varepsilon = \frac{h_1 - h_3}{h_2 - h_1}. \quad (12.2)$$

Массовый расход холодильного агента, кг/с,

$$m_t = \frac{\phi}{h_1 - h_4}, \quad (12.3)$$

где Φ – холодопроизводительность холодильной машины, кВт;
 h_1 и h_4 – удельные энтальпии холодильного агента, кДж/кг.

Теоретическую мощность привода компрессора, кВт, находят по уравнению (7.4) или по формуле:

$$N = \frac{\Phi}{\varepsilon}. \quad (12.4)$$

Решения типовых задач

Т.12.1. В компрессор холодильной машины поступает влажный насыщенный пар хладона R12 с температурой $t_1 = -16^\circ\text{C}$ и сжимается в адиабатном процессе до состояния сухого насыщенного пара при $t_2 = 30^\circ\text{C}$. После полной конденсации в конденсаторе хладон поступает в терморегулирующий вентиль.

Определить холодильный коэффициент, расход хладона, теоретическую мощность привода компрессора, если холодопроизводительность машины составляет 100 кВт.

Решение. Определяем по приложению К для хладона R12: при $t_2 = 30^\circ\text{C}$:

$$h_2 = h_2'' = 564,7 \text{ кДж/кг}; \quad s_2 = s_2'' = 4,547 \text{ кДж/(кг}\cdot\text{K)};$$

$$h_3 = h_2' = 429,1 \text{ кДж/кг}; \quad s_3 = s_2' = 4,01 \text{ кДж/(кг}\cdot\text{K)};$$

при $t_1 = -16^\circ\text{C}$:

$$h_1' = 385,1 \text{ кДж/кг}; \quad r_1 = 159,7 \text{ кДж/кг}; \quad s_1' = 3,944 \text{ кДж/(кг}\cdot\text{K)}.$$

Рассчитываем для влажного насыщенного пара на входе в компрессор:

– степень сухости пара по формуле (10.3) при $s_1 = s_2 = 4,547 \text{ кДж/(кг}\cdot\text{K)}$:

$$x_1 = (s_1 - s_1') \frac{T_1}{r_1} = (4,547 - 3,944) \times \frac{(-16 + 273)}{159,7} = 0,97;$$

– удельную энтальпию по уравнению (10.2):

$$h_1 = 385,1 + 0,97 \cdot 159,7 = 540 \text{ кДж/кг}.$$

По формулам (12.1), (12.2), (12.3) и (12.4) находим:

– удельную работу привода компрессора

$$l_{\text{пр}} = 564,7 - 540 = 24,7 \text{ кДж/кг};$$

– холодильный коэффициент

$$\varepsilon = \frac{540 - 429,1}{564,7 - 540} = 4,49;$$

– массовый расход хладона R12

$$m_t = \frac{100}{540 - 429,1} = 0,902 \text{ кг/с};$$

– теоретическую мощность привода

$$N = 0,902 \times 24,7 = 22,3 \text{ кВт}.$$

Т.12.2. В компрессор холодильной машины подается сухой насыщенный пар хладона R12 температурой $t_1 = -17^\circ\text{C}$ и сжимается адиабатно до давления, соответствующего температуре насыщения 30°C . В конденсаторе не предусмотрено переохлаждение конденсата. Холодопроизводительность принять равной 140 кВт.

Определить холодильный коэффициент и теоретическую мощность привода компрессора.

Решение. Цикл холодильной машины соответствует циклу, приведенному на рисунке 12.1, б.

Определяем параметры хладона по приложению К.

В точке 1 при $t_1 = -17^\circ\text{C}$ состояние сухого насыщенного пара:

$$p_1 = 0,17 \text{ МПа}; \quad h_1 = h''_1 = 544,4 \text{ кДж/кг}; \quad s_1 = s''_1 = 4,566 \text{ кДж/(кг}\cdot\text{K)}.$$

В точке 3 жидкость при температуре насыщения при $p_3 = 0,74 \text{ МПа}$:

$$h_3 = h_2' = 429,1 \text{ кДж/кг}; \quad t_3 = 30^\circ\text{C}.$$

В точке 2 состояние перегретого пара при давлении $p_2 = 0,74 \text{ МПа}$ и энтропии $s_2 = s_1 = 4,566 \text{ кДж/кг}$.

При заданных параметрах перегретого пара находим его термодинамические свойства, используя диаграмму свойств хладона R12 [6]:

$$t_2 = 35^\circ\text{C}; \quad h_2 = 571 \text{ кДж/кг}.$$

В точке 4 состояние влажного насыщенного пара при $p_4 = p_1 = 0,17 \text{ МПа}$:

$$h_4 = h_3 = 429,1 \text{ кДж/кг}.$$

Холодильный коэффициент по уравнению (12.2):

$$\varepsilon = \frac{544,4 - 429,1}{571 - 544,4} = 4,33.$$

Теоретическая мощность привода по формуле (12.4):

$$N = \frac{140}{4,33} = 32,2 \text{ кВт}.$$

Задачи

12.1. Найти массу влажного насыщенного пара хладона R12, заполняющего объем 2 м^3 при давлении $0,2 \text{ МПа}$. Степень сухости пара равна $0,8$.

12.2. Определить удельную теплоту перегрева пара аммиака, давление которого $0,19 \text{ МПа}$, а температура $30 \text{ }^\circ\text{C}$.

12.3. Сухой насыщенный пар аммиака сжимается адиабатно от начального давления $0,093 \text{ МПа}$ до конечного, равного $1,17 \text{ МПа}$.

Определить температуру сжатого хладона и удельную работу привода компрессора.

12.4. В аммиачной пароконденсационной холодильной машине температура пара после компрессора $120 \text{ }^\circ\text{C}$, а давление – $1,35 \text{ МПа}$. Температура жидкого аммиака перед терморегулирующим вентилем (регулятором давления) равна $30 \text{ }^\circ\text{C}$. Расход аммиака в холодильной машине составляет 500 кг/ч . Рассчитать расход охлаждающей воды в конденсаторе и охладителе конденсата, если ее температура повышается на $5 \text{ }^\circ\text{C}$ в процессах охлаждения и конденсации аммиачного пара, а также охлаждения жидкого аммиака.

12.5 Тепловая мощность (холодопроизводительность) холодильной машины 200 кВт , а холодильный коэффициент равен трем. Найти изменение температуры воды, охлаждающей конденсатор машины, если расход воды составляет 60 т/ч .

12.6. В баллоне вместимостью 50 л находится аммиак массой 5 кг при температуре $16 \text{ }^\circ\text{C}$. Определить давление в баллоне и массу жидкого аммиака.

12.7. Массовый расход аммиака в тракте холодильной машины 210 кг/ч .

Рассчитать диаметр всасывающего трубопровода на входе в компрессор, если температура аммиака $t = -15 \text{ }^\circ\text{C}$, а давление $p = 0,19 \text{ МПа}$. Скорость пара аммиака в трубопроводе принять равной $4,8 \text{ м/с}$.

12.8. Массовый расход хладона R12 равен 100 кг/ч . Найти диаметр нагнетательного трубопровода после компрессора, если пар хладона является сухим насыщенным при давлении 1 МПа . Скорость пара в трубопроводе составляет 1 м/с .

12.9. Теоретическая мощность компрессора аммиачной холодильной машины составляет 40 кВт . На выходе компрессора – сухой насыщенный пар при $t_2 = 25 \text{ }^\circ\text{C}$, а на входе – влажный насыщенный пар при $t_1 = -10 \text{ }^\circ\text{C}$.

Сжатие аммиака в компрессоре является адиабатным. Определить холодопроизводительность холодильной машины.

12.10. Выполнить расчет по условиям типовой задачи Т.12.1, если в качестве холодильного агента используется аммиак. Сравнить результаты расчета с вышеприведенными данными.

12.11. В качестве рабочего вещества холодильной машины используется хладон R12, который поступает в компрессор с температурой $t_1 = -20 \text{ }^\circ\text{C}$ и сжимается адиабатно до состояния сухого насыщенного пара при температуре $30 \text{ }^\circ\text{C}$.

Определить холодильный коэффициент и теоретический расход хладона при холодопроизводительности машины в 15 кВт .

12.12. Выполнить расчет по условиям типовой задачи Т.12.2, приняв в качестве холодильного агента аммиак. Сравнить полученные результаты с результатами решения типовой задачи. Для определения параметров аммиака использовать приложение К.

12.13. В компрессор холодильной машины поступает сухой насыщенный пар аммиака при температуре $t_1 = -15 \text{ }^\circ\text{C}$ и сжимается адиабатно до температуры $80 \text{ }^\circ\text{C}$.

Определить холодильный коэффициент при условии отсутствия переохлаждения конденсата.

12.14. Температура конденсации пара в конденсаторе аммиачной холодильной машины равна $45 \text{ }^\circ\text{C}$, а температура сухого насыщенного пара на входе в компрессор составляет $-20 \text{ }^\circ\text{C}$. Найти холодильный коэффициент, приняв процесс сжатия в компрессоре адиабатным.

12.15. Как изменится холодильный коэффициент в условиях предыдущей задачи, если предусмотреть охлаждение образующегося конденсата до $25 \text{ }^\circ\text{C}$?

Контрольная задача 7

В качестве рабочего вещества в холодильной машине холодопроизводительностью Φ , кВт, используется хладон R12, который при температуре t_1 поступает в компрессор и сжимается в адиабатном процессе до состояния сухого насыщенного пара при температуре t_2 . Конденсация хладона происходит полностью без переохлаждения конденсата перед терморегулирующим вентилем.

Найти холодильный коэффициент, массовый расход хладона и теоретическую мощность привода компрессора.

Изобразить цикл холодильной машины в масштабе в диаграмме Ts и ее схему.

Исходные данные приведены в таблице 12.1.

Таблица 12.1 – Исходные данные к контрольной задаче 7

Последняя цифра шифра	$t_1, ^\circ\text{C}$	Предпоследняя цифра шифра	$\Phi, \text{кВт}$	$t_2, ^\circ\text{C}$
1	0	1	10	15
2	-5	2	20	20
3	-10	3	30	25
4	-15	4	40	30
5	-18	5	50	35
6	-20	6	60	15
7	-25	7	80	20
8	-30	8	100	25
9	-35	9	120	30
0	-40	0	150	35

Контрольная задача 8

Рассчитать цикл (определить параметры в узловых точках, холодильный коэффициент, холодопроизводительность и теоретическую мощность привода компрессора) аммиачной холодильной машины. Температуру кипения t_1 , температуру конденсации t_2 и массовый расход аммиака m_1 принять по таблице 12.2.

Состояние пара на входе в компрессор – сухой насыщенный, переохлаждение конденсата отсутствует, сжатие пара является адиабатным.

Изобразить цикл в масштабе в диаграмме Ts .

Таблица 12.2 – Исходные данные к контрольной задаче 8

Последняя цифра шифра	$t_1, ^\circ\text{C}$	Предпоследняя цифра шифра	$m_1, \text{кг/ч}$	$t_2, ^\circ\text{C}$
1	-22	1	30	35
2	-35	2	50	30
3	-30	3	80	25
4	-25	4	100	20
5	-20	5	150	15
6	-18	6	200	35
7	-15	7	250	30
8	-10	8	300	25
9	-12	9	400	20
0	-28	0	500	15

13. ИСТЕЧЕНИЕ И ДРОССЕЛИРОВАНИЕ ГАЗОВ И ПАРОВ

Рассматривая процессы истечения и дросселирования газов и паров как процессы их движения по каналам переменного сечения в адиабатных условиях без совершения технической работы, записывают уравнение 1-ого закона термодинамики в следующей форме:

$$h_1 + \frac{w_1^2}{2} = h_2 + \frac{w_2^2}{2}, \quad (13.1)$$

где h_1 и h_2 – удельные энтальпии газов или паров на входе и выходе канала, Дж/кг; w_1 и w_2 – скорости газов и паров на входе и выходе канала, м/с.

Задачей расчета процесса истечения является определение скорости истечения (скорости газа на выходе из сопла) и массового расхода газа через сопло.

При истечении газов и паров из сопел, когда во многих случаях $w_2 \gg w_1$, скорость истечения, исходя из формулы (13.1):

$$w_2 = \sqrt{2(h_1 - h_2)}. \quad (13.2)$$

Если значения удельных энтальпий выражены в кДж/кг, то расчетная зависимость принимает вид

$$w_2 = 44,72\sqrt{h_1 - h_2}. \quad (13.2a)$$

Для идеальных газов с учетом особенностей адиабатного расширения

$$w_2 = \sqrt{2 \frac{k}{k-1} RT_1 \left(1 - \beta^{\frac{k-1}{k}}\right)}, \quad (13.3)$$

где k – показатель адиабаты; $\beta = p_2/p_1$ – отношение давлений газа на выходе и входе сопла.

Выполняя расчет истечения, надо знать отношение давлений β и учесть его влияние на процесс истечения и на выбор профиля сопла. Значение этого отношения следует сравнить с величиной критического отношения давлений $\beta_{кр}$, которую принимают в зависимости от атомности газов: для одноатомных равной 0,487, для двухатомных – 0,528; для трех- и многоатомных газов – 0,546.

При $\beta \geq \beta_{кр}$ предусматривают суживающееся сопло, расчет скорости истечения производят согласно зависимостям (13.2), (13.2а) и (13.3). При этом скорость истечения является дозвуковой и не превышает скорость распространения звука в газе при его параметрах в сечении на выходе сопла.

При $\beta = \beta_{кр}$ достигается критическая скорость истечения, равная скорости распространения звука в газе:

$$w_{2кр} = \sqrt{2(h_1 - h_{2кр})}, \quad (13.4)$$

где $h_{2кр}$ – критическое значение удельной энтальпии, Дж/кг, достигаемое при критическом отношении давлений $\beta_{кр}$ (при критическом давлении $p_{2кр} = \beta_{кр} p_1$).

В случае выражения удельных энтальпий в кДж/кг используют формулу

$$w_{2кр} = 44,72 \sqrt{h_1 - h_{2кр}}. \quad (13.4а)$$

Для идеальных газов:

$$w_{2кр} = \sqrt{2 \frac{k}{k+1} RT_1} = \sqrt{2 \frac{k}{k+1} p_1 v_1}. \quad (13.5)$$

При работе суживающихся сопел в условиях $\beta < \beta_{кр}$ расширение газов или паров в соплах происходит до критического давления и скорость истечения соответствует критической скорости.

При $\beta < \beta_{кр}$ используют сопла Лавала (комбинированные сопла с расширяющейся частью). При этом достигаются сверхзвуковые скорости истечения, а в минимальном сечении сопла устанавливаются критическое давление и критическая скорость, равная скорости распространения звука при параметрах газа в этом сечении.

Расчет скорости истечения выполняют по уравнениям (13.2), (13.2а) и (13.3), а критической скорости в минимальном сечении – по формулам (13.4), (13.4а) и (13.5).

Массовый расход газа через сопло рассчитывают по уравнению неразрывности:

– применительно к выходному сечению сопла

$$m_t = \frac{f_2 w_2}{v_2}, \quad (13.6)$$

где f_2 – площадь поперечного сечения на выходе сопла, м²; v_2 – удельный объем газа при давлении на выходе из сопла, м³/кг;

– применительно к минимальному сечению сопла Лавала или к выходному сечению сужающегося сопла при $\beta = \beta_{кр}$

$$m_t = \frac{f_{\min} w_{2кр}}{v_{2кр}} = \frac{f_2 w_{2кр}}{v_{2кр}}, \quad (13.7)$$

где $v_{2кр}$ – критический удельный объем, определенный при критическом давлении, м³/кг.

Удельные объемы находят по соотношениям для адиабатного процесса:

$$v_2 = v_1 / \beta^{\frac{1}{k}} \quad \text{или} \quad v_{2кр} = v_1 / \beta_{кр}^{\frac{1}{k}}. \quad (13.8)$$

Вышеприведенные зависимости позволяют рассчитывать площади и размеры поперечных сечений сопла. Длину расширяющейся части комбинированного сопла Лавала находят, принимая угол ее конусности α равным $10 \div 12^\circ$:

$$v_2 = \frac{d_2 - d_{\min}}{2 \operatorname{tg} \frac{\alpha}{2}}, \quad (13.9)$$

где d_2 – диаметр выходного сечения сопла.

Основной закономерностью процесса дросселирования газов и паров как процесса их перетекания через местные сужения является равенство энтальпий в начальном и конечном состояниях газа (пара):

$$h_2 = h_1. \quad (13.10)$$

При дросселировании увеличивается энтропия газа (пара), температура идеальных газов остается постоянной, а температура реальных газов может понижаться и повышаться в зависимости от их свойств, прежде всего от температуры инверсии.

Анализ и расчет процессов истечения и дросселирования водяного пара выполняют, используя диаграмму hs . При этом истечение представляют изотропным процессом, а дросселирование – изоэнтальпийным.

Решения типовых задач

Т.13.1. В резервуаре содержится кислород при температуре 100 °С и давлении 0,5 МПа. Кислород вытекает через суживающееся сопло в атмосферу, давление которой составляет 100 кПа. Определить скорость истечения и массовый расход газа через сопло при площади выходного сечения равной 100 мм².

Решение. Учитывая вышеизложенное в этом разделе, принимаем для кислорода по приложениям В и Г:

- удельную газовую постоянную $R = 259,8$ Дж/(кг·К);
- показатель адиабаты $k = 1,4$;
- критическое отношение давлений $\beta_{kp} = 0,528$.

Находим отношение давлений $\beta = p_2/p_1 = 100/500 = 0,2$, что меньше критического отношения. При условии $\beta < \beta_{kp}$ состояние газа на выходе суживающегося сопла характеризуется критическими условиями, при которых критическое давление: $p_{2kp} = \beta_{kp}p_1 = 0,528 \times 500 = 264$ кПа.

Критическую скорость истечения определяем по формуле (13.5):

$$w_{2kp} = \sqrt{2 \frac{1,4}{1,4+1} 259,8 \times (100 + 273,15)} = 336 \text{ м/с.}$$

Рассчитываем удельные объемы кислорода:

– в резервуаре по формуле (3.1)

$$v_1 = 259,8 \times 373,15 / (0,5 \times 10^6) = 0,194 \text{ м}^3/\text{кг};$$

– на выходе сопла по уравнению (13.8):

$$v_2 = 0,194 / 0,528^{1,4} = 0,306 \text{ м}^3/\text{кг}.$$

Массовый расход согласно зависимости (13.7):

$$m_t = \frac{100 \times 10^{-6} \times 336}{0,306} = 0,11 \text{ м/с.}$$

Т.13.2. Определить скорость истечения водяного пара из барабана котла через цилиндрическое отверстие. Давление пара в барабане котла составляет 1,2 МПа, а температура равна 300 °С. Истечение пара происходит в атмосферу давлением 100 кПа.

Решение. Цилиндрическое отверстие допустимо рассматривать как суживающееся сопло. Принимаем для водяного пара как для

трехатомного газа критическое отношение давлений $\beta_{kp} = 0,546$. Определяем отношение давлений $\beta = 0,1/1,2 = 0,083$, где давления пара: $p_2 = 0,1$ МПа и $p_1 = 1,2$ МПа.

В условиях задачи при $\beta < \beta_{kp}$ расширение пара будет происходить в отверстии до критического давления $p_{2kp} = 0,546 \times 1,2 = 0,66$ МПа, скорость истечения будет равна критической скорости.

При решении используем диаграмму водяного пара (приложение И). Находим точку 1, характеризующую состояние пара при давлении 1,2 МПа и температуре 300 °С. Определяем энтальпию $h_1 = 3060$ кДж/кг.

Из точки 1 проводим вертикальную линию адиабатного (изоэнтропного) расширения водяного пара до пересечения с изобарой при критическом давлении $p_{2kp} = 0,66$ МПа. Находим точку 2_{кр}, в которой $h_{2kp} = 2910$ кДж/кг.

Скорость истечения вычисляем по уравнению (13.4а):

$$w_{2kp} = 44,72 \sqrt{3060 - 2910} = 548 \text{ м/с.}$$

Задачи

13.1. Выполнить расчет в условиях типовой задачи Т.13.1, приняв истечение через сопло Лавалья. Найти площадь минимального сечения.

13.2. Найти скорость истечения и конечную температуру воздуха при истечении через суживающееся сопло при заданных параметрах: перед соплом $p_1 = 6$ МПа; $t_2 = 27$ °С и за соплом $p_2 = 4$ МПа.

13.3. Азот с параметрами: давление 0,8 МПа и температура 400 К вытекает из суживающегося сопла в среду с давлением 0,3 МПа. Рассчитать массовый расход азота при диаметре выходного сечения сопла в 5 мм.

13.4. При охлаждении аппарата предусмотрен его обдув воздухом, вытекающим из суживающихся сопел. Начальные параметры воздуха перед соплами: давление 1 МПа и температура 60 °С. Истечение происходит в атмосферу, давление атмосферного воздуха 100 кПа. Определить скорость истечения и температуру воздуха на выходе сопел.

13.5. Определить размеры расширяющейся части сопла Лавалья, если давление и температура водорода на входе в сопло составляют 0,7 МПа и 500 К. Истечение происходит в среду давлением 50 кПа. Расход газа равен 0,2 кг/с. Угол конусности принять равным 10°.

13.6. Воздух при давлении 1 МПа и температуре 300 °С вытекает из сопла Лавалья в среду с давлением 0,1 МПа. Определить размеры

расширяющейся части сопла при массовом расходе воздуха 14,4 т/ч и угле ее конусности равном 10° .

13.7. Рассчитать скорость истечения водяного пара из суживающегося сопла. Начальные параметры пара: давление 4 МПа и температура 450°C . Истечение происходит в среду давлением 0,2 МПа.

13.8. Водяной пар поступает к соплам при температуре 350°C и давлении 4,5 МПа и расширяется в соплах до давления 2,6 МПа. Выбрать тип сопла и определить суммарную площадь сечения сопел на выходе пара при массовом расходе пара через сопла 2 кг/с.

13.9. Водяной пар давлением 2 МПа и степенью сухости 0,9 дросселируется до давления 10 кПа. Охарактеризовать состояние пара после дросселирования и найти его температуры до и после дросселирования.

13.10. Водяной пар, начальное давление которого равно 1 МПа, а степень сухости равна 0,98, дросселируется до давления 0,12 МПа.

Определить изменение температуры пара в результате дросселирования.

13.11. Определить до какого давления необходимо дросселировать пар с начальными параметрами $p_1 = 1,2$ МПа, $x = 0,95$, чтобы пар стал сухим насыщенным. Определить температуру и энтальпию пара после дросселирования.

ОТВЕТЫ К ЗАДАЧАМ

- 1.1. 198 кВт·ч.
- 1.2. 645 кг/ч.
- 1.3. 12 кг.
- 1.4. 2,3 ч.
- 1.5. 9,5 кг/с.
- 1.6. 30 %.
- 1.7. 37 %.
- 1.8. 4,2 мин.
- 1.9. 5 кВт.
- 1.10. 78 %.
- 1.11. -3280 кДж, уменьшение в 2,1 раза.
- 1.12. Уменьшается на $14,1^\circ\text{C}$.
- 1.13. -1180 кДж/кг.
- 1.14. 517°C .
- 1.15. 10 МДж.
- 2.1. 0,52 кДж/К.
- 2.2. $-0,311$ кДж/К.
- 2.3. $-1,24$ кДж/К.
- 2.4. 30,3 кДж/К.
- 2.5. 3,6 кДж/К.
- 2.6. 0,24 кДж/К.
- 2.7. 2,8 кДж/К.
- 2.8. 850 кДж.
- 2.9. 3660 кДж.
- 3.1. $1,96$ кг/м³.
- 3.2. $50,9$ м³.
- 3.3. 502,6 кг.
- 3.4. 2.
- 3.5. 453,2 кг.
- 3.6. 15,3 мин.
- 3.7. 57,7 мин.
- 3.8. 66.
- 3.9. 5.
- 3.10. 4,3 ч.
- 3.11. 7310 м³.
- 3.12. 1 кг.
- 3.13. 0,54 м.
- 3.14. 0,19 и 0,81; 289 Дж/(кг·К); 21 и 79 кПа.

- 3.15. $0,83 \text{ кг/м}^3$.
 3.16. $0,94 \text{ кг/м}^3$; $1,02 \text{ кг/м}^3$.
 3.17. $0,51$ и $0,49$.
 3.18. $7,05 \text{ м}^3$.
 4.1. $1,01 \text{ кДж/(кг}\cdot\text{К)}$; $1,3 \text{ кДж/(м}^3\cdot\text{К)}$.
 4.2. $0,95$ и $1,33 \text{ кДж/(м}^3\cdot\text{К)}$.
 4.3. $0,88 \text{ МПа}$; $80 \text{ }^\circ\text{C}$.
 4.4. $427,3 \text{ К}$; $0,52 \text{ МПа}$.
 4.5. $1,1$ и $0,81 \text{ кДж/(кг}\cdot\text{К)}$.
 4.6. $22,4 \text{ МДж}$.
 5.1. Увеличивается на $0,042 \text{ МПа}$; 2225 кДж .
 5.2. $0,84 \text{ МПа}$.
 5.3. $798 \text{ }^\circ\text{C}$; $2,83 \text{ МПа}$.
 5.4. $27,5 \text{ кВт}$.
 5.5. $1,6 \text{ кг}$; 873 кДж и 978 кДж .
 5.6. -277 кДж .
 5.7. $0,31 \text{ МПа}$; -1000 кДж .
 5.8. $-32,7 \text{ }^\circ\text{C}$; $2,9 \text{ кг}$.
 5.9. 60 м/с ; $-84 \text{ }^\circ\text{C}$.
 5.10. Уменьшается в $1,9$ раза.
 5.11. 20 .
 5.12. 117 кДж/кг ; 234 кДж/кг ; $-0,65 \text{ кДж/(кг}\cdot\text{К)}$.
 5.13. $1,106$; -3150 кДж ; -2315 кДж .
 5.14. $1,302$; $16,56 \text{ МДж}$ и $4,06 \text{ МДж}$.
 5.15. 770 кДж/кг .
 5.16. 72 кДж/кг .
 5.17. $1,37$.
 5.18. $1,12$.
 5.19. $1,292$; $770,5 \text{ кДж}$ и $208,2 \text{ кДж}$.
 5.20. $0,7$; $34,4 \text{ кДж}$ и $45,6 \text{ кДж}$.
 6.1. 6 г/кг ; 35 кДж/кг ; $6,5 \text{ }^\circ\text{C}$.
 6.2. $3,7 \text{ г/кг}$; $24,5 \text{ кДж/кг}$; $6 \text{ }^\circ\text{C}$.
 6.3. $11,1 \text{ г/кг}$; $46,4 \text{ кДж/кг}$; $p_n = 1,75 \text{ кПа}$; $15,3 \text{ }^\circ\text{C}$.
 6.4. 79 кВт .
 6.5. 64 кВт .
 6.6. -440 МДж ; -101 кг .
 6.7. $13,9 \text{ г/кг}$; 75% ; $58,6 \text{ кДж/кг}$.
 6.8. $68,7 \text{ кДж/кг}$; 11 г/кг ; 24% ; 163 кг/кг .
 6.9. 7 кДж/г .
 6.10. $8,5 \text{ г/кг}$; 70% ; 38 кДж/кг .

- 6.11. 20 г/кг ; $35 \text{ }^\circ\text{C}$; 86 кДж/кг ; 55% .
 7.1. 22 кВт .
 7.2. 955 кг/ч .
 7.3. 473 кВт .
 7.4. $183 \text{ }^\circ\text{C}$; $267 \text{ м}^3/\text{ч}$; 130 кВт ; $2,23 \text{ т/ч}$.
 7.5. $15 \text{ }^\circ\text{C}$; $169 \text{ м}^3/\text{ч}$; $102,5 \text{ кВт}$; $5,87 \text{ т/ч}$.
 7.6. $32,5$, $42,4$ и $40,2 \text{ кВт}$.
 7.7. Увеличение на $10,7 \%$.
 7.8. Уменьшение в $1,12$ раза.
 7.9. $31,7$.
 8.1. $9,6\%$.
 8.2. 61% .
 8.1. 61% ; 373 кДж/кг .
 8.2. Теплота: 0 ; $435,3$; 0 ; -250 кДж/кг ; работа: $-154,4$; 0 ; $339,7$; 0 кДж/кг ; удельная работа цикла: $185,3 \text{ кДж/кг}$; 43% .
 8.3. 507 кДж/кг ; 66% .
 8.4. 61% .
 8.5. 62% .
 8.6. $9,6 \%$.
 8.7. 45% .
 9.1. 45% ; $149,5 \text{ кДж/кг}$.
 9.2. 40% ; $12,9 \text{ МВт}$.
 9.3. 40% ; $15,5 \text{ МВт}$.
 9.4. 45% ; 252 кДж/кг .
 9.5. 52% .
 10.1. 74 кг .
 10.2. 2610 кДж/кг .
 10.3. 790 кг/ч .
 10.4. 90 мм .
 10.5. 71 и 870 кг .
 10.6. 800 кг .
 10.7. В 115 раз.
 10.8. 46 кг/ч .
 10.9. 1325 кДж/кг ; -1096 кДж/кг .
 10.10. $1,8 \text{ т/ч}$.
 10.11. 65% .
 10.12. 32 кг .
 10.13. 90 кг/ч .
 11.1. 250 т/ч .
 11.2. 175 т/ч ; 35% .

- 11.3. 3 650 т/ч.
 11.4. 230 °С; 17 %.
 11.5. 43 %.
 11.6. 49 %.
 11.7. 371 кДж/кг; –550 кДж/кг; 350 °С.
 12.1. 30,4 кг.
 12.2. 114,2 кДж/кг.
 12.3. 151 °С; 389 кДж/кг.
 12.4. 9,14 кг/с.
 12.5. 3,8 °С.
 12.6. 0,75 МПа; 4,75 кг.
 12.7. 100 мм.
 12.8. 25 мм.
 12.9. 272 кВт.
 12.10. 5,1; 0,1 кг/с; 19,5 кВт.
 12.11. 4,17; 0,137 кг/с.
 12.12. 4,5; 31,1 кВт.
 12.13. 5,92.
 12.14. 2,96.
 12.15. 3,24.
 13.1. 500 м/с; 0,082 кг/с; 74,4 мм².
 13.2. 257 м/с; –5,8 °С.
 13.3. 372 м/с; 112 кг/ч.
 13.4. 334 м/с; 4 °С.
 13.5. $d_{min} = 20$ мм; $d_2 = 30,3$ мм; $b = 59$ мм.
 13.6. $d_{min} = 55,4$ мм; $d_2 = 77$ мм; $b = 123$ мм.
 13.7. 560 м/с.
 13.8. Суживающееся; 325 мм².
 13.9. 212 °С; 60 °С.
 13.10. Уменьшение на 50 °С.
 13.11. 0,13 МПа; 107 °С; 2685 кДж/кг.

ЛИТЕРАТУРА

1. Богданов, С.Н. Задачник по термодинамическим расчетам в пищевой и холодильной промышленности [Текст]: учеб. пособие для студентов вузов/ С. Н. Богданов, А. В. Куприянова. – Москва: Легкая и пищевая промышленность, 1983. – 144 с.
2. Нащокин, В.В. Техническая термодинамика и теплопередача [Текст]: учеб. пособие для вузов/ В. В. Нащокин. – Изд. 3-е, испр. и доп. – Москва: Высшая школа, 1980. – 469 с.: ил.
3. Рабинович, О.М. Сборник задач по технической термодинамике [Текст]: учебное пособие для техникумов/ О. М. Рабинович. – Изд. 5-е, переработанное. – Москва: Машиностроение, 1973. – 344 с.: ил.
4. Ривкин, С.Л. Теплофизические свойства воды и водяного пара [Текст]: справочник/ С.Л. Ривкин, А.А. Александров. – Москва: Энергия, 1980. – 424 с.: ил.
5. Сборник задач по технической термодинамике вузов [Текст]: учеб. пособие для вузов/ Т.Н. Андрианова [и др.]. – 3-е изд., перераб. и доп. – Москва: Энергоиздат, 1981. – 240 с.: ил.
6. Теплофизические основы получения искусственного холода [Текст]: справочник/ Сост. Н.А. Бучко [и др.]; Редкол. А.А. Гоголин [и др.]. – Москва: Пищевая промышленность, 1980. – 231 с.: ил.
7. Техническая термодинамика [Текст]: учебник для машиностроит. спец. вузов / В.И. Крутов [и др.]. – 3-е изд., перераб. и доп. – Москва: Высшая школа, 1991. – 384 с.: ил.

Приложение А

СПИСОК ОСНОВНЫХ ОБОЗНАЧЕНИЙ

c – удельная теплоемкость, Дж/(кг·К);
 c' – объемная теплоемкость, Дж/(м³·К);
 C_m – молярная теплоемкость, Дж/(моль·К);
 g_i – массовая доля компонента в смеси;
 h – удельная энтальпия, кДж/кг;
 k – показатель адиабаты;
 l – удельная работа, кДж/кг;
 L – работа системы (газа), кДж;
 m – масса, кг;
 m_t – массовый расход, кг/с;
 n – показатель политропы;
 p – давление, Па;
 q – удельная теплота, кДж/кг;
 Q – количество теплоты, кДж;
 r_i – объемная доля компонента в смеси;
 R – удельная газовая постоянная, Дж/(кг·К);
 s – удельная энтропия, кДж/(кг·К);
 t – температура, °С;
 T – термодинамическая температура, К;
 u – удельная внутренняя энергия, кДж/кг;
 U – внутренняя энергия, кДж;
 V – объем, м³;
 v – удельный объем, м³/кг;
 x – степень сухости;
 μ – молярная масса, кг/моль;
 η – коэффициент полезного действия.

Индексы:

верхние
 $'$ – жидкость при температуре насыщения;
 $''$ – сухой насыщенный пар;
нижние
 p – изобарный процесс;
 v – изохорный процесс;
 $см$ – газовая смесь;
 1 – начальное состояние вещества;
 2 – конечное состояние вещества.

Приложение Б

Титульный лист работы

БЕЛОРУССКИЙ ГОСУДАРСТВЕННЫЙ АГРАРНЫЙ
ТЕХНИЧЕСКИЙ УНИВЕРСИТЕТ

Кафедра энергетики

Расчетно-графическая работа № ___

по дисциплине «Техническая термодинамика»

Группа (номер)

Зачетная книжка (номер книжки)

Студент _____ (подпись) _____ (инициалы и фамилия)

 (дата)

Должность преподавателя, _____ (подпись) _____ (инициалы и фамилия)
ученая степень, ученое звание

 (дата)

Минск
2009

Приложение В

Молекулярные массы и газовые постоянные R , Дж/(кг·К),
некоторых газов

Газы	Химическая формула	Молекулярная масса	R
Азот	N ₂	28,01	296,8
Аммиак	NH ₃	17,03	488
Бутан	C ₄ H ₁₀	58,12	143
Водород	H ₂	2,02	4 124
Водяной пар	H ₂ O	18,02	461
Воздух	–	28,96	287
Двуокись углерода	CO ₂	44	189
Кислород	O ₂	32	259,8
Метан	CH ₄	16,04	518,2
Окись углерода	CO	28,01	296,8
Пропан	C ₃ H ₈	44,1	188,5
Этан	C ₂ H ₆	30,07	276,5
Этилен	C ₂ H ₄	28,05	296,4

Приложение Г

Приближенные значения молярных теплоемкостей,
Дж/(моль·К), и показателей адиабаты k

Газы	C_{mv}	C_{mp}	K
Одноатомные	12,5	20,8	1,67
Двухатомные	20,8	29,1	1,4
Трех- и многоатомные	29,1	37,4	1,29

Приложение Д

Теплофизические свойства некоторых материалов и веществ

Наименование	t , °С	ρ , кг/м ³	c , кДж/(кг·К)
Вода	20	1000	4,18
	50	990	4,18
	90	970	4,2
Водный лед	0	917	2,3
Зерно	20	800	2,2
Мазут	50	950	2,1
Сталь углеродистая	100	7800	0,5

Приложение Е

Средние изобарные удельные теплоемкости,
кДж/(кг·К), газов*

t , °С	Воздух	O ₂	N ₂	CO	CO ₂	H ₂	H ₂ O
0	1,0036	0,9148	1,0392	1,0396	0,8148	14,195	1,8594
100	1,0061	0,9232	1,0404	1,0417	0,8658	14,353	1,8728
200	1,0115	0,9353	1,0434	1,0463	0,9102	14,421	1,8937
300	1,0191	0,9500	1,0488	1,0538	0,9487	14,446	1,9192
400	1,0283	0,9651	1,0567	1,0634	0,9826	14,477	1,9477
500	1,0377	0,9793	1,0660	1,0748	1,0128	14,509	1,9778
600	1,0496	0,9927	1,0760	1,0861	1,0396	14,542	2,0092
700	1,0605	1,0048	1,0869	1,0978	1,0639	14,587	2,0419
800	1,0710	1,0157	1,0974	1,1091	1,0852	14,641	2,0754
900	1,0815	1,0258	1,1078	1,1200	1,1045	14,706	2,1097
1000	1,0907	1,0350	1,1179	1,1304	1,1225	14,776	2,1436
1100	1,0999	1,0434	1,1271	1,1401	1,1384	14,853	2,1771
1200	1,1082	1,0509	1,1359	1,1493	1,1530	14,934	2,2106
1300	1,1166	1,0580	1,1447	1,1577	1,1660	15,023	2,2449
1400	1,1242	1,0647	1,1526	1,1656	1,1782	15,113	2,2743
1500	1,1313	1,0714	1,1602	1,1731	1,1895	15,202	2,3048

*При расчете средних изохорных удельных теплоемкостей газов использовать уравнение (4.2).

Термодинамические свойства воды и водяного пара [4]

Таблица Ж.1 – Давление водяного пара на линии насыщения

$t_{сз}, ^\circ\text{C}$	$P_{сз}, \text{кПа}$	$t_{сз}, ^\circ\text{C}$	$P_{сз}, \text{кПа}$	$t_{сз}, ^\circ\text{C}$	$P_{сз}, \text{кПа}$	$t_{сз}, ^\circ\text{C}$	$P_{сз}, \text{кПа}$
-10	0,26	8	1,07	26	3,36	44	9,1
-8	0,31	10	1,23	28	3,78	46	10,00
-6	0,37	12	1,4	30	4,24	48	11,16
-4	0,44	14	1,6	32	4,75	50	12,33
-2	0,52	16	1,82	34	5,32	52	13,61
0	0,61	18	2,06	36	5,94	54	15,00
2	0,71	20	2,34	38	6,62	56	16,51
4	0,81	22	2,64	40	7,375	58	18,14
6	0,935	24	2,98	42	8,2	60	19,91

87

Таблица Ж.2 – Вода и водяной пар на линии насыщения

$P, \text{МПа}$	$t, ^\circ\text{C}$	$v', \text{м}^3/\text{кг}$	$v'', \text{м}^3/\text{кг}$	$h', \text{кДж/кг}$	$h'', \text{кДж/кг}$	$r, \text{кДж/кг}$	$S', \text{кДж}/(\text{кг}\cdot\text{K})$	$S'', \text{кДж}/(\text{кг}\cdot\text{K})$
0,003	24,09	0,00100	45,668	101,00	2542,2	2444,2	0,3543	8,5776
0,004	28,98	0,00100	34,803	121,41	2554,1	2432,7	0,4224	8,4747
0,005	32,90	0,00101	28,196	137,77	2561,2	2423,4	0,4762	8,3952
0,006	36,78	0,00101	23,742	151,5	2567,1	2415,6	0,5209	8,3305
0,007	39,02	0,000101	20,532	163,38	2572,2	2408,8	0,5591	8,276
0,008	41,53	0,00101	18,106	173,87	2576,7	2402,8	0,5926	8,2289
0,009	43,79	0,00101	16,206	183,28	2580,8	2397,5	0,6224	8,1875
0,01	45,83	0,00101	14,676	191,84	2584,4	2392,6	0,6493	8,1505
0,02	60,09	0,00102	7,6515	251,46	2609,6	2358,1	0,8321	7,9092
0,03	69,12	0,00102	5,2308	289,31	2625,3	2336,0	0,9441	7,7695
0,04	75,89	0,00103	3,9949	317,65	2636,8	2319,2	1,0261	7,6711
0,05	81,35	0,00103	3,2415	340,57	2646,0	2305,4	1,0912	7,5951
0,075	91,78	0,00104	2,2179	384,45	2663,2	2278,8	1,2132	7,4577
0,1	99,63	0,00104	1,6946	417,51	2675,7	2258,2	1,3027	7,3608
0,15	113,37	0,00105	1,1597	467,13	2693,9	2226,8	1,4336	7,2248
0,17	115,17	0,00106	1,0315	483,22	2699,5	2216,3	1,4752	7,1829
0,2	120,23	0,00106	0,88592	504,7	2706,9	2202,2	1,5468	7,1123
0,4	143,62	0,00108	0,46242	604,7	2738,5	2133,8	1,7764	6,8966
0,6	158,84	0,0011	0,31556	670,4	2756,4	2086,0	1,9308	6,7598
0,8	170,42	0,00111	0,2403	720,9	2768,4	2047,5	2,0457	6,6618

88

P , МПа	t , °С	v' , м ³ /кг	v'' , м ³ /кг	h' , кДж/кг	h'' , кДж/кг	r , кДж/кг	S' , кДж/(кг·К)	S'' , кДж/(кг·К)
1,0	179,88	0,00113	0,1943	762,6	2777	2014,4	2,1382	6,5847
2,0	212,37	0,00118	0,09953	908,60	2797,4	1888,8	2,4468	6,3373
2,5	223,94	0,00119	0,07990	962,00	2800,8	1838,8	2,5543	6,2536
3,0	233,84	0,00122	0,06662	1008,4	2801,9	1793,5	2,6455	6,1832
3,5	242,54	0,00123	0,05702	1049,8	2801,3	1751,5	2,7253	6,1218
4,0	250,33	0,00125	0,04974	1087,5	2799,4	1711,9	2,7967	6,0670
4,5	257,41	0,00127	0,04402	1122,2	2796,5	1674,3	2,8614	6,0171
5,0	263,92	0,00129	0,03941	1154,6	2792,8	1638,2	2,9209	5,9712

Таблица Ж.3 – Перегретый водяной пар

t , °С	v , м ³ /кг	h , кДж/кг	S , кДж/(кг·К)	v , м ³ /кг	h , кДж/кг	S , кДж/(кг·К)
$p = 1,5$ МПа				$p = 2$ МПа		
400	0,2030	3256,1	7,2701	0,1512	3248,1	7,1285
410	0,2062	3277,7	7,3020	0,1536	3270,0	7,1609
420	0,2095	3299,3	7,3334	0,1561	3291,9	7,1927
430	0,2127	3320,9	7,3644	0,1586	3313,8	7,2241
440	0,2159	3342,6	7,3949	0,1610	3335,8	7,2550
450	0,2191	3364,2	7,4250	0,1635	3357,7	7,2855
460	0,2233	3385,9	7,4548	0,1659	3379,6	7,3156
470	0,2255	3407,6	7,4842	0,1684	3401,5	7,3454
480	0,2287	3429,3	7,5132	0,1708	3423,5	7,3747

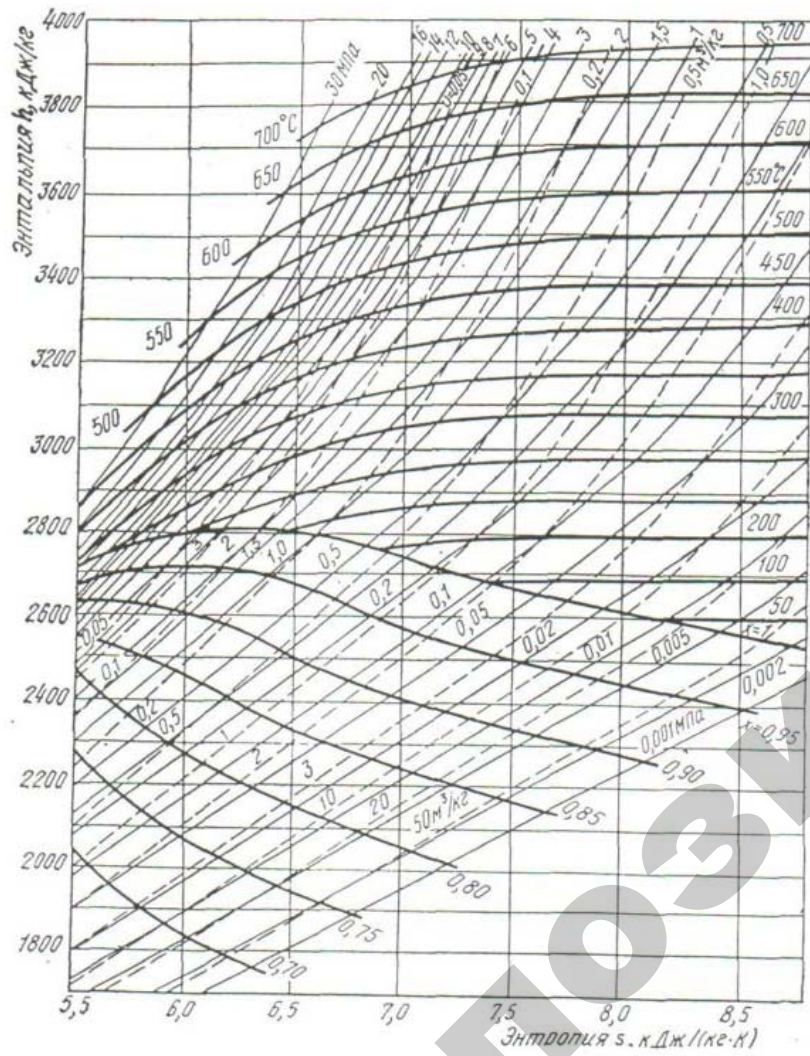
Продолжение таблицы Ж.3

t , °С	v , м ³ /кг	h , кДж/кг	S , кДж/(кг·К)	v , м ³ /кг	h , кДж/кг	S , кДж/(кг·К)
490	0,2319	3451,1	7,5420	0,1732	3445,4	7,4037
500	0,2351	3472,9	7,5703	0,1756	3467,4	7,4323
550	0,2509	3582,5	7,7078	0,1876	3578,0	7,5708
$p = 2,5$ МПа				$p = 3$ МПа		
400	0,1201	3239,9	7,0165	0,09933	3231,6	6,9231
410	0,1221	3262,2	7,0494	0,10105	3254,3	6,9566
420	0,1241	3284,5	7,0817	0,10276	3276,9	6,9894
430	0,1261	3306,7	7,1135	0,1045	3299,4	7,0217
440	0,1281	3328,9	7,1449	0,1061	3321,9	7,0535
450	0,1301	3351,0	7,1758	0,1078	3344,4	7,0847
460	0,1321	3373,2	7,2062	0,1095	3366,8	7,1155
470	0,1340	3395,4	7,2362	0,1112	3389,2	7,1459
480	0,1360	3417,5	7,2659	0,1128	3411,6	7,1758
490	0,1380	3439,7	7,2951	0,1145	3434,0	7,2054
500	0,1399	3461,9	7,3240	0,1161	3456,4	7,2345
550	0,1496	3573,3	7,4636	0,1243	3568,6	7,3752
$p = 3,5$ МПа				$p = 4$ МПа		
400	0,08451	3223,1	6,8426	0,07339	3214,5	6,7713
410	0,08602	3246,2	6,8766	0,07473	3238,0	6,8060
420	0,08751	3269,2	6,9100	0,07606	3261,4	6,8399
430	0,08899	3292,0	6,9427	0,07738	3284,6	6,8732
440	0,09046	3314,8	6,9747	0,07869	3307,7	6,9058

$t, ^\circ\text{C}$	$v, \text{м}^3/\text{кг}$	$h, \text{кДж/кг}$	$S, \text{кДж}/(\text{кг}\cdot\text{К})$		$v, \text{м}^3/\text{кг}$	$h, \text{кДж/кг}$	$S, \text{кДж}/(\text{кг}\cdot\text{К})$
450	0,09192	3337,6	7,0066		0,07999	3330,7	6,9379
460	0,09338	3360,3	7,0378		0,08128	3353,7	6,9694
470	0,09483	3382,9	7,0684		0,08257	3376,6	7,0005
480	0,09627	3405,6	7,0987		0,08384	3399,5	7,0310
490	0,09770	3428,2	7,1285		0,08512	3422,3	7,0612
500	0,09913	3450,8	7,1580		0,08638	3445,2	7,0909
550	0,1062	3563,9	7,2998		0,09264	3559,2	7,2338
$p = 4,5 \text{ МПа}$					$p = 5 \text{ МПа}$		
400	0,06473	3205,8	6,7071		0,05780	3196,9	6,6486
410	0,06595	3229,7	6,7425		0,05891	3221,3	6,6845
420	0,06715	3253,5	6,7770		0,06002	3245,4	6,7196
430	0,06834	3277,0	6,8107		0,06111	3269,4	6,7539
440	0,06953	3300,5	6,8438		0,06220	3293,2	6,7875
450	0,07070	3323,8	6,8763		0,06327	3316,8	6,8204
460	0,07187	3347,1	6,9083		0,06434	3340,4	6,8528
470	0,07303	3370,3	6,9397		0,06539	3363,8	6,8846
480	0,07418	3393,4	6,9706		0,06644	3387,2	6,9158
490	0,07532	3416,5	7,0010		0,06749	3410,5	6,9465
500	0,07646	3439,5	7,0310		0,06853	3433,8	6,9768
550	0,08208	3554,4	7,1751		0,07363	3549,6	7,1221

Приложение И

Диаграмма h_s водяного пара



Термодинамические свойства холодильных агентов

Таблица К.1 – Хладон R12 на линии насыщения

$t, ^\circ\text{C}$	$p, \text{МПа}$	$\rho', \text{кг/м}^3$	$\nu'', \text{м}^3/\text{кг}$	$h', \text{кДж/кг}$	$h'', \text{кДж/кг}$	$r, \text{кДж/кг}$	$S', \text{кДж/(кг}\cdot\text{К)}$	$S'', \text{кДж/(кг}\cdot\text{К)}$
-40	0,0643	1520	0,242	363,3	533,6	170,3	3,856	4,586
-38	0,0706	1512	0,222	365,1	534,5	169,4	3,863	4,584
-36	0,0773	1506	0,204	366,9	535,5	168,6	3,871	4,582
-34	0,0846	1500	0,188	368,7	536,4	167,7	3,878	4,580
-32	0,0923	1495	0,173	370,5	537,4	166,9	3,886	4,578
-30	0,101	1489	0,159	372,3	538,3	166,0	3,893	4,576
-28	0,109	1483	0,147	374,1	539,2	165,1	3,901	4,574
-26	0,119	1477	0,137	375,9	540,2	164,3	3,908	4,573
-24	0,129	1471	0,127	377,7	541,1	163,4	3,915	4,571
-22	0,140	1465	0,117	379,6	542,0	162,4	3,922	4,569
-20	0,151	1459	0,109	381,4	543,0	161,6	3,930	4,568
-18	0,163	1453	0,102	383,2	543,9	160,7	3,937	4,567
-16	0,176	1447	0,0945	385,1	544,8	159,7	3,944	4,565
-14	0,189	1440	0,0881	386,9	545,7	158,8	3,951	4,564
-12	0,204	1434	0,0823	388,8	546,6	157,8	3,958	4,563
-10	0,220	1428	0,0769	390,6	547,5	156,9	3,965	4,562
-8	0,236	1422	0,0719	392,5	548,5	156,0	3,972	4,561

Продолжение таблицы К.1

$t, ^\circ\text{C}$	$p, \text{МПа}$	$\rho', \text{кг/м}^3$	$\nu'', \text{м}^3/\text{кг}$	$h', \text{кДж/кг}$	$h'', \text{кДж/кг}$	$r, \text{кДж/кг}$	$S', \text{кДж/(кг}\cdot\text{К)}$	$S'', \text{кДж/(кг}\cdot\text{К)}$
-6	0,253	1415	0,0674	394,4	549,4	155,0	3,979	4,560
-4	0,271	1409	0,0632	396,2	550,3	154,1	3,986	4,558
-2	0,289	1402	0,0593	398,1	551,2	153,1	3,993	4,558
0	0,309	1396	0,0557	400	552,1	152,1	4,000	4,557
2	0,330	1389	0,0523	401,9	553,0	151,1	4,007	4,556
4	0,352	1383	0,0492	403,8	553,8	150,0	4,021	4,554
6	0,375	1376	0,0464	405,7	554,7	149,0	4,021	4,554
8	0,398	1369	0,0437	407,6	555,6	148,0	4,027	4,554
10	0,424	1362	0,0412	409,5	556,4	146,9	4,034	4,553
12	0,450	1356	0,0389	411,5	557,3	145,8	4,041	4,552
14	0,477	1349	0,0367	413,4	558,2	144,8	4,047	4,552
16	0,506	1342	0,0347	415,3	559,0	143,7	4,054	4,551
18	0,536	1335	0,0328	417,3	559,9	142,6	4,061	4,550
20	0,567	1327	0,0311	419,2	560,7	141,5	4,067	4,550
22	0,599	1320	0,0294	421,2	561,5	140,3	4,074	4,549
24	0,633	1313	0,0279	423,1	562,3	139,2	4,080	4,549
26	0,669	1306	0,0264	425,1	563,1	138,0	4,087	4,548
28	0,705	1298	0,0250	427,1	563,9	136,8	4,093	4,548
30	0,744	1291	0,0238	429,1	564,7	135,6	4,010	4,547

$t, ^\circ\text{C}$	$p, \text{МПа}$	$\rho', \text{кг/м}^3$	$v'', \text{м}^3/\text{кг}$	$h', \text{кДж/кг}$	$h'', \text{кДж/кг}$	$r, \text{кДж/кг}$	$S', \text{кДж/(кг}\cdot\text{К)}$	$S'', \text{кДж/(кг}\cdot\text{К)}$
32	0,783	1283	0,0226	431,1	565,5	134,4	4,106	4,547
34	0,824	1275	0,0214	433,1	566,3	133,2	4,113	4,546
36	0,867	1268	0,0204	435,1	567,0	131,9	4,119	4,546
38	0,912	1260	0,0194	437,2	567,8	130,6	4,126	4,545
40	0,958	1252	0,0184	439,2	568,5	129,3	4,132	4,545
42	1,005	1244	0,0175	441,2	569,2	128,0	4,138	4,544
44	1,055	1235	0,0167	443,3	569,8	126,6	4,145	4,544
46	1,106	1227	0,0159	445,3	570,6	125,3	4,151	4,544
48	1,159	1219	0,0151	447,4	571,2	123,8	4,158	4,543
50	1,214	1210	0,0144	449,5	571,9	122,4	4,164	4,543

Таблица К.2 – Аммиак на линии насыщения

$t, ^\circ\text{C}$	$p, \text{МПа}$	$v' \times 10^3, \text{м}^3/\text{кг}$	$v'', \text{м}^3/\text{кг}$	$h', \text{кДж/кг}$	$h'', \text{кДж/кг}$	$r, \text{кДж/кг}$	$S', \text{кДж/(кг}\cdot\text{К)}$	$S'', \text{кДж/(кг}\cdot\text{К)}$
40	1,555	1,726	0,0831	690,2	1786,2	1099,1	2,6429	6,1526
39	1,5128	1,721	0,0854	685,2	1788,9	1103,7	2,6274	6,1632
38	1,4741	1,716	0,0879	680,3	1788,6	1108,3	2,6118	6,1738
37	1,4302	1,712	0,0903	675,4	1788,3	1112,9	2,5963	6,1845
36	1,3901	1,707	0,0929	670,5	1787,9	1117,4	2,5807	6,1952
35	1,3510	1,702	0,0956	665,6	1787,6	1121,9	2,5650	6,2059
34	1,3126	1,698	0,0984	660,7	1787,1	1126,4	2,5494	6,2167
33	1,2751	1,693	0,1013	655,9	1786,7	1130,8	2,5337	6,2275
32	1,2384	1,689	0,1042	651,0	1786,3	1135,3	2,5180	6,2384
31	1,2025	1,685	0,1073	646,2	1785,8	1139,6	2,5023	6,2493
30	1,1675	1,680	0,1104	641,3	1785,3	1144,0	2,4866	6,2602
29	1,1331	1,676	0,1137	635,5	1784,8	1148,3	2,4708	6,2712
28	1,0996	1,672	0,1171	631,7	1784,2	1152,6	2,4550	6,2823
27	1,0668	1,668	0,1206	626,9	1783,7	1156,8	2,4392	6,2934
26	1,0348	1,663	0,1243	622,1	1783,1	1161,0	2,4234	6,3045
25	1,0035	1,659	0,1280	617,3	1782,5	1165,2	2,4075	6,3157
24	0,9729	1,655	0,1320	612,5	1781,9	1169,4	2,3916	6,3270
23	0,9431	1,651	0,1360	607,7	1781,5	1173,5	2,3757	6,3383
22	0,9139	1,647	0,1402	603,0	1780,6	1177,6	2,3598	6,3497
21	0,8855	1,643	0,1446	598,2	1779,9	1181,7	2,3438	6,3611
20	0,8577	1,639	0,1491	593,5	1779,2	1185,8	2,3278	6,3727

Продолжение таблицы К.2

$t, ^\circ\text{C}$	$p, \text{МПа}$	$v' \times 103, \text{м}^3/\text{кг}$	$v'', \text{м}^3/\text{кг}$	$h', \text{кДж/кг}$	$h'', \text{кДж/кг}$	$r, \text{кДж/кг}$	$S', \text{кДж}/(\text{кг}\cdot\text{К})$	$S'', \text{кДж}/(\text{кг}\cdot\text{К})$
19	0,8306	1,635	0,1538	588,7	1778,5	1189,8	2,3117	6,3842
18	0,8042	1,631	0,1587	584,0	1777,8	1193,8	2,2956	6,3959
17	0,7784	1,627	0,1638	579,3	1777,0	1197,8	2,2795	6,4076
16	0,7533	1,623	0,1690	574,6	1776,2	1201,7	2,2634	6,4193
15	0,7288	1,619	0,1745	569,8	1775,4	1205,0	2,2472	6,4312
14	0,7049	1,616	0,1802	565,3	1774,6	1209,5	2,2310	6,4431
13	0,6816	1,612	0,1861	560,4	1773,8	1213,4	2,2148	6,4551
12	0,6589	1,608	0,1922	555,8	1773,0	1217,2	2,1985	6,4672
11	0,6368	1,605	0,1986	552,1	1772,1	1221,0	2,1821	6,4793
10	0,6153	1,601	0,2052	546,4	1771,2	1224,8	2,1658	6,4915
9	0,5943	1,597	0,2122	541,7	1770,3	1228,6	2,1494	6,5038
8	0,5739	1,594	0,2193	537,1	1769,4	1232,4	2,1330	6,5162
7	0,5540	1,590	0,2269	532,4	1768,5	1236,1	2,1165	6,5287
6	0,5347	1,587	0,2347	527,8	1767,5	1239,8	2,1000	6,5412
5	0,5159	1,583	0,2428	523,1	1766,6	1243,5	2,0834	6,5539
4	0,4977	1,580	0,2512	518,5	1765,6	1247,1	2,0668	6,5666
3	0,4799	1,576	0,2601	513,9	1764,6	1250,8	2,0502	6,5794
2	0,4626	1,573	0,2693	509,2	1763,6	1254,4	2,0335	6,5924
1	0,4458	1,569	0,2789	504,6	1762,6	1258,0	2,0168	6,6054
0	0,4295	1,566	0,2890	500,0	1761,5	1261,5	2,0000	6,6185
-1	0,4137	1,563	0,2995	495,4	1760,5	1265,1	1,9832	6,6317
-2	0,3983	1,559	0,3105	490,8	1759,4	1268,6	1,9664	6,6450

Продолжение таблицы К.2

$t, ^\circ\text{C}$	$p, \text{МПа}$	$v' \times 103, \text{м}^3/\text{кг}$	$v'', \text{м}^3/\text{кг}$	$h', \text{кДж/кг}$	$h'', \text{кДж/кг}$	$r, \text{кДж/кг}$	$S', \text{кДж}/(\text{кг}\cdot\text{К})$	$S'', \text{кДж}/(\text{кг}\cdot\text{К})$
-3	0,3834	1,556	0,3218	486,2	1758,3	1272,1	1,9495	6,6584
-4	0,3689	1,553	0,3338	481,6	1757,2	1275,6	1,9326	6,6719
-5	0,3549	1,550	0,3463	477,0	1756,1	1279,0	1,9136	6,6855
-6	0,3412	1,546	0,3593	472,4	1754,9	1282,5	1,8985	6,6992
-7	0,3280	1,543	0,3730	467,9	1753,8	1285,9	1,8815	6,7130
-8	0,3152	1,540	0,3873	463,3	1752,6	1289,3	1,8643	6,7269
-9	0,3028	1,537	0,4022	458,7	1751,4	1292,7	1,8472	6,7410
-10	0,2908	1,534	0,4179	454,2	1750,2	1296,1	1,8299	6,7552
-11	0,2791	1,531	0,4342	449,6	1749,0	1299,4	1,8127	6,7694
-12	0,2679	1,527	0,4515	445,1	1747,8	1302,8	1,7953	6,7838
-13	0,2570	1,524	0,4695	440,5	1746,6	1306,1	1,7779	6,7983
-14	0,2464	1,521	0,4883	436,0	1745,3	1309,3	1,7606	6,8130
-15	0,2362	1,518	0,5081	431,4	1744,1	1312,6	1,7431	6,8277
-16	0,2263	1,515	0,5291	426,9	1742,8	1315,9	1,7255	6,8426
-17	0,2168	1,512	0,5510	422,4	1741,5	1319,1	1,7079	6,8577
-18	0,2076	1,509	0,5737	417,9	1740,2	1322,3	1,6903	6,8728
-19	0,1987	1,506	0,5977	413,3	1738,9	1325,5	1,6726	6,8881
-20	0,1901	1,504	0,6230	408,8	1737,5	1328,7	1,6548	6,9035
-21	0,1818	1,501	0,6498	404,3	1736,2	1331,9	1,6370	6,9191
-22	0,1738	1,498	0,6780	399,8	1734,8	1335,0	1,6192	6,9348
-23	0,1661	1,495	0,7072	395,3	1733,4	1338,1	1,6013	6,9506

$t, ^\circ\text{C}$	$p, \text{МПа}$	$v' \times 10^3, \text{м}^3/\text{кг}$	$v'', \text{м}^3/\text{кг}$	$h', \text{кДж/кг}$	$h'', \text{кДж/кг}$	$r, \text{кДж/кг}$	$S', \text{кДж/(кг}\cdot\text{К)}$	$S'', \text{кДж/(кг}\cdot\text{К)}$
-24	0,1586	1,492	0,7386	390,8	1732,1	1341,2	1,5833	6,9666
-25	0,1515	1,489	0,7710	386,3	1730,7	1344,4	1,5653	6,9828
-26	0,1446	1,486	0,8058	381,8	1729,3	1347,4	1,5472	6,9991
-27	0,1379	1,484	0,8418	377,4	1727,8	1350,5	1,5290	7,0155
-28	0,1315	1,481	0,8803	372,9	1726,4	1353,5	1,5108	7,0321
-29	0,1253	1,478	0,9208	368,4	1725,0	1356,6	1,4926	7,0489
-30	0,1194	1,475	0,9634	363,9	1723,5	1359,6	1,4742	7,0658
-31	0,1137	1,473	1,0085	359,4	1722,0	1362,6	1,4558	7,0829
-32	0,1082	1,470	1,0562	355,0	1720,5	1365,6	1,4374	7,1001
-33	0,1030	1,467	1,1066	350,5	1719,0	1368,5	1,4189	7,1176
-34	0,0979	1,464	1,1598	346,0	1717,5	1371,5	1,4003	7,1351
-35	0,0931	1,462	1,2162	341,6	1716,0	1374,4	1,3816	7,1529
-36	0,0884	1,459	1,2760	337,1	1714,5	1377,4	1,3629	7,1709
-37	0,0839	1,457	1,3392	332,7	1713,0	1380,3	1,3441	7,1890
-38	0,0797	1,454	1,4063	328,2	1711,4	1383,2	1,3253	7,2073
-39	0,0756	1,451	1,4775	323,8	1709,8	1386,0	1,3064	7,2259
-40	0,0716	1,449	1,5530	319,4	1708,3	1388,9	1,2874	7,2446

Таблица К.3 – Перегретый пар аммиака

$t, ^\circ\text{C}$	$v, \text{м}^3/\text{кг}$	$h, \text{кДж/кг}$	$S, \text{кДж/(кг}\cdot\text{К)}$	$v, \text{м}^3/\text{кг}$	$h, \text{кДж/кг}$	$S, \text{кДж/(кг}\cdot\text{К)}$
$P = 0,072 \text{ МПа } (t_s = -40 ^\circ\text{C})$				$p = 0,072 \text{ МПа } (t_s = -35 ^\circ\text{C})$		
-35	1,590	1719,2	7,291	—	—	—
-30	1,626	1730,0	7,336	1,245	1727,1	7,189
-25	1,662	1740,8	7,380	1,273	1738,1	7,244
-15	1,734	1762,3	7,465	1,329	1760,0	7,330
-5	1,805	1783,8	7,546	1,384	1781,8	7,413
0	1,840	1794,5	7,586	1,412	1792,6	7,453
10	1,910	1815,9	7,663	1,467	1814,2	7,531
20	1,980	1837,3	7,737	1,521	1835,8	7,606
30	2,050	1858,8	7,809	1,575	1857,5	7,678
40	2,120	1880,3	7,879	1,629	1879,2	7,749
50	2,189	1902,0	7,947	1,682	1901,0	7,817
$p = 0,12 \text{ МПа } (t_s = -30 ^\circ\text{C})$				$p = 0,15 \text{ МПа } (t_s = -25 ^\circ\text{C})$		
-25	0,986	1734,8	7,112	—	—	—
-15	1,030	1757,2	7,200	0,807	1753,6	7,073
-5	1,074	1779,3	7,284	0,842	1776,2	7,159
0	1,096	1790,3	7,325	0,860	1787,4	7,201
10	1,139	1812,2	7,404	0,894	1809,7	7,281
20	1,182	1834,1	7,480	0,928	1831,9	7,358
30	1,224	1855,9	7,553	0,962	1854,0	7,432
40	1,267	1877,8	7,624	0,996	1876,1	7,504
50	1,309	1899,7	7,693	1,029	1898,2	7,573

Продолжение таблицы К.3

$t, ^\circ\text{C}$	$\nu, \text{м}^3/\text{кг}$	$h, \text{кДж}/\text{кг}$	$S, \text{кДж}/(\text{кг}\cdot\text{К})$	$\nu, \text{м}^3/\text{кг}$	$h, \text{кДж}/\text{кг}$	$S, \text{кДж}/(\text{кг}\cdot\text{К})$
$p = 0,19 \text{ МПа } (t_s = -20 ^\circ\text{C})$				$p = 0,24 \text{ МПа } (t_s = -15 ^\circ\text{C})$		
-15	0,638	1749,3	6,950	—	—	—
-10	0,652	1761,0	6,994	0,520	1756,1	6,874
-5	0,667	1772,5	7,038	0,532	1768,0	6,919
0	0,681	1784,0	7,080	0,544	1779,8	7,962
5	0,695	1795,4	7,122	0,555	1791,5	7,005
10	0,709	1806,7	7,162	0,566	1803,1	7,046
15	0,722	1818,0	7,201	0,578	1814,6	7,086
20	0,736	1829,3	7,240	0,589	1826,1	7,126
30	0,764	1851,7	7,315	0,612	1848,8	7,202
40	0,790	1874,0	7,338	0,634	1871,5	7,276
50	0,818	1896,3	7,458	0,656	1894,1	7,347
$p = 0,86 \text{ МПа } (t_s = 20 ^\circ\text{C})$				$p = 1,003 \text{ МПа } (t_s = 25 ^\circ\text{C})$		
25	0,153	1793,8	6,422	—	—	—
30	0,157	1808,1	6,47	0,131	1797,6	6,366
35	0,16	1822	6,515	0,135	1812,3	6,414
40	0,164	1835,7	6,559	0,138	1826,6	6,46
45	0,168	1849,1	6,602	0,141	1840,7	6,505
50	0,171	1862,4	6,643	0,144	1854,4	6,548
55	0,175	1875,4	6,683	0,147	1868	6,589
60	0,178	1888,3	6,772	0,15	1881,3	6,629
70	0,185	1913,7	6,797	0,156	1907,5	6,707

101

Продолжение таблицы К.3

$t, ^\circ\text{C}$	$\nu, \text{м}^3/\text{кг}$	$h, \text{кДж}/\text{кг}$	$S, \text{кДж}/(\text{кг}\cdot\text{К})$	$\nu, \text{м}^3/\text{кг}$	$h, \text{кДж}/\text{кг}$	$S, \text{кДж}/(\text{кг}\cdot\text{К})$
80	0,191	1938,8	6,869	0,162	1933,1	6,781
90	0,198	1963,5	6,938	0,168	1958,4	6,851
100	0,204	1988,1	7,005	0,173	1983,4	6,919
110	0,21	2912,5	7,069	0,179	2008,2	6,985
120	0,217	2036,8	7,132	0,184	2032,9	7,048
135	0,226	2073,2	7,223	0,192	2069,8	7,14
$p = 1,17 \text{ МПа } (t_s = 30 ^\circ\text{C})$				$p = 1,35 \text{ МПа } (t_s = 35 ^\circ\text{C})$		
40	0,116	1816,1	6,36	0,0983	1803,7	6,258
45	0,119	1830,8	6,407	0,101	1819,4	6,308
50	0,122	1845,2	6,452	0,104	1834,6	6,355
55	0,125	1859,4	6,495	0,106	1849,4	6,401
60	0,128	1873,2	6,537	0,108	1863,9	6,444
65	0,13	1886,9	6,578	0,111	1878,1	6,487
70	0,133	1900,3	6,617	0,113	1892,1	6,528
80	0,138	1926,7	6,693	0,118	1919,3	6,606
90	0,143	1852,6	6,765	0,122	1946,0	6,680
100	0,148	1978,1	6,835	0,126	1972,1	6,751
110	0,152	2003,4	6,902	0,131	1977,9	6,820
120	0,157	2028,4	6,966	0,135	2023,4	6,885
135	0,164	2065,8	7,059	0,141	2061,3	6,980

102

$t, ^\circ\text{C}$	$\nu, \text{м}^3/\text{кг}$	$h, \text{кДж/кг}$	$S, \text{кДж}/(\text{кг}\cdot\text{К})$	$\nu, \text{м}^3/\text{кг}$	$h, \text{кДж/кг}$	$S, \text{кДж}/(\text{кг}\cdot\text{К})$
150	0,171	2103,4	7,149	0,147	2099,1	7,071
$p = 1,56 \text{ МПа } (t_s = 40 ^\circ\text{C})$				$p = 1,78 \text{ МПа } (t_s = 45 ^\circ\text{C})$		
50	0,0879	1822,2	6,256	0,0747	1807,7	6,155
60	0,0924	1853,1	6,351	0,0789	1840,2	6,255
70	0,0967	1882,6	6,438	0,0828	1871,3	6,347
80	0,101	1910,9	6,519	0,0866	1901,3	6,432
90	0,105	1938,4	6,596	0,0902	1929,9	6,512
100	0,109	1965,3	6,669	0,0936	1957,6	6,587
110	0,112	1991,7	6,739	0,0971	1984,7	6,659
120	0,116	2017,7	6,806	0,1	2011,3	6,727
135	0,122	2056,3	6,902	0,105	2050,7	6,825
150	0,127	2094,6	6,994	0,111	2089,5	6,919

РЕПОЗИТОЙ БГАНУ

Учебное издание

МИНИСТЕРСТВО СЕЛЬСКОГО ХОЗЯЙСТВА
И ПРОДОВОЛЬСТВИЯ РЕСПУБЛИКИ БЕЛАРУСЬ
БЕЛОРУССКИЙ ГОСУДАРСТВЕННЫЙ АГРАРНЫЙ
ТЕХНИЧЕСКИЙ УНИВЕРСИТЕТ

ТЕХНИЧЕСКАЯ ТЕРМОДИНАМИКА

Методические указания к практическим занятиям

Составители:

Цубанов Александр Григорьевич
Синяков Анатолий Леонидович
Цубанов Игорь Александрович.

ТЕХНИЧЕСКАЯ ТЕРМОДИНАМИКА

Ответственный за выпуск *В.А. Коротинский*

Редактор *Н.А. Антипович*

Корректура, компьютерная верстка *Ю.П. Каминская*

Подписано в печать 10.04.2009 г. Формат 60×84¹/₁₆.
Бумага офсетная. Гарнитура Times New Roman. Ризография.
Усл. печ. л. 6,05. Уч.-изд. л. 4,73. Тираж 70 экз. Заказ 374.

Издатель и полиграфическое исполнение
Белорусский государственный аграрный технический университет
ЛИ № 02330/0131734 от 10.02.2006. ЛП № 02330/0131656 от 02.02.2006.
Пр-т Независимости, 99, к. 2, 220023, г. Минск.

**МИНСК
2009**