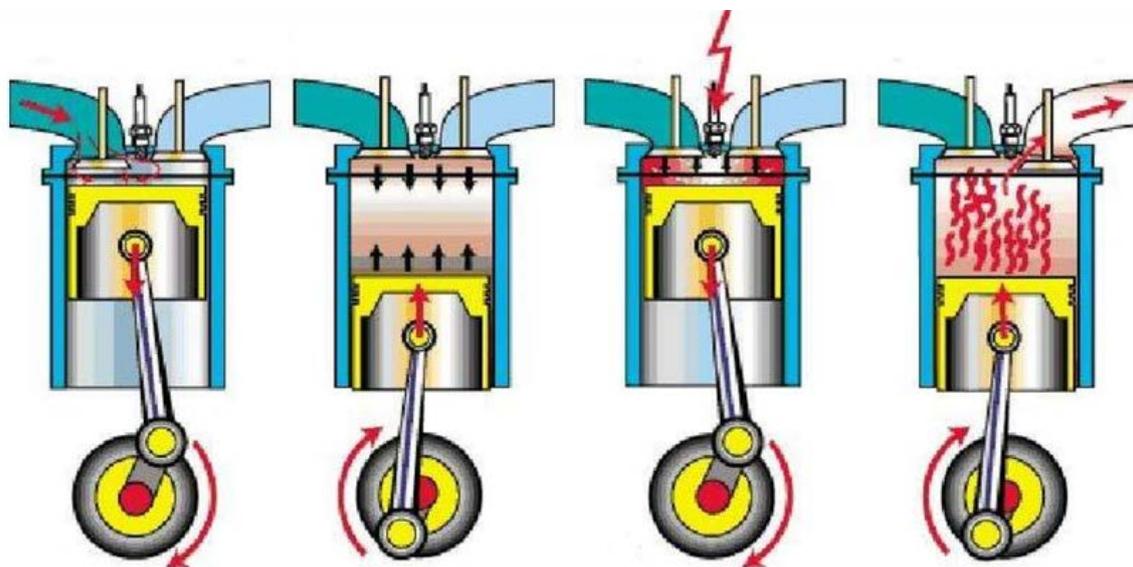


МИНИСТЕРСТВО ОБРАЗОВАНИЯ И НАУКИ
ДОНЕЦКОЙ НАРОДНОЙ РЕСПУБЛИКИ
ГОСУДАРСТВЕННОЕ ОБРАЗОВАТЕЛЬНОЕ УЧРЕЖДЕНИЕ
ВЫСШЕГО ПРОФЕССИОНАЛЬНОГО ОБРАЗОВАНИЯ
«ДОНЕЦКИЙ НАЦИОНАЛЬНЫЙ ТЕХНИЧЕСКИЙ УНИВЕРСИТЕТ»

МЕТОДИЧЕСКИЕ РЕКОМЕНДАЦИИ

**для проведения практических (семинарских) занятий
по дисциплине «Термодинамика»**

для обучающихся по специальности 13.03.01 «Теплоэнергетика и
теплотехника», 21.05.04. «Горное дело» всех форм обучения



МИНИСТЕРСТВО ОБРАЗОВАНИЯ И НАУКИ
ДОНЕЦКОЙ НАРОДНОЙ РЕСПУБЛИКИ
ГОСУДАРСТВЕННОЕ ОБРАЗОВАТЕЛЬНОЕ УЧРЕЖДЕНИЕ
ВЫСШЕГО ПРОФЕССИОНАЛЬНОГО ОБРАЗОВАНИЯ
«ДОНЕЦКИЙ НАЦИОНАЛЬНЫЙ ТЕХНИЧЕСКИЙ УНИВЕРСИТЕТ»
Кафедра «Промышленная теплоэнергетика»

МЕТОДИЧЕСКИЕ РЕКОМЕНДАЦИИ
для проведения практических (семинарских) занятий
по дисциплине «Термодинамика»
для обучающихся по специальности 13.03.01 «Теплоэнергетика и
теплотехника», 21.05.04. «Горное дело» всех форм обучения

РАССМОТРЕНО:
на заседании кафедры
«Промышленная теплоэнергетика»
протокол № 6 от 3 марта 2020 г.

УТВЕРЖДЕНО:
на заседании
Учебно-издательского
совета ДОННТУ
протокол № 3 от 27 апреля 2020 г.

Донецк
ДОННТУ
2020

УДК 621.1.016.7(076)

ББК 31.31я73

М54

Рецензент:

Бирюков Алексей Борисович – доктор технических наук, профессор, заведующий кафедрой «Техническая теплофизика» ГОУВПО «Донецкий национальный технический университет»

Составители:

Лебедев Александр Николаевич – кандидат технических наук, доцент кафедры «Промышленная теплоэнергетика» ГОУВПО «Донецкий национальный технический университет»;

Волкова Елена Ивановна – кандидат химических наук, доцент кафедры общей, физической и органической химии ГОУВПО «Донецкий национальный технический университет»

М54 Методические рекомендации для проведения практических (семинарских) занятий по дисциплине «Термодинамика» [Электронный ресурс] : для обучающихся по специальности 13.03.01 «Теплоэнергетика и теплотехника», 21.05.04 «Горное дело» всех форм обучения / ГОУВПО «ДОННТУ», каф. пром. теплоэнергетики ; сост.: А. Н. Лебедев, Е. И. Волкова. - Электрон. дан. (1 файл: 4,09 Мб). – Донецк : ДОННТУ, 2020.- Систем. требования: ZIP-архиватор.

Методические рекомендации содержат краткое изложение основных теоретических положений и указаний по изучению дисциплины «Термодинамика», примеры решения задач по основным разделам курса и контрольные задания. Представленный материал способствует формированию устойчивых знаний и навыков по дисциплине. Пособие рекомендуется использовать для самостоятельной работы при выполнении индивидуальных заданий студентами очной формы обучения и для выполнения контрольных работ студентами заочной формы обучения.

УДК 621.1.016.7(076)

ББК 31.31я73

ОГЛАВЛЕНИЕ

Предисловие	4
Краткое содержание курса.....	4
Примеры решения задач	6
РАЗДЕЛ 1. ПАРАМЕТРЫ СОСТОЯНИЯ. ТЕРМОДИНАМИКА ИДЕАЛЬНОГО ГАЗА. ГАЗОВЫЕ СМЕСИ.....	6
РАЗДЕЛ 2. ПАРАМЕТРЫ СОСТОЯНИЯ РЕАЛЬНЫХ ГАЗОВ. ТЕРМОДИНАМИКА ВОДЯНОГО ПАРА.....	15
РАЗДЕЛ 3. ВЛАЖНЫЙ ВОЗДУХ	17
РАЗДЕЛ 4. НАГНЕТАТЕЛИ И ТЕПЛОВЫЕ ДВИГАТЕЛИ.....	19
РАЗДЕЛ 5. ИСТЕЧЕНИЕ И ДРОССЕЛИРОВАНИЕ ГАЗОВ И ПАРОВ.....	27
Контрольные задания для самостоятельной работы.....	34
Использованная литература.....	37
Приложение 1	38
Приложение 2.....	39
Приложение 3.....	39
Приложение 4.....	40
Приложение 5.....	40
Приложение 6.....	41
Приложение 7.....	42
Приложение 8.....	43

ПРЕДИСЛОВИЕ

Цель настоящего методического пособия заключается в оказании помощи студентам при решении типовых задач по различным разделам курса «Термодинамика». Для этого по ходу решения даются соответствующие пояснения и ссылки на теоретический материал, приведенный в конспекте и учебных пособиях. Целесообразно перед началом решения каждой задачи изучить соответствующий раздел конспекта и учебного пособия, а затем использовать методическое пособие по самостоятельной работе, в котором даются необходимые указания и вопросы для самопроверки. В случае возникновения затруднений после работы с конспектом и учебником необходимо получить пояснения и методическую помощь преподавателя на консультации.

Самостоятельная работа способствует усвоению учебного материала и углублению полученных знаний. Составной ее частью являются индивидуальные задания, которые включены в соответствующий раздел данного методического пособия.

В Приложении представлены справочные данные, которые помогут Вам выполнить индивидуальное задание.

КРАТКОЕ СОДЕРЖАНИЕ

курса «Термодинамика»

Основные понятия и определения. Предмет термодинамики, ее место в системе подготовки специалистов инженерно-технических специальностей. Связь технической термодинамики со смежными дисциплинами. Виды термодинамики. Рабочее тело. Термодинамическая система. Основные параметры состояния. Уравнение состояния. Термодинамический процесс. Равновесные и неравновесные процессы, обратимые и необратимые процессы. Круговой процес (цикл).

Основные законы идеальных газов. Смеси идеальных газов. Основные свойства идеальных газов. Уравнения состояния идеальных газов. Универсальное уравнение состояния идеальных газов. Газовая постоянная смеси газов. Средняя молекулярная масса смеси газов. Парциальное давление.

Теплоемкость газов. Основные определения. Массовая, объемная и мольная теплоемкости газов. Истинная и средняя теплоемкости. Теплоемкость при постоянных давлении и объеме. Зависимость теплоемкости от температуры. Определение теплоемкостей по таблицам. Теплоемкость смесей.

Термодинамические процессы идеальных газов. Классификация процессов изменения состояния. Общие методы исследования процессов изменения состояния рабочего тела. Изохорный, изобарный, изотермический и адиабатный процессы. Политропные процессы. Уравнение политропы. Анализ процессов на основе сравнения показателей политропы. Процессы в p - v - и T - s -координатах.

Первый и второй законы термодинамики. Аналитическое выражение первого закона термодинамики, принцип эквивалентности теплоты и работы. Аналитическое выражение работы процесса. Внутренняя энергия. Энтальпия. Энтропия. Вычисление энтропии идеального газа. Основные положения второго закона термодинамики. Круговые термодинамические процессы. Термический КПД и холодильный коэффициент циклов. Цикл Карно. Математическое выражение второго закона термодинамики.

Реальные газы. Водяной пар. Свойства реальных газов. Фазовые равновесия и фазовые переходы. Фазовые диаграммы. Уравнение Ван-дер-Ваальса. Уравнение состояния для реальных газов М.П.Вакуловича и И.И.Новикова. Основные понятия и указание особенной p - v -диаграммы водяного пара. Теплота парообразования. Основные параметры влажного насыщенного водяного пара. Основные параметры перегретого пара. T - s -диаграмма водяного пара. h - s -Диаграмма водяного пара. Расчет термодинамических процессов при помощи h - s -диаграммы.

Влажный воздух. Основные понятия. Свойства влажного воздуха. Влагосодержание. Абсолютная и относительная влажность. Температура точки росы. h - s -Диаграмма влажного воздуха. Изменение основных характеристик при изменении давления. Основные теплофизические свойства влажного воздуха.

Термодинамика потока. Истечение и дросселирование газов и паров. Уравнение первого закона термодинамики для потока, его анализ. Понятие о сопловом и диффузорном течении газа. Адиабатные течения. Скорость адиабатного течения. Связь критической скорости истечения с местной скоростью распространения звука. Критическое отношение давлений. Расчет скорости истечения и секундного массового расхода для критического режима. Условия перехода через критическую скорость. Сопло Лавалю. расчет процесса истечения водяного пара с помощью h - s -диаграммы. Действительный процесс истечения. Дросселирование газов и паров. Понятие об эффекте Джоуля-Томсона. Особенности дросселирования идеального и реального газов. Условное изображение процесса дросселирования в h - s -диаграмме.

Термодинамический анализ процессов в компрессорах. Принцип действия. Работа, затрачиваемая на привод компрессора. Индикаторная диаграмма. Изотермическое, адиабатное и политропное сжатие. Термодинамическое обоснование многоступенчатого сжатия. Изображение в p - v - и T - s -диаграммах термодинамических процессов, протекающих в компрессорах. Необратимое сжатие. Относительный внутренний КПД компрессора.

Циклы двигателей внутреннего сгорания (ДВС). Циклы газотурбинных установок (ГТУ). Классификация циклов. Цикл ДВС с подведением теплоты в процессах $p = \text{const}$, $v = \text{const}$. ДВС со смешанным сгоранием топлива. Сравнение циклов ДВС. Циклы газовых турбин.

Циклы холодильных машин. Циклы холодильных установок. Холодильный коэффициент и холодопроизводительность. Цикл паровой и воздушной компрессорной холодильной установки.

ПРИМЕРЫ РЕШЕНИЯ ЗАДАЧ

РАЗДЕЛ 1. ПАРАМЕТРЫ СОСТОЯНИЯ. ТЕРМОДИНАМИКА ИДЕАЛЬНОГО ГАЗА. ГАЗОВЫЕ СМЕСИ

Задача 1.1. Воздух массой 19,395 кг занимает объем 15 м³. Определить плотность и удельный объем воздуха.

Решение

Определяем плотность воздуха (массу 1 м³ газа):

$$\rho = \frac{m}{V} = \frac{19,395}{15} = 1,293 \frac{\text{кг}}{\text{м}^3}$$

Удельный объем воздуха (величина, обратная плотности) будет равен

$$v = \frac{1}{\rho} = 0,774 \frac{\text{м}^3}{\text{кг}}.$$

Задача 1.2. Атмосферное давление, измеренное ртутным барометром, равно 780 мм при температуре 0° С. Определить абсолютное давление пара в котле, если показание манометра 2,50 бар.

Решение.

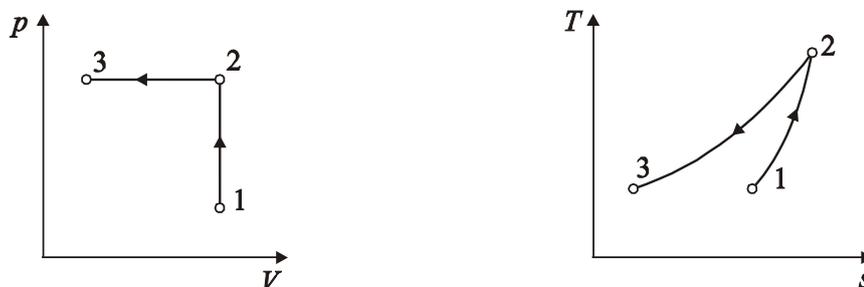
Давление в 780 мм рт. ст. при 0°С соответствует давлению (см. Приложение) 104000 кПа/м² или 1,04 бара.

$$P_{\text{абс}} = P_{\text{ман}} + P_{\text{атм}} = 2,50 + 1,04 = 3,54 \text{ бар}$$

Задача 1.3. Газовая смесь массой $G = 32$ кг, заданная объемными долями: $r_1(\text{N}_2) = 50\%$; $r_2(\text{H}_2) = 50\%$, нагревается при постоянном объеме $V_1 = 35$ м³ от $t_1 = 75^\circ\text{C}$ до $t_2 = 275^\circ\text{C}$, а потом охлаждается при $p = \text{const}$ до начальной температуры t_1 .

Определить конечное давление и объем смеси, величину работы и тепла, участвующие в процессах, а также изменение энергии 1 кг смеси. Расчет иллюстрировать изображением процессов в pV и Ts -диаграммах.

Решение



1) процесс 1-2 – изохорный, $V = \text{const}$.

Из уравнения Менделеева-Клайперона $pV = GRT$,

$$p_1 = \frac{G \cdot R_{\text{см}} \cdot T_1}{V_1}, \text{ Па}$$

где $R_{см} = \frac{R_{\mu}}{\mu} = \frac{8314,33}{\mu_{см}}$, Дж/кг·К — удельная газовая постоянная смеси;

$R_{\mu} = 8314,33$ Дж/(кмоль·К) — универсальная газовая постоянная;

$\mu_{см} = \sum \mu_i \cdot r_i$, кг/кмоль — молярная масса смеси.

$\mu_{см} = \mu_{N_2} \cdot r_{N_2} + \mu_{H_2} \cdot r_{H_2} = 28 \cdot 0,5 + 2 \cdot 0,5 = 15$ кг/кмоль.

Удельная газовая постоянная смеси:

$$R_{см} = \frac{8314,33}{15} = 554,3 \text{ Дж/кг} \cdot \text{К}$$

Начальное давление p_1 определим по известному начальному состоянию смеси

$$p_1 = \frac{32 \cdot 554,3 \cdot (273 + 75)}{35} = 176362 \text{ Па} = 176,4 \text{ кПа}$$

На основании закона Шарля (связь параметров в изохорном процессе):

$$\frac{p_1}{p_2} = \frac{T_1}{T_2} \Rightarrow p_2 = p_1 \cdot \frac{T_2}{T_1}$$

$$p_2 = 176362 \cdot \frac{273 + 275}{273 + 75} = 277720 \text{ Па} = 277,7 \text{ кПа}$$

2) Процесс 2-3 — изобарный, $p = \text{const}$, $p_3 = p_2 = 277,7$ кПа.

На основании закона Гей-Люссака (связь параметров в изобарном процессе):

$$\frac{V_3}{T_3} = \frac{V_2}{T_2} \Rightarrow V_3 = V_2 \cdot \frac{T_3}{T_2}$$

где $V_2 = V_1 = 35 \text{ м}^3$; $T_3 = T_1 = 348 \text{ К}$.

$$V_3 = 35 \cdot \frac{348}{548} = 22,2 \text{ м}^3$$

3) Работа 1 кг смеси в процессах 1-3 равна

$$l_{1-3} = l_{1-2} + l_{2-3}, \text{ Дж/кг}$$

Т.к. в изохорном процессе $l_{1-2} = 0$, то $l_{1-3} = l_{2-3}$.

$$l_{1-3} = l_{2-3} = \frac{p_2(V_2 - V_1)}{G} = \frac{277720 \cdot (22,2 - 35)}{32} = -111,088 \text{ Дж/кг}$$

4) Теплота процессов:

$$q_{1-2} = \Delta U_{1-2} = C_{vсм} \Big|_{T_1}^{T_2} \cdot (T_2 - T_1)$$

$$q_{2-3} = \Delta h_{2-3} = C_{pсм} \Big|_{T_3}^{T_2} \cdot (T_3 - T_2) = C_{pсм} \Big|_{T_1}^{T_2} \cdot (T_1 - T_2)$$

По таблицам (см. приложение) определим средние молярные теплоемкости компонентов смеси в заданных интервалах температур при $p = \text{const}$.

$$\mu C_{p_{N_2}} \Big|_{75}^{275} = \frac{\mu C_{p_{N_2}} \Big|_0^{275} \cdot 275 - \mu C_{p_{N_2}} \Big|_0^{75} \cdot 75}{275 - 75} = \frac{29,344 \cdot 275 - 29,137 \cdot 75}{275 - 75} = 29,422 \text{ Дж/(кмоль} \cdot \text{К)}$$

$$\mu C_{p_{H_2}} \Big|_{75}^{275} = \frac{\mu C_{p_{H_2}} \Big|_0^{275} \cdot 275 - \mu C_{p_{H_2}} \Big|_0^{75} \cdot 75}{275 - 75} = \frac{29,111 \cdot 275 - 28,856 \cdot 75}{275 - 75} = 29,207 \text{ Дж/(кмоль} \cdot \text{К)}$$

$$\mu C_{p_{см}} = (\mu C_{p_{N_2}} + \mu C_{p_{H_2}}) \cdot r_i = \mu C_{p_{N_2}} \cdot r_{N_2} + \mu C_{p_{H_2}} \cdot r_{H_2}$$

$$\mu C_{p_{см}} = 29,422 \cdot 0,5 + 29,207 \cdot 0,5 = 29,315 \text{ кДж/(кмоль} \cdot \text{К)}$$

$$C_{p_{см}} = \frac{\mu C_{p_{см}}}{\mu_{см}} = \frac{29,315}{15} = 1,954 \text{ кДж/кг} \cdot \text{К}$$

$$C_{v_{см}} = C_{p_{см}} - R_{см} = 1954 - 554,3 = 1399,7 \text{ Дж/кг} \cdot \text{К}$$

Количество тепла q_{1-3} :

$$q_{1-3} = C_{v_{см}} \Big|_{T_1}^{T_2} \cdot (T_2 - T_1) + C_{p_{см}} \Big|_{T_1}^{T_2} \cdot (T_2 - T_1) = 1399,7 \cdot (548 - 348) + 1954 \cdot (348 - 548) = -110,860 \text{ Дж/кг}$$

5) Изменение энтропии:

$$\Delta s_{1-3} = \Delta s_{1-2} + \Delta s_{2-3}, \text{ Дж/кг} \cdot \text{К}$$

$$\Delta s_{1-3} = C_{v_{см}} \Big|_{T_1}^{T_2} \cdot \ln \frac{p_2}{p_1} + C_{p_{см}} \Big|_{T_3}^{T_2} \cdot \ln \frac{T_3}{T_2}, \text{ Дж/кг} \cdot \text{К}$$

Так как $T_3 = T_1$, то

$$\Delta s_{1-3} = C_{v_{см}} \Big|_{T_1}^{T_2} \cdot \ln \frac{p_2}{p_1} + C_{p_{см}} \Big|_{T_1}^{T_2} \cdot \ln \frac{T_1}{T_2} = 1399,7 \cdot \ln \frac{277720}{176362} + 1954 \cdot \ln \frac{348}{548} = -251,7 \text{ Дж/кг} \cdot \text{К}$$

Задача 1.4. Воздух, имеющий начальные параметры $p_1 = 10$ бар, $V_1 = 0,4$ м³ и $t_1 = 127^\circ\text{C}$, нагревается при постоянном объеме до температуры 327°C . Определить массу воздуха, конечное давление и количество подводимой теплоты.

Решение

Массу воздуха определяем из уравнения Клапейрона-Менделеева:

$$pV = mRT,$$

где R — характеристическая (удельная) газовая постоянная, Дж/(кг·К)

$$R = \frac{R_\mu}{\mu} = \frac{8314,33}{\mu}$$

где R_μ — универсальная газовая постоянная 8314,33 Дж/(кмоль·К), μ — масса киломоля газа, т.е. молекулярная масса, выраженная в килограммах (для воздуха 28,98 кг/кмоль).

$$m = \frac{pV}{RT} = \frac{10 \cdot 100000 \cdot 0,4 \cdot 28,98}{8314,33 \cdot (127 + 273)} = 3,49 \text{ кг}.$$

Задача 1.5. В закрытом сосуде объемом 0,8 м³ находится диоксид углерода CO_2 при $p_1 = 2,2$ МПа и $t_1 = 20^\circ\text{C}$. Газу сообщается $Q_v = 4600$ кДж теплоты.

Определите температуру и давление диоксида углерода в конце процесса. Задачу решите двумя способами: 1) считая теплоемкость постоянной и

принимая ее значение по молекулярно-кинетической теории; 2) считая теплоемкость зависящей от температуры (используйте данные приложения).

Решение.

Количество теплоты, выраженное через постоянную теплоемкость и разность температур, вычисляется по формуле:

$$Q_v = m \cdot c_v \cdot (t_2 - t_1)$$

отсюда

$$t_2 = \frac{Q_v}{m \cdot c_v} + t_1$$

$$\text{Масса газа } m = \frac{p_1 \cdot V_1}{R \cdot T_1}, \text{ где } R = \frac{R_\mu}{\mu} = \frac{8314,33}{\mu}.$$

Теплоемкость при постоянном объеме, отнесенная к 1 кг, согласно молекулярно-кинетической теории определяется уравнением

$$c_v = \frac{j \cdot R}{2} = \frac{(j_{\text{пост}} + j_{\text{вр}}) \cdot R}{2}$$

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

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

$$t_2 = \frac{2T_1 \cdot Q_v}{p_1 \cdot V_1 (j_{\text{пост}} + j_{\text{вр}})} + t_1$$

откуда

$$t_2 = \frac{2 \cdot 293,15 \cdot 4600 \cdot 10^3}{22,0 \cdot 10^5 \cdot 0,8 \cdot (3 + 2)} + 20 = 326,5^\circ \text{C}$$

Давление в конечном состоянии

$$p_2 = p_1 \frac{T_2}{T_1} = 2,2 \frac{326,5 + 273,15}{20 + 273,15} = 4,50 \text{ МПа}$$

Согласно первому закону термодинамики

$$Q_v = U_2 - U_1,$$

откуда

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

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

$$u_2 = \frac{4600 \cdot 8314,51 \cdot 293,15}{44 \cdot 22 \cdot 10^5 \cdot 0,8} + 153,3 = 298,0 \text{ кДж/кг}$$

По табл. приложения находим температуру t_2 , соответствующую внутренней энергии u_2 : $t_2 = 216^\circ \text{C}$; $T_2 = 489,15 \text{ К}$.

Рассчитываем конечное давление

$$p_2 = p_1 \frac{T_2}{T_1} = 2,2 \frac{489,15}{293,15} = 3,67 \text{ МПа}.$$

Задача 1.6. Считая теплоемкость идеального газа зависящей от температуры, определить: 1) параметры газа в начальном и конечном состояниях; 2) изменение внутренней энергии; 3) теплоту, участвующую в процессе, и работу расширения. Процесс изобарный, рабочее тело – кислород, $t_1 = 1500^\circ\text{C}$, $t_2 = 100^\circ\text{C}$, $p_1 = 12 \text{ МПа}$, $m = 7 \text{ кг}$. Построить графики процесса в координатах $p-v$, $p-T$ и $v-T$.

Решение.

1. Изобарный процесс – это процесс, протекающий при постоянном давлении, уравнение процесса $p = \text{const}$.

Температура и давление газа в начальном и конечном состояниях:

$$T_1 = 1500 + 273 = 1773 \text{ К}; T_2 = 100 + 273 = 373 \text{ К}; p_1 = p_2 = 12 \cdot 10^6 \text{ Па}.$$

Из уравнения состояния, записанного для начального и конечного состояний системы, определим удельные объемы v_1 и v_2 :

$$p_1 v_1 = RT_1; p_2 v_2 = RT_2,$$

где R – удельная газовая постоянная.

$$\text{Для кислорода } R = \frac{R_\mu}{\mu} = \frac{8314,33}{32} = 259,8 \text{ Дж/кг}\cdot\text{К}.$$

$$\text{Так как } p_1 = p_2, \text{ то } \frac{v_1}{v_2} = \frac{T_1}{T_2}. \text{ Тогда } v_1 = \frac{RT_1}{p_1} = \frac{259,8 \cdot 1773}{12 \cdot 10^6} = 0,038 \text{ м}^3/\text{кг}.$$

$$v_2 = \frac{RT_2}{p_2} = \frac{259,8 \cdot 373}{12 \cdot 10^6} = 0,008 \text{ м}^3/\text{кг}.$$

2. Изменение внутренней энергии в изобарном процессе:

$\Delta u = c_{v_2} T_2 - c_{v_1} T_1$, где c_{v_1} и c_{v_2} – удельные теплоемкости газа при постоянном объеме при температурах T_1 и T_2 соответственно.

В приложении даны значения удельной молярной теплоемкости μc_p в зависимости от температуры. Удельные теплоемкости газа при постоянном объеме c_v и постоянном давлении c_p связаны уравнением $k = \frac{c_p}{c_v}$, где $c_p = \frac{\mu c_p}{\mu}$.

$$\text{Тогда } c_v = \frac{\mu c_p}{\mu k}.$$

Для двухатомных газов $k = 1,4$. Определяя по таблице в приложении значения μc_p для температур T_1 и T_2 , вычислим:

$$c_{v_1} = \frac{32,31}{32 \cdot 1,4} = 0,72 \text{ кДж/кг}\cdot\text{К}; c_{p_1} = \frac{32,31}{32} = 1,01 \text{ кДж/кг}\cdot\text{К};$$

$$c_{v_2} = \frac{29,153}{32 \cdot 1,4} = 0,65 \text{ кДж/кг}\cdot\text{К}; c_{p_2} = \frac{29,153}{32} = 0,91 \text{ кДж/кг}\cdot\text{К}.$$

$$\text{Тогда } \Delta u = 0,65 \cdot 373 - 0,72 \cdot 1773 = -1034,11 \text{ кДж/кг}.$$

3. Изменение энтальпии

$$\Delta h = c_{p_2} T_2 - c_{p_1} T_1 = 0,91 \cdot 373 - 1,01 \cdot 1773 = -1451,3 \text{ кДж/кг}.$$

4. Теплота, участвующая в процессе,

$$q = \Delta h = c_{p2} T_2 - c_{p1} T_1 = 0,91 \cdot 373 - 1,01 \cdot 1773 = -1451,3 \text{ кДж/кг.}$$

$$Q = q \cdot m = -1451,3 \cdot 7 = -10159,1 \text{ кДж.}$$

5. Изменение энтропии

$$\Delta s = c_{p2} \ln T_2 - c_{p1} \ln T_1 = 0,91 \ln 373 - 1,01 \ln 1773 = -1451,3 \text{ кДж/кг} \cdot \text{К.}$$

6. Работа расширения

$$I = p(v_2 - v_1) = 12 \cdot 10^6 (0,008 - 0,038) = -360000 \text{ Дж/кг} = -0,36 \text{ МДж/кг.}$$

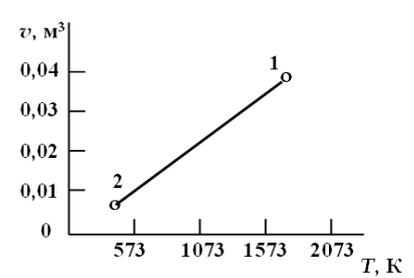
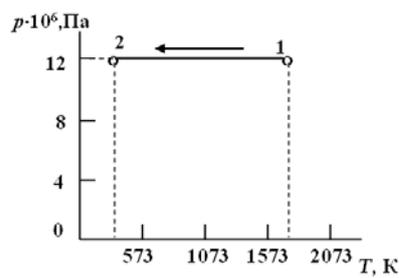
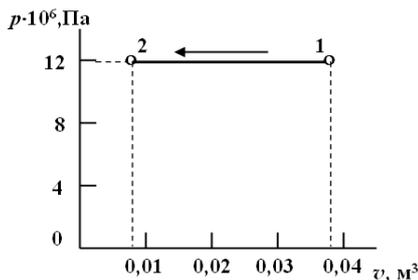
$$L = I \cdot m = -0,36 \cdot 7 = 2,52 \text{ МДж.}$$

7. Графики процесса

- в координатах p - v :

- в координатах p - T :

- в координатах v - T :



Задача 1.7. Для идеального цикла поршневого двигателя с подводом теплоты при $v = \text{const}$ определить параметры основных точек; полезную удельную работу; удельное количество подведенной и отведенной теплоты; термический КПД цикла Карно по условиям задачи; термический КПД цикла; среднее индикаторное давление, если даны значения $p_1 = 0,1$ МПа, $T_1 = 320$ К, степень сжатия $\varepsilon = 4,0$, степень повышения давления $\lambda = 40$. Рабочее тело – воздух с газовой постоянной $R = 287$ Дж/(кг·К), показатель адиабаты $k = 1,4$. Теплоемкость рабочего тела принять не зависящей от температуры.

Решение. 1). Параметры точки 1: $p_1 = 0,1$ МПа = 10^5 Па; $T_1 = 320$ К;

$$v_1 = \frac{RT_1}{p_1} = \frac{287 \cdot 320}{10^5} = 0,92 \text{ м}^3/\text{кг.}$$

Параметры точки 2: $v_2 = \frac{v_1}{\varepsilon} = \frac{0,92}{4,0} = 0,23 \text{ м}^3/\text{кг}$; $\frac{p_2}{p_1} = \left(\frac{v_1}{v_2}\right)^k = \varepsilon^k$; $p_2 = p_1 \cdot \varepsilon^k = 0,1 \cdot 4^{1,4} = 0,738$ МПа; $T_2 = \frac{p_2 v_2}{R} = \frac{0,738 \cdot 0,23 \cdot 10^6}{287} = 592$ К.

Параметры точки 3: $v_3 = v_2 = 0,23 \text{ м}^3/\text{кг}$; $p_3 = p_2 \cdot \lambda = 0,738 \cdot 4 = 2,96$ МПа; $T_3 = T_2 \cdot \lambda = 592 \cdot 4 = 2368$ К.

Параметры точки 4: $v_4 = v_1 = 0,92 \text{ м}^3/\text{кг}$; $\frac{T_4}{T_3} = \left(\frac{v_3}{v_4}\right)^{k-1} = \left(\frac{v_2}{v_1}\right)^{k-1} = \frac{1}{\varepsilon^{k-1}}$;

$$T_4 = \frac{T_3}{\varepsilon^{k-1}} = \frac{2368}{4^{0,4}} = 1340 \text{ К}$$
; $p_4 = \frac{RT_4}{v_4} = \frac{287 \cdot 1340}{0,92 \cdot 10^6} = 0,417$ МПа.

2). Удельная работа расширения:

$$l_1 = \frac{1}{k-1}(p_3v_3 - p_4v_4) = \frac{10^6}{0,4}(2,96 \cdot 0,23 - 0,417 \cdot 0,92) = 742000 \text{ Дж/кг} = 742 \text{ кДж/кг}.$$

Удельная работа сжатия:

$$l_2 = \frac{1}{k-1}(p_1v_1 - p_2v_2) = \frac{10^6}{0,4}(0,1 \cdot 0,92 - 0,738 \cdot 0,23) = -195000 \text{ Дж/кг} = -195 \text{ кДж/кг}.$$

Полезная удельная работа: $l = l_1 + l_2 = 742 - 195 = 547 \text{ кДж/кг}$.

3). Удельное количество подведенной теплоты:

$$q_1 = c_v(T_3 - T_2) = \frac{20,78}{28,85}(2368 - 592) = 1280 \text{ кДж/кг}.$$

Удельное количество отведенной теплоты:

$$q_2 = c_v(T_4 - T_1) = \frac{2078}{28,85}(1340 - 320) = 737 \text{ кДж/кг}.$$

Полезно использованное удельное количество теплоты

$$q = q_1 - q_2 = 1280 - 737 = 543 \text{ кДж/кг}.$$

4). Термический КПД цикла:

$$\eta_t = \frac{q}{q_1} = \frac{543}{1280} = 0,425$$

Проверка КПД цикла:

$$\eta_t = 1 - \frac{1}{\varepsilon^{k-1}} = 1 - \frac{1}{4^{0,4}} = 0,426$$

5). Термический КПД цикла Карно по данным задачи:

$$\eta_t = 1 - \frac{T_1}{T_3} = 1 - \frac{320}{2368} = 0,865$$

б). Среднее индикаторное давление:

$$p_i = \frac{l}{v_1 - v_2} = \frac{547000}{(0,92 - 0,23)10^6} = 0,79 \text{ МПа}.$$

Задача 1.8. 1 кг воздуха совершает цикл Карно в пределах температур $t_1 = 627^\circ\text{C}$ и $t_2 = 27^\circ\text{C}$, причем наивысшее давление составляет 6 МПа, а наинизшее – 0,1 МПа.

Определить параметры состояния воздуха в характерных точках цикла, работу, термический к.п.д. цикла и количество подведенной и отведенной теплоты.

Решение.

Определим основные параметры состояния воздуха в характерных точках цикла.

Точка 1.

$$p_1 = 6 \text{ МПа}; T_1 = 900 \text{ К}$$

Удельный объем газа находим из характеристического уравнения

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

Точка 2.

$$T_2 = 900 \text{ К}.$$

Из уравнения адиабаты (линия 2 – 3)

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

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

Из уравнения изотермы (линия 1 – 2)

$$p_1 v_1 = p_2 v_2.$$

Получаем

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

Точка 3.

$$p_3 = 0,1 \text{ МПа}; T_3 = 300 \text{ К}$$

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

Точка 4.

$$T_4 = 300 \text{ К}.$$

Из уравнения адиабаты (линия 4 – 1) имеем

$$\frac{p_1}{p_4} = \left(\frac{T_1}{T_4}\right)^{\frac{k}{k-1}} = 4,68;$$

$$p_4 = \frac{p_1}{4,68} = 0,128 \text{ МПа}.$$

Из уравнения изотермы (линия 3-4) получаем

$$p_3 v_3 = p_4 v_4$$

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

Термический к.п.д. цикла

$$\eta_t = \frac{T_1 - T_2}{T_1} = \frac{900 - 300}{900} = 0,667.$$

Подведенное количество теплоты

$$q_1 = RT_1 \ln \frac{v_3}{v_1} = 2,303 \cdot 0,287 \cdot 900 \cdot \lg \frac{0,861}{0,043} = 63,6 \text{ кДж/кг}.$$

Отведенное количество теплоты

$$q_2 = RT_3 \ln \frac{v_3}{v_4} = 2,303 \cdot 0,287 \cdot 300 \cdot \lg \frac{0,861}{0,671} = 21,5 \text{ кДж/кг}.$$

Работа цикла

$$l_0 = q_1 - q_2 = 69,6 - 21,5 = 42,1 \text{ кДж/кг}$$

Для проверки можно воспользоваться формулой:

$$\eta_t = \frac{q_1 - q_2}{q_1} = \frac{l_0}{q_0} = \frac{42,1}{63,6} = 0,662.$$

Задача 1.9 (для самопроверки).

Воздух в количестве 1 кг последовательно меняет свое состояние следующим образом (рис.): сначала, имея параметры $p_1 = 0,2$ МПа и $t_1 = 37^\circ\text{C}$, изобарно расширяется до объема $v_2 = 2,85 \cdot v_1$, затем адиабатно сжимается до состояния при $p_3 = 2,8$ МПа и, наконец, изотермически расширяется до $v_4 = v_2$.

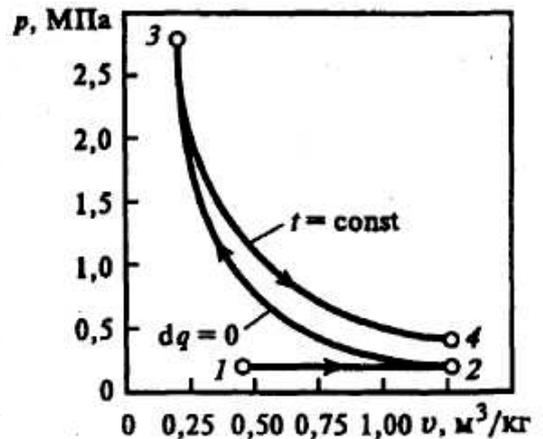
Определите недостающие параметры во всех характерных точках процессов, подведенную или отведенную теплоту, изменение внутренней энергии и энтальпии, а также работу расширения (сжатия) в каждом процессе.

Проверьте уравнение первого закона термодинамики для совокупности процессов.

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

Результаты расчета

Точки	p , МПа	v , м ³ /кг	t , °C	T , К
1	0,2	0,4452	37	310,15
2	0,2	1,2689	610,8	883,93
3	2,8	0,19264	1605,6	1878,7
4	0,425	1,2689	1605,6	1878,7
Процесс	q , кДж/кг	Δu , кДж/кг	Δh , кДж/кг	l , кДж/кг
1-2	576,5	411,8	576,5	164,7
2-3	0	714,0	999,5	-714,0
3-4	1016,8	0	0	1016,8
Σ	1592	1124	1574	468



Методические указания: перед решением задачи необходимо повторить характеристики соответствующих процессов, приведенные в конспекте. При определении теплоемкостей можно использовать формулы, также приведенные в лекции.

РАЗДЕЛ 2. ПАРАМЕТРЫ СОСТОЯНИЯ РЕАЛЬНЫХ ГАЗОВ. ТЕРМОДИНАМИКА ВОДЯНОГО ПАРА

Задача 2.1. Определить параметры влажного насыщенного водяного пара при давлении 20 бар и степени сухости $x = 0,9$.

Решение.

По таблицам термодинамических свойств водяного пара или h - s -диаграмме находим параметры кипящей воды и сухого насыщенного пара при давлении 20 бар: $t_s = 212,37^\circ\text{C}$; $r = 1890,7$ кДж/кг; $v' = 0,0011768$ м³/кг; $v'' = 0,09961$ м³/кг; $h' = 908,6$ кДж/кг; $h'' = 2799,2$ кДж/кг; $s' = 2,4471$ кДж/кг·К; $s'' = 6,3411$ кДж/кг·К.

По этим данным определяем параметры влажного пара

$$v_x = v'(1 - x) + v''x = 0,0011768 \cdot 0,1 + 0,09961 \cdot 0,9 = 0,08977 \text{ м}^3/\text{кг};$$

$$h_x = h' + r \cdot x = 908,6 + 1890,7 \cdot 0,9 = 2610,2 \text{ кДж/кг};$$

$$s_x = s' + r \cdot x / T_s = 2,4471 + 1890,7 \cdot 0,9 / (212,37 + 273) = 5,949 \text{ кДж/кг} \cdot \text{К}.$$

Задача 2.2. Определите теоретическую мощность турбины, если часовой расход пара D_1 , протекающего через нее, составляет 640 т/ч. На входе в турбину пар имеет параметры $p_1 = 13,0$ МПа и $t_1 = 565^\circ\text{C}$. Давление в конденсаторе турбины $p_2 = 0,004$ МПа. Процесс расширения пара в турбине считать обратимым, т.е. изоэнтропным.

Задачу решите, пользуясь только таблицами «Термодинамические свойства воды и водяного пара».

Решение.

Искомая мощность определяется по следующей формуле:

$$N = D \cdot (h_1 - h_2)$$

Задача, таким образом, сводится к нахождению табличных значений энтальпии пара в начальном и конечном состояниях. Энтальпия h_1 находится непосредственно по заданным начальным параметрам. Для определения h_2 воспользуемся условием изоэнтропности процесса, которое определяется равенством: $s_2 = s_1$

Находим необходимые начальные значения:

$$h_1 = 3506 \text{ кДж/кг} \text{ и } s_1 = 6,653 \text{ кДж/(кг} \cdot \text{К)}.$$

Энтропия сухого насыщенного пара при $p_2 = 0,004$ МПа $s'' = 8,473$ кДж/(кг·К), а энтропия кипящей жидкости $s' = 0,4225$ кДж/(кг·К).

Сопоставляя эти три значения энтропии, заключаем, что в конечном состоянии пар оказывается влажным.

Отсюда степень сухости

$$x_2 = \frac{s_1 - s_2'}{s_2'' - s_2'} = \frac{6,653 - 0,4225}{8,473 - 0,4225} = 0,774.$$

Теперь легко найти энтальпию h_2 в конечном состоянии:

$$h_2 = h'_2 + r_2 \cdot x_2.$$

В таблицах находим при $p_2 = 0,004$ МПа величина $h'_2 = 121,42$ кДж/кг; $r = 2433$ кДж/кг. Определяем далее:

$$h_2 = 121 + 2433 \cdot 0,774 = 2004 \text{ кДж/кг.}$$

Вычисляем, наконец, искомую мощность:

$$N = \frac{640 \cdot 10^3}{3600} (3506 - 2004) = 267022 \text{ кВт} = 267 \text{ МВт}$$

Задача 2.3. В цилиндре под поршнем находится пароводяная смесь при давлении $p_1 = 9,0$ МПа и степени сухости $x = 0,125$. Первоначальный объем смеси $V = 10 \text{ м}^3$. К содержимому в цилиндре изотермически подводится теплота в количестве $Q = 6 \cdot 10^3$ МДж.

Определите начальные и конечные параметры состояния вещества (p, t, h, s), изменение внутренней энергии и работу, произведенную при расширении.

Представьте процесс на h - s -диаграмме.

Решение.

По таблицам параметры на пограничных линиях находим при $p = 9$ МПа; $t_1 = t_2 = 303,92^\circ\text{C}$ или $T_1 = T_2 = 577,07 \text{ К}$.

Удельный объем смеси

$$v_1 = (1 - x) v'_1 + x v''_1 = 0,875 \cdot 0,0014174 + 0,125 \cdot 0,02048 = 0,00380 \text{ м}^3/\text{кг};$$

энтальпия

$$h_1 = h' + r_1 \cdot x_1 = 1363,7 + 1379,3 \cdot 0,125 = 1536,1 \text{ кДж/кг};$$

энтропия

$$s_1 = (1 - x) \cdot s''_1 + x_1 \cdot s''_1 = 0,875 \cdot 3,287 + 0,125 \cdot 5,678 = 3,5859 \text{ кДж}/(\text{кг} \cdot \text{К}).$$

При этих подсчетах параметры на пограничных линиях и их значения берутся также при $p_1 = 9,0$ МПа.

Энтропия в конечной точке процесса определяется по формуле

$$s_2 = s_1 + \frac{Q}{m \cdot T}$$

где

$$m = \frac{V_1}{v_1} = \frac{10}{0,00380} \text{ кг}$$

следовательно

$$s_2 = 3,5859 + \frac{6 \cdot 10^6 \cdot 0,00380}{577,07 \cdot 10} = 7,5369 \text{ кДж}/(\text{кг} \cdot \text{К})$$

Остальные параметры в конце процесса находятся при помощи h - s -диаграммы. При $t_2 = 304^\circ\text{C}$ и $s_2 = 7,537$ кДж/(кг·К) определяем: $p_2 = 0,43$ МПа; $h_2 = 3070$ кДж/кг; $v_2 = 0,61$ м³/кг. Более точно эти параметры можно определить по таблицам, интерполируя дважды — по вертикали и горизонтали. Изменение внутренней энергии

$$\Delta U = m(u_2 - u_1) = m((h_2 - p_2 \cdot v_2) - (h_1 - p_1 \cdot v_1)) = m((h_2 - h_1) - (p_2 \cdot v_2 - p_1 \cdot v_1)) =$$

$$= \frac{10}{0,00386} \left((3070 - 1536) - (0,43 \cdot 0,61 - 9,0 \cdot 0,00380) \cdot 10^3 \right) = 338,3 \cdot 10^4 \text{ кДж.}$$

Работа расширения определяется из уравнения первого закона термодинамики

$$L = Q - \Delta U = 6 \cdot 10^6 - 3,383 \cdot 10^6 = 2,62 \cdot 10^6 \text{ кДж.}$$

РАЗДЕЛ 3. ВЛАЖНЫЙ ВОЗДУХ

Задача 3.1. Определить влагосодержание воздуха при температуре $t = 60^\circ\text{C}$ и барометрическом давлении $B = 99325 \text{ Па}$ (745 мм. рт. ст.), если относительная влажность воздуха $\varphi = 60\%$.

Решение.

Связь влагосодержания d и давления водяного пара $p_{\text{п}}$ дается формулой

$$d = \frac{p_{\text{п}}}{p_{\text{в}}},$$

а так как относительная влажность φ может быть найдена по уравнению

$$\varphi = \frac{p_{\text{п}}}{p_{\text{н}}},$$

то

$$p_{\text{п}} = \varphi \cdot p_{\text{н}}.$$

Давление насыщенного пара $p_{\text{н}}$ при данной температуре $t = 60^\circ\text{C}$ определяют по таблицам насыщенного водяного пара. По данным таблицы $p_{\text{н}} = 0,019917 \text{ МПа}$ и, следовательно,

$$p_{\text{п}} = 0,6 \cdot 0,019917 = 0,012 \text{ МПа.}$$

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

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

Парциальное давление воздуха

$$p_{\text{в}} = p - p_{\text{п}} = 99325 - 12000 = 87325 \text{ Па} = 0,0873 \text{ МПа}.$$

Плотность влажного воздуха

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

Поэтому

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

Значение d можно также определить из формулы:

$$d = 622 \frac{p_{\text{п}}}{B - p_{\text{п}}} = 622 \frac{0,012}{0,0873} = 85,2 \text{ г/кг сух.в.}$$

Задача 3.2. Парциальное давление пара в атмосферном воздухе составляет 0,02 МПа, температура воздуха равна $t = 70^\circ\text{C}$. Определить относительную влажность воздуха.

Решение.

Температуре $t = 70^\circ\text{C}$ соответствует давление насыщения (Приложение) $p_{\text{н}} = 0,03117$ МПа. Следовательно, при парциальном давлении $p_{\text{п}} = 0,02$ МПа пар перегрет. Из таблицы для $p = 0,02$ МПа и $t = 70^\circ\text{C}$ получаем $v = 7,037$ м³/кг. Отсюда

$$p_{\text{п}} = \frac{1}{v} = 0,127 \text{ кг/м}^3.$$

Из таблицы для $t = 70^\circ\text{C}$

$$p_{\text{н}} = p'' = 0,1982 \text{ кг/м}^3,$$

отсюда относительно влажность воздуха

$$\varphi = \frac{0,127}{0,1982} = 64,1\% .$$

Тот же результат получится, если из таблицы найти давление насыщения при температуре $t = 70^\circ\text{C}$: $p_{\text{н}} = 0,03117$ МПа.

Тогда по уравнению

$$\varphi = \frac{p_{\text{п}}}{p_{\text{н}}} = \frac{0,02}{0,03117} = 64,2\%$$

Задача 3.3. Для сушки используют воздух при $t_1 = 20^\circ\text{C}$ и $\varphi_1 = 60\%$. В калорифере его подогревают до $t_2 = 95^\circ\text{C}$ и направляют в сушилку, откуда он выходит при $t_3 = 35^\circ\text{C}$. Вычислить конечное влагосодержание воздуха, расход воздуха и теплоту на 1 кг испаренной влаги.

Решение.

На h - d - диаграмме находим точку К на пересечении ее с $t_1 = 20^\circ\text{C}$ и $\varphi_1 = 60\%$ и определяем $d_1 = 9$ г/кг; $h_1 = 40$ кДж/кг.

Проведя линию $d = \text{const}$, находим в пересечении ее с $t_2 = 95^\circ\text{C}$ точку L, характеризующее состояние воздуха после выхода его из калорифера. Из точки L ведем линию $h = \text{const}$ до пересечения с изотермой $t_3 = 35^\circ\text{C}$, где находим точку M, характеризующую состояние воздуха по выходе из сушилки. Для точки M

$$d_3 = 33 \text{ г/кг}; h_3 = 117,6 \text{ кДж/кг.}$$

Таким образом, на 1 кг сухого воздуха изменение влагосодержания составляет

$$\Delta d = d_3 - d_1 = 33 - 9 = 24 \text{ г/кг.}$$

Для испарения 1 кг влаги потребуется сухого воздуха

Работа сжатия системы в политропном процессе между т.1 и т.2 определяется уравнением $l_{сж} = \frac{1}{n-1}(p_2v_2 - p_1v_1)$, которое справедливо только для политропных процессов в идеальных газах.

$$l_{\kappa} = p_2v_2 - p_1v_1 + \frac{1}{n-1}(p_2v_2 - p_1v_1) = (p_2v_2 - p_1v_1) \cdot \left(1 + \frac{1}{n-1}\right) = \frac{n}{n-1}(p_2v_2 - p_1v_1) = n \cdot l_{сж}$$

что и требовалось доказать.

2). Рассмотрим процессы сжатия в p v - и T s -диаграммах. Сжатие производится: а) по изотерме; б) по адиабате; в) по политропе с показателем $n = 1,2$.

Политропный процесс описывается уравнением:

$$pv^n = \text{const}$$

где n – показатель политропы.

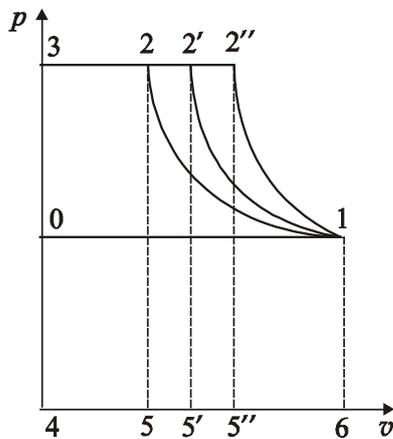


Рис.4.1. p v -Диаграмма

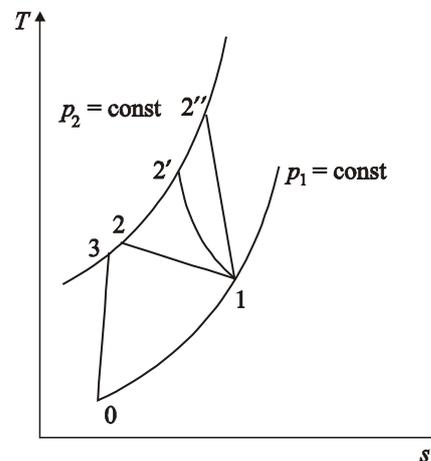


Рис.4.2. T s -Диаграмма

При $n = 1$: $pv = \text{const}$ — уравнение идеального газа для изотермического процесса.

При $n = k$: $pv^k = \text{const}$ — уравнение адиабаты Пуассона, где k – показатель адиабаты (изоэнтропы). Показатель изоэнтропы идеального газа зависит от количества атомов в молекуле газа и для одноатомного газа равен 1,67, двухатомного — 1,40, трех- и многоатомного — 1,30.

Процессы сжатия:

1-2 — изотермический процесс для $n = 1$

1-2' — политропный процесс для $n = 1,2 < k = 1,4$

1-2'' — адиабатный процесс для $n = k = 1,4$.

3) Определим для каждого процесса сжатия удельный объем и температуру газа в конце сжатия, изменение внутренней энергии, энтальпии и энтропии в процессе сжатия, работу процесса сжатия, а также работу и мощность привода компрессора, количество отводимого тепла.

а) изотермический процесс описывается законом Бойля-Мариотта:

$$pv = \text{const.}$$

На основании уравнения состояния идеального газа

$$p_1 v_1 = RT_1 \Rightarrow v_1 = \frac{RT_1}{p_1}$$

где $R = \frac{R_\mu}{\mu_B} = \frac{8314,33}{29} = 286,70$ Дж/кг·К – удельная газовая постоянная.

$$v_1 = \frac{286,7 \cdot (25 + 273)}{10^5} = 0,854 \text{ м}^3/\text{кг}$$

$$p_1 = 1 \text{ бар} = 10^5 \text{ Па.}$$

На основании закона Бойля-Мариотта:

$$p_1 v_1 = p_2 v_2 \Rightarrow v_2 = v_1 \cdot \frac{p_1}{p_2} = 0,854 \cdot \frac{10^5}{11 \cdot 10^5} = 0,078 \text{ м}^3/\text{кг.}$$

$$T_2 = T_1 = 25 + 273 = 298 \text{ К.}$$

Изменение внутренней энергии $\Delta u = 0$.

Изменение энтальпии $\Delta h = 0$.

Изменение энтропии:

$$\Delta s = R \ln \frac{p_1}{p_2} = 286,70 \ln \frac{10^5}{11 \cdot 10^5} = -687,48 \text{ Дж/кг·К.}$$

Работа процесса сжатия

$$l_{\text{сж}} = p_1 v_1 \ln \frac{p_1}{p_2} = 10^5 \cdot 0,854 \cdot \ln \frac{10^5}{11 \cdot 10^5} = -204780,26 \text{ Дж/кг.}$$

Для изотермического процесса сжатия работа привода компрессора

$$I_k = l_{\text{сж}} \quad (n = 1)$$

Мощность $N_k = L_{\text{сж}} = I_k \cdot G = 204780,26 \cdot 12 = 2457363,12 \text{ Вт} = 2457,36 \text{ кВт.}$

Количество отводимого тепла (для идеального газа $\Delta u = 0$):

$$Q = L_{\text{сж}} = 2457,36 \text{ кВт.}$$

б) адиабатный процесс: $p v^k = \text{const.}$

$$p_1 v_1^k = p_2 v_2^k \Rightarrow v_2 = v_1 \cdot \left(\frac{p_1}{p_2}\right)^{\frac{1}{k}},$$

$$v_2 = 0,854 \cdot \left(\frac{10^5}{11 \cdot 10^5}\right)^{\frac{1}{1,4}} = 0,154 \text{ м}^3/\text{кг.}$$

На основании уравнения Клапейрона

$$p_2 v_2 = RT_2 \Rightarrow T_2 = \frac{p_2 \cdot v_2}{R} = \frac{11 \cdot 10^5 \cdot 0,154}{286,7} = 591 \text{ К.}$$

Изменение внутренней энергии

$$\Delta u = c_v \cdot (T_2 - T_1) = \frac{R}{k-1} \cdot (T_2 - T_1) = \frac{286,7}{1,4-1} \cdot (591 - 298) = 210007,75 \text{ Дж/кг} = 210,01 \text{ кДж/кг.}$$

Изменение энтальпии

$$\Delta h = c_p \cdot (T_2 - T_1) = \frac{k}{k-1} \cdot R \cdot (T_2 - T_1) \text{ Дж/кг,}$$

$$\Delta h = \frac{1,4}{1,4-1} \cdot 286,7 \cdot (591 - 298) = 294010,85 \text{ Дж/кг} = 294,01 \text{ кДж/кг.}$$

Изменение энтропии $\Delta s = 0$ (адиабатный процесс — изоэнтропный процесс).

Работа процесса сжатия:

$$l_{\text{сж}} = -\Delta u = -210,01 \text{ кДж/кг.}$$

Работа привода компрессора:

$$l_{\text{к}} = k \cdot l_{\text{сж}} = 1,4 \cdot (-210,01) = -294,01 \text{ кДж/кг.}$$

Мощность привода компрессора:

$$N_{\text{к}} = l_{\text{к}} \cdot G = 294,01 \cdot 12 = 3528,12 \text{ кВт.}$$

Количество отводимого тепла: $Q = 0$ ($dq = 0$, адиабатный процесс — процесс без сообщения или отнятия теплоты извне).

в) политропный процесс: $p v^n = \text{const}$.

$$p_1 v_1^n = p_2 v_2^n \Rightarrow v_2 = v_1 \left(\frac{p_1}{p_2} \right)^{\frac{1}{n}},$$

$$v_2 = 0,854 \cdot \left(\frac{10^5}{11 \cdot 10^5} \right)^{\frac{1}{1,2}} = 0,116 \text{ м}^3/\text{кг.}$$

$$T_2 = \frac{p_2 \cdot v_2}{R} = \frac{11 \cdot 10^5 \cdot 0,116}{286,7} = 445 \text{ К.}$$

Изменение внутренней энергии

$$\Delta u = c_v \cdot (T_2 - T_1) = \frac{R}{k-1} \cdot (T_2 - T_1) = \frac{286,7}{1,4-1} \cdot (445 - 298) = 105362,25 \text{ Дж/кг} = 105,36 \text{ кДж/кг.}$$

Изменение энтальпии

$$\Delta h = c_p \cdot (T_2 - T_1) = \frac{k}{k-1} \cdot R \cdot (T_2 - T_1) = k \cdot \Delta u = 1,4 \cdot 105362,25 = 147507,15 \text{ Дж/кг} = 147,51$$

кДж/кг.

Изменение энтропии:

$$\Delta s = c_v \cdot \frac{n-k}{n-1} \cdot \ln \frac{T_2}{T_1} = \frac{R(n-k)}{(k-1) \cdot (n-1)} \cdot \ln \frac{T_2}{T_1} \text{ Дж/кг} \cdot \text{К,}$$

$$\Delta s = \frac{286,7 \cdot (1,2-1,4)}{(1,4-1) \cdot (1,2-1)} \cdot \ln \frac{445}{298} = -287,40 \text{ Дж/кг} \cdot \text{К.}$$

Работа процесса сжатия:

$$l_{\text{сж}} = \frac{1}{n-1} \cdot R(T_2 - T_1) = \frac{1}{1,2-1} \cdot 286,7 \cdot (298 - 445) = -210724,50 \text{ Дж/кг} = -210,72 \text{ кДж/кг.}$$

$$I_k = n \cdot I_{сж} = 1,2 \cdot (-210,72) = -252,86 \text{ кДж/кг.}$$

Мощность привода компрессора:

$$N_k = I_k \cdot G = 252,86 \cdot 12 = 3034,32 \text{ кВт.}$$

Количество отводимого тепла:

$$q = c_v \cdot \frac{n-k}{n-1} \cdot (T_2 - T_1) = \frac{R(n-k)}{(k-1) \cdot (n-1)} \cdot (T_2 - T_1),$$

$$q = \frac{286,7 \cdot (1,2 - 1,4)}{(1,4 - 1) \cdot (1,2 - 1)} \cdot (445 - 298) = -105362,25 \text{ Дж/кг.}$$

$$Q_{отв} = q \cdot G = 105362,25 \cdot 12 = 1264347 \text{ Вт} = 1264,35 \text{ кВт}$$

Сводная таблица результатов расчета

Процесс	$\Delta u,$ кДж/кг	$\Delta h,$ кДж/кг	$\Delta s,$ Дж/кг·К	$I_{сж},$ кДж/кг	$I_k,$ кДж/кг	$N_k,$ кВт	$Q,$ кВт
Изотермический	0	0	-687,48	-204,78	-204,78	2457,36	2457,36
Адиабатный	210,01	294,01	0	-210,01	-294,01	3528,12	0
Политропный	105,36	147,51	-287,40	-210,72	-252,86	3034,32	1264,35

Вывод: при заданной производительности наименьшая мощность на привод компрессора требуется при изотермическом сжатии, а наибольшая – при адиабатном. Если увеличивать отбор тепла при реальном политропном процессе, мы будем приближать его к идеальному изотермическому процессу.

Задача 4.2. Пар фреона-12 при температуре $t_1 = -20^\circ\text{C}$ поступает в компрессор, где изоэнтропно сжимается до давления, при котором его температура становится равной $t_2 = 25^\circ\text{C}$, а сухость пара $x_2 = 1$. Из компрессора фреон поступает в конденсатор, где при постоянном давлении обращается в жидкость, после чего адиабатно расширяется в дросселе (т.е. при $h = \text{const}$) до температуры $t_4 = t_1$.

Определить: холодильный коэффициент установки; массовый расход фреона; теоретическую мощность привода компрессора, если холодопроизводительность установки $Q = 150$ кВт. Изобразите схему установки и ее цикл в.

Решение. Удельная холодопроизводительность

$$q_2 = r_1 \cdot (x_1 - x_2), \text{ кДж/кг,}$$

где r_1 – теплота парообразования при t_1 (при $t_1 = -20^\circ\text{C}$ из Приложения найдем, что $r_1 = 163,5$ кДж/кг);

x_1, x_2 – степень сухости пара перед компрессором и после дроссельного вентиля соответственно.

Степень сухости x_1 пара определим по уравнению:

$$s_1 = s_2 = s_2'' = s_1' + (s_1'' - s_1')x_1,$$

где из приложения 2:

$$s_1' = 4,1183 \frac{\text{кДж}}{\text{кг} \cdot \text{К}}; s_1'' = 4,7645 \frac{\text{кДж}}{\text{кг} \cdot \text{К}} \text{ (при } t_1 = -20^\circ \text{C)}; s_2'' = 4,7455 \frac{\text{кДж}}{\text{кг} \cdot \text{К}} \text{ (при } t_2 = 25^\circ \text{C)};$$

$$\text{Следовательно } x_1 = \frac{s_2'' - s_1'}{s_1'' - s_1'} = \frac{4,7455 - 4,1183}{4,7645 - 4,1183} = 0,971.$$

Степень сухости после дроссельного вентиля определяем по уравнению:

$$h_4 = h_3' = h_1' + x_4 \cdot r_1,$$

$$\text{где } h_3' = 442,8 \frac{\text{кДж}}{\text{кг}} \text{ (при } t_2 = 25^\circ \text{C)};$$

$$h_1' = 400,5 \frac{\text{кДж}}{\text{кг}} \text{ (при } t_1 = -20^\circ \text{C)}.$$

$$\text{Тогда } x_4 = \frac{h_3' - h_1'}{r_1} = \frac{442,8 - 400,5}{163,5} = 0,259.$$

Удельная холодопроизводительность

$$q_2 = r_1(x_1 - x_4) = 163,5(0,971 - 0,259) = 116,4 \frac{\text{кДж}}{\text{кг}}.$$

Теплота, отведенная от рабочего тела в конденсаторе $q_1 = h_2 - h_3 = h_2'' - h_3'$,

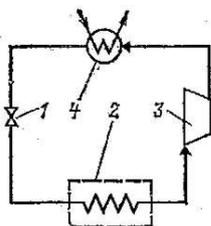
$$\text{где } h_2'' = 584,5 \frac{\text{кДж}}{\text{кг}} \text{ (при } t_2 = 25^\circ \text{C)}.$$

$$\text{Тогда } q_1 = h_2'' - h_3' = 584,5 - 442,8 = 141,7 \frac{\text{кДж}}{\text{кг}}.$$

Работа, затраченная в цикле, $l_{\text{ц}} = q_1 - q_2 = 141,7 - 116,4 = 25,3 \text{ кДж/кг}$.

$$\text{Холодильный коэффициент } \varepsilon = \frac{q_2}{l_{\text{ц}}} = \frac{116,4}{25,3} = 4,6.$$

$$\text{Массовый расход фреона } G = \frac{Q}{q_2} = \frac{150}{116,4} = 1,289 \frac{\text{кг}}{\text{с}}.$$



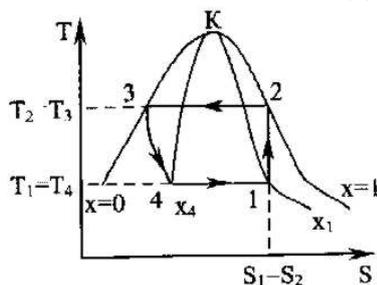
4 –

Теоретическая мощность привода компрессора

$$N_0 = \frac{Q}{\varepsilon} = \frac{150}{4,6} = 32,6 \text{ кВт}.$$

Схема установки:

1 – дроссельный вентиль, 2- испаритель, 3 – компрессор, конденсатор.



Цикл в T - s -координатах:

Задача 4.3. Начальные параметры воздуха, поступающего в компрессор ГТУ со сжиганием топлива при $p = \text{const}$, $p_1 = 0,1$ МПа; $t_1 = 20^\circ\text{C}$. Степень повышения давления в компрессоре ГТУ $\beta = 6$. Температура газов перед соплами турбины $t_3 = 700^\circ\text{C}$. Рабочее тело обладает свойствами воздуха. Теплоемкость воздуха принять независимой от температуры и равной $c_p = 1,005$ кДж/кг·К. Расход воздуха через компрессор $m_t = 2 \cdot 10^5$ кг/ч.

Определите:

1) Параметры всех точек идеального цикла ГТУ, термический КПД ГТУ, теоретические мощности турбины, компрессора и всей ГТУ.

2) Параметры всех точек действительного цикла (с учетом необратимости процессов расширения и сжатия в турбине и компрессоре), приняв внутренние относительные КПД турбины и компрессора соответственно $\eta_{oi}^t = 0,87$ и $\eta_{oi}^k = 0,85$.

3) Внутренний КПД ГТУ, действительные мощности турбины, компрессора и всей ГТУ. Представьте оба цикла в Ts -диаграмме.

Решение.

Температуры в точках обратимого цикла рассчитываются с использованием уравнения связи между параметрами в адиабатном процессе:

$$T_2 = T_1 \left(\frac{p_2}{p_1} \right)^{\frac{k-1}{k}} = 293 \cdot 6^{\frac{1,4-1}{1,4}} = 489 \text{ К}; \quad t_2 = 216^\circ\text{C};$$

$$T_4 = \frac{T_3 \cdot T_1}{T_2} = \frac{973 \cdot 293}{489} = 583 \text{ К}; \quad t_4 = 310^\circ\text{C}.$$

Термический КПД

$$\eta_t = 1 - \frac{1}{\beta^{\frac{k-1}{k}}} = 1 - \frac{1}{6^{\frac{1,4-1}{1,4}}} = 0,401.$$

Теоретические мощности:

$$N_T^{\text{теор}} = m_t (h_3 - h_4) = m_t c_p (t_3 - t_4) = \frac{2 \cdot 10^5 \cdot 1,005 (700 - 310)}{3600} = 21775 \text{ кВт}$$

$$N_K^{\text{теор}} = m_t (h_2 - h_1) = m_t c_p (t_2 - t_1) = \frac{2 \cdot 10^5 \cdot 1,005 (216 - 20)}{3600} = 10943 \text{ кВт}$$

$$N_{\text{ГТУ}}^{\text{теор}} = N_T^{\text{теор}} - N_K^{\text{теор}} = 21775 - 10943 = 10832 \text{ кВт}$$

Температуры в точках реального цикла рассчитываются следующим образом. С помощью основной формулы для внутреннего относительного КПД компрессора

$$\eta_{oi}^k = \frac{h_2 - h_1}{h_{2\text{д}} - h_1} = \frac{t_2 - t_1}{t_{2\text{д}} - t_1}$$

находится температура в конце сжатия t_5 :

$$t_{2д} = \frac{t_2 - t_1}{\eta_{oi}^k} + t_1 = \frac{216 - 20}{0,85} + 20 = 251^\circ\text{C}.$$

Температура в конце необратимого адиабатного расширения находится аналогично. Внутренний относительный КПД турбины:

$$\eta_{oi}^T = \frac{h_3 - h_{4д}}{h_3 - h_4} = \frac{t_3 - t_{4д}}{t_3 - t_4},$$

отсюда

$$t_{4д} = t_3 - \eta_{oi}^T (t_3 - t_4) = 700 - 0,87 \cdot (700 - 310) = 361^\circ\text{C}.$$

Внутренний КПД ГТУ

$$\eta_{i}^{\text{ГТУ}} = \frac{(h_3 - h_{4д}) - (h_{2д} - h_1)}{h_3 - h_{2д}} = \frac{(t_3 - t_{4д}) - (t_{2д} - t_1)}{t_3 - t_{2д}} = \frac{(700 - 361) - (251 - 20)}{700 - 251} = 0,242$$

Действительная мощность турбины

$$N_T^Д = m_\tau c_p (t_3 - t_{4д}) = \frac{2 \cdot 10^5 \cdot 1,005 (700 - 361)}{3600} = 189278 \text{ кВт}$$

или

$$N_T^Д = N_T^{\text{теор}} \cdot \eta_{oi}^T = 21775 \cdot 0,87 = 18944 \text{ кВт}.$$

Действительная мощность привода компрессора

$$N_K^Д = m_\tau (h_{2д} - h_1) = m_\tau c_p (t_{2д} - t_1) = \frac{2 \cdot 10^5 \cdot 1,005 (251 - 20)}{3600} = 12898 \text{ кВт}.$$

или

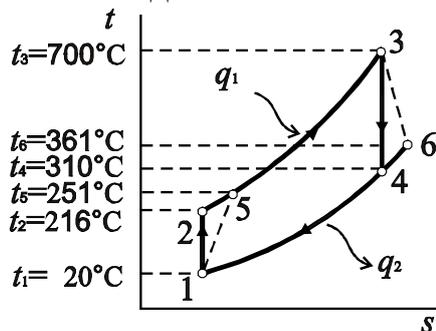
$$N_K^Д = N_K^{\text{теор}} / \eta_{oi}^T = 10943 / 0,85 = 12874 \text{ кВт}.$$

Действительная мощность газотурбинной установки

$$N_{\text{ГТУ}}^Д = N_T^Д - N_K^Д = 18944 - 12874 = 6070 \text{ кВт}.$$

Приведенный расчет показывает, как сильно влияет необратимость процессов сжатия и расширения газа на КПД и мощность газотурбинной установки.

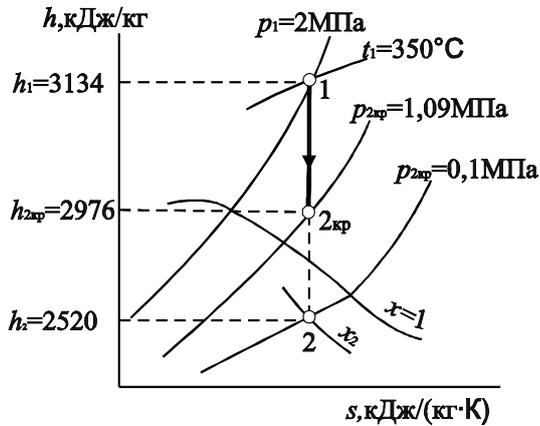
Изобразим идеальный и реальный циклы ГТУ с изобарным подводом тепла и адиабатным сжатием воздуха в компрессоре в Ts -координатах:



- 1-2 – адиабатное сжатие воздуха в компрессоре;
- 2-3 – изобарный подвод тепла (горение топлива);
- 3-4 – адиабатное расширение продуктов сгорания в соплах турбины;
- 4-1 – изобарный отвод тепла (выход продуктов сгорания в атмосферу).
- 1-2-3-4-1 – обратимый цикл ГТУ (идеальный);
- 1-5-3-6-1 – необратимый цикл (реальный).

РАЗДЕЛ 5. ИСТЕЧЕНИЕ И ДРОССЕЛИРОВАНИЕ ГАЗОВ И ПАРОВ

Задача 5.1. Пар, имеющий начальное давление $p_1 = 2,0$ МПа и температуру $t = 350^\circ\text{C}$, вытекает в атмосферу с давлением $p_2 = 0,1$ МПа. Определить скорость адиабатного истечения через простое и расширяющееся (комбинированное) сопла.



Решение.

Так как весь процесс истечения происходит почти в области перегретого пара (рис.), то можно принять $\beta_{кр} = 0,546$. Для нашего случая

$$\beta = \frac{p_2}{p_1} = \frac{0,1}{2,0} = 0,05.$$

Следовательно, в простом сопле полного расширения пара не будет, и на выходе из сопла установится критическое давление $p_{2кр} = \beta_{кр} \cdot p_1 = 0,546 \cdot 2,0 = 1,092$ МПа. Это значит, что адиабатой расширения пара при его истечении из суживающегося сопла будет не линия 1-2, а линия 1-2_{кр}. Скорость истечения пара

$$w_2 = w_{2кр} = 44,7 \sqrt{h_1 - h_{2кр}} = 44,7 \sqrt{3134 - 2976} = 564 \text{ м/с},$$

где $h_{2кр}$ соответствует давлению пара при $p_{2кр} = 1,092$ МПа.

Скорость истечения через комбинированное сопло будет больше критической и равной

$$w_2 = 44,8 \sqrt{h_1 - h_2} = 44,8 \sqrt{3134 - 2520} = 1100 \text{ м/с},$$

где h_2 соответствует давлению пара при $p_2 = 0,1$ МПа.

Задача 5.2. Из комбинированного сопла газовой турбины вытекают продукты сгорания при давлении $p_2 = 1,3 \cdot 10^5$ Па. При входе в сопло давление газов равно $p_1 = 10,0 \cdot 10^5$ Па при температуре 1200 К (927°C). Массовый расход газов $m = 0,8$ кг/с. Истечение считать адиабатным, а показатель $k = \frac{c_p}{c_v} = 1,35$.

Продукты сгорания обладают свойствами воздуха. Трением в канале сопла и входной скоростью пренебречь. Определить минимальное и выходное сечения сопла, а также температуру газов при выходе из сопла.

Решение. Определим критическое отношение давлений по данным задачи:

$$\beta_{кр} = \frac{p_{кр}}{p_1} = \left(\frac{2}{k} + 1\right)^{\frac{k}{k-1}} = \left(\frac{2}{1,35} + 1\right)^{\frac{1,35}{1,35-1}} = 0,537.$$

По данным задачи $\beta = \frac{p_2}{p_1} = \frac{1,3}{10} = 0,13 < \beta_k = 0,537$. Следовательно,

обязательно надо применить комбинированное сопло Лавалья. Определим скорость газов в критическом сечении сопла:

$$w_k = \sqrt{2 \frac{k}{k+1} p_1 v_1} = \sqrt{2 \frac{k}{k+1} RT_1} = \sqrt{2 \frac{1,35}{1,35+1} 287 \cdot 1200} = 629 \text{ м/с.}$$

Зная критическую скорость и массовый расход газов, можно определить площадь критического (минимального) сечения сопла:

$$f_{\min} = \frac{mv_k}{w_k} = \frac{0,8 \cdot 0,546}{629} = 0,000694 \text{ м}^2 = 694 \text{ мм}^2,$$

где $v_k = \frac{v_1}{\beta_k^{1/k}} = \frac{0,3444}{0,537^{1/1,35}} = 0,546 \text{ м}^3/\text{кг}$, а v_1 определено по формуле

Клапейрона-Менделеева:

$$v_1 = \frac{RT_1}{p_1} = \frac{287 \cdot 1200}{10,0 \cdot 10^5} = 0,3444 \text{ м}^3/\text{кг.}$$

Диаметр критического сечения сопла

$$d_k = \sqrt{\frac{f_{\min}}{0,785}} = \sqrt{\frac{694}{0,785}} = 29,8 \text{ мм.}$$

Длину суживающейся части сопла берем равной диаметру критического сечения (из конструктивных соображений) $l_1 = 30 \text{ мм}$. Определим скорость газов в выходном сечении сопла:

$$\begin{aligned} w_B &= \sqrt{2 \frac{k}{k-1} p_1 v_1 \left[1 - \left(\frac{p_2}{p_1} \right)^{\frac{k-1}{k}} \right]} = \sqrt{2 \frac{k}{k-1} RT_1 \left[1 - \beta^{\frac{k-1}{k}} \right]} = \\ &= \sqrt{2 \frac{1,35}{1,35-1} 287 \cdot 1200 \left[1 - 0,13^{\frac{1,35-1}{1,35}} \right]} = 782 \text{ м/с.} \end{aligned}$$

Зная выходную скорость газов, можно определить площадь выходного сечения сопла :

$$f_B = \frac{mv_2}{w_B} = \frac{0,8 \cdot 1,524}{782} = 0,001559 \text{ м}^2 = 1559 \text{ мм}^2,$$

где $v_2 = \frac{v_1}{\beta^{1/k}} = \frac{0,3444}{0,13^{1/1,35}} = 1,524 \text{ м}^3/\text{кг}$.

Диаметр выходного сечения сопла $D = \sqrt{\frac{f_B}{0,785}} = \sqrt{\frac{1559}{0,785}} = 44,6 \text{ мм}$.

Длину расширяющейся части сопла l_2 определим по уравнению $l_2 = \frac{D - d_k}{2 \operatorname{tg} \frac{\alpha}{2}}$. Угол конусности насадки принимаем равным 10° . Тогда

$$l_2 = \frac{44,6 - 29,8}{2 \cdot 0,08749} = 85 \text{ мм.}$$

Длина сопла газовой турбины $l = l_1 + l_2 = 30 + 85 = 115$ мм.

Температуру газов на выходе из сопла T_2 определим из уравнения Клапейрона-Менделеева:

$$T_2 = \frac{p_2 v_2}{R} = \frac{1,3 \cdot 10^5 \cdot 1,524}{287} = 693 \text{ К (420}^\circ\text{С).}$$

Задача 5.3. Из суживающегося сопла вытекает кислород, находящийся в резервуаре, давление и температура в котором постоянны и соответственно равны: $p_0 = 6$ МПа и $t_0 = 100^\circ\text{С}$. Давление среды, в которую происходит истечение $p_2 = 3,6$ МПа.

Определите скорость истечения и расход кислорода, если площадь выходного сечения сопла $f = 20$ мм².

Газ подчиняется уравнению $p v = RT$, теплоемкость не зависит от температуры. Входная скорость близка к нулю. Процесс изменения состояния текущего газа — изоэнтропный.

Решение.

Прежде всего устанавливаем, каков режим истечения, для чего находим значение $\beta = p_2 / p_0$:

$$\beta = \frac{3,6}{6,0} = 0,6$$

Сравниваем полученное значение с критическим отношением давлений:

$$\beta_{\text{кр}} = \frac{p_{\text{кр}}}{p_0} = \left(\frac{2}{k+1} \right)^{\frac{k}{k-1}}.$$

Для кислорода $k = 1,4$ и $\beta_{\text{кр}} = 0,528$. Следовательно, $\beta > \beta_{\text{кр}}$, т.е. отношение давления среды к давлению перед соплом больше, чем критическое. Это означает, что располагаемый перепад давлений будет использован полностью, на выходе из сопла установится давление, равное давлению среды, а скорость истечения окажется меньшей, чем критическая, т.е. будет дозвуковой. Ее следует подсчитать по формуле

$$w_2 = \sqrt{2 \frac{k}{k-1} RT_1 \left(1 - \left(\frac{p_2}{p_0} \right)^{\frac{k-1}{k}} \right)} = \sqrt{2 \frac{1,4}{1,4-1} \frac{8314}{32} 373 \left(1 - \left(\frac{3,6}{6,0} \right)^{\frac{1,4-1}{1,4}} \right)} = 303 \text{ м/с}$$

Подсчитываем удельный объем кислорода в выходном сечении:

$$v_2 = v_0 \left(\frac{p_0}{p_2} \right)^{\frac{1}{k}} = \frac{R \cdot T_0}{p_0} \left(\frac{p_0}{p_2} \right)^{\frac{1}{k}} = \frac{8314}{32 \cdot 6 \cdot 10^5} \left(\frac{6,0}{3,6} \right)^{\frac{1}{1,4}} = 0,0232 \text{ м}^3/\text{кг}$$

Наконец, находим массовый секундный расход кислорода при помощи формулы неразрывности:

$$m_{\tau} = \frac{f_2 \cdot w_2}{v_2} = \frac{20 \cdot 10^{-6} \cdot 303}{0,0232} = 0,256 \text{ кг/с.}$$

Задача 5.4. Пар при начальных параметрах $p_0 = 13,0$ МПа и $t_0 = 580^{\circ}\text{C}$ вытекает из расширяющегося сопла в среду с давлением $0,1$ МПа. Площадь минимального сечения $f_{\min} = 3 \text{ см}^2$.

Определите секундный расход пара, скорость истечения и площадь выходного сечения сопла. Потерями в сопле и начальной скоростью пренебречь.

Задачу решайте, сравнивая критическую скорость с местной скоростью звука.

Решение

Отношение давлений $\beta = p_2/p_0 = 0,1/13,0 = 0,0077$; $\beta < \beta_{\text{кр}} \approx 0,55$, поэтому при расчетном режиме в расширяющейся части поток будет сверхзвуковым, а в минимальном сечении будет критическая скорость, м/с

$$w_{\text{кр}} = \sqrt{2 \cdot 10^3 (h_0 - h_{\text{кр}})},$$

если энтальпия измеряется в кДж/кг. Эта скорость равна местной скорости звука, м/с, которая в самом общем случае должна быть подсчитана по формуле Лапласа:

$$a_* = \sqrt{-v^2 \left(\frac{\partial p}{\partial v} \right)_s}$$

где давление p измеряется в паскалях.

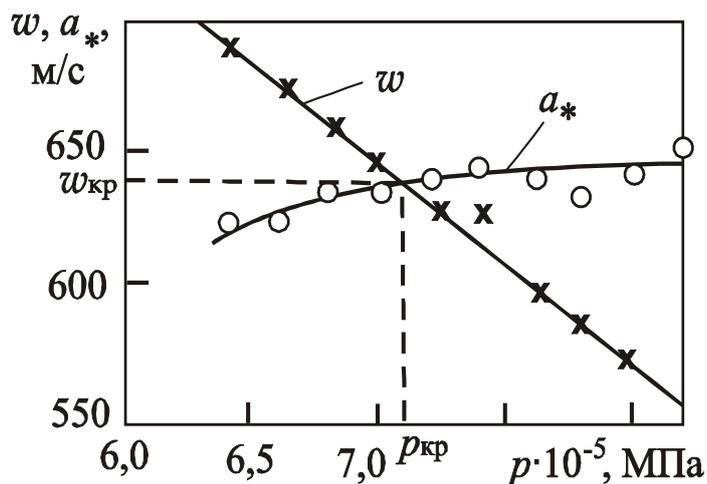
Для нахождения параметров в минимальном сечении («критических») нужно сделать тождественно равными выражения для $w_{\text{кр}}$ и a_* , т.е. добиться, чтобы выполнялось равенство

$$\sqrt{2 \cdot 10^3 (h_0 - h_{\text{кр}})} = \sqrt{-v^2 \left(\frac{\partial p}{\partial v} \right)_s}$$

Эту задачу можно выполнить, пользуясь таблицами свойств водяного пара, заменяя $(\partial p / \partial v)_s \approx (\Delta p / \Delta v)_s$, т.е. через первые табличные разности при постоянной энтропии. По таблицам находим значения $s = 6,698$ кДж/(кг·К) и $h_0 = 3543$ кДж/кг, затем составляем расчетную таблицу $(w, a_*) = f(p)$. Интервалы для давления выбираем вблизи критического давления $p_{\text{кр}} = 0,55 \cdot 13,0 = 7,1$ МПа.

p , МПа	v , м ³ /кг	h , кДж/кг	$\left(\frac{\Delta p}{\Delta v}\right)_s \cdot 10^{-8}$	a_* , м/с	w , м/с
6,2	0,05037	3297	—	—	—
6,4	0,04914	3307	- 1,625	625	689
6,6	0,04794	3316	- 1,670	624	674
6,8	0,04686	3326	- 1,852	635	658
7,0	0,04581	3335	- 2,01	641	645
7,2	0,04483	3345	-2,041	641	630
7,4	0,04385	3353,5	- 2,222	650	630
7,6	0,04296	3363,7	- 2,250	643	599
7,8	0,04207	3369,25	-2,250	635	590
8,0	0,04125	3378,2	- 2,440	644	573
8,2	0,04049	3389,2	-2,630	654	555

При составлении таблицы величины v и h находим, линейно интерполируя при $s = 6,698$ кДж/(кг·К) = const. После этого строим графики $(w, a_*) = f(p)$, представленные на рисунке. Очевидно, что пересечение кривых дает



Рисунок

положение критической точки, для которой $p_{кр} = 7,08$ МПа; $w_{кр} = 640$ м/с. Дальнейшее решение задачи проводится обычным порядком. Удельный объем в минимальном сечении находится из составленной нами таблицы, значения h_2 и v_2 подсчитываются при помощи таблиц водяного пара при $s = 6,698$ кДж/(кг·К) = const или находятся по hs -диаграмме.

Ответ: $w_2 = 1493$ м/с; $m_t = 0,421$ кг/с; $f_2 = 42,4$ см².

Примечание: в данной задаче приведен второй способ определения критической скорости при истечении реальных газов, основанный на том, что эта скорость равна скорости звука, найденной по уравнению Лапласа.

КОНТРОЛЬНЫЕ ЗАДАНИЯ ДЛЯ САМОСТОЯТЕЛЬНОЙ РАБОТЫ

Методические указания

К решению задач контрольного задания следует приступать только после изучения соответствующего раздела курса. Перед выполнением контрольной работы следует ознакомиться с ходом решения аналогичных задач по учебной литературе. Рекомендуется запоминать примерные значения параметров задачи (исходные и вычисленные): они также содержат полезную информацию.

Контрольные задачи составлены по стовариантной системе, в которой к каждой задаче исходные данные выбираются из соответствующих таблиц по **предпоследней и последней цифрам шифра** (номера зачетной книжки) студента. **Вариант работы должен соответствовать шифру студента.** Работы, выполненные не по своему варианту, не рассматриваются.

Тетрадь для контрольной работы должна быть подписана следующим образом:

Тетрадь
для контрольной работы
по курсу "Техническая термодинамика"
студента группы _____
факультета _____
Ф.И.О. _____
Шифр _____
Вариант № _____

При оформлении контрольных задач необходимо соблюдать следующие условия:

1. Выписывать условие задач и исходные данные.
2. Решение задач сопровождать кратким пояснительным текстом, в котором указывать, какие величины подставляются в формулу и откуда они берутся (из условия задачи, из справочника или были определены выше и т.д.).
3. Вычисления проводить в единицах СИ, показывать ход решения. После решения задачи нужно дать краткий анализ полученных результатов и сделать выводы. Всегда, если это возможно, необходимо осуществлять контроль своих действий и оценивать достоверность полученных числовых данных.
4. В конце работы привести список использованной литературы и поставить свою подпись.
5. Для письменных замечаний рецензента оставлять чистые поля в тетради и чистые 1-2 страницы в конце работы.
6. Исправления по замечаниям рецензента должны быть записаны отдельно на чистых листах в той же тетради после заголовка "Исправления по замечаниям".
7. Работа, в которой вышеназванные пункты не выполнены, не проверяется.

Контрольная работа №1
(к разделу "Техническая термодинамика")

Задача 1. Считая теплоемкость идеального газа зависящей от температуры, определить:

- а) параметры газа в начальном и конечном состояниях;
- б) изменение внутренней энергии;
- г) изменение энтальпии;
- в) теплоту, участвующую в процессе;
- г) работу расширения.

Построить график процесса в координатах $p-T$, $p-v$, $v-T$.

Исходные данные, необходимые для решения задачи, выбрать из таблицы 1.

Таблица 1

Предпоследняя цифра шифра	Процесс	t_1 , °C	t_2 , °C	Последняя цифра шифра	Газ	p , МПа	m , кг
0	Изохорный	2400	400	0	O ₂	1	2
1	Изобарный	2200	300	1	N ₂	4	5
2	Адиабатный	2000	300	2	H ₂	2	10
3	Изохорный	1800	500	3	N ₂	3	4
4	Изобарный	1600	400	4	CO	5	6
5	Адиабатный	1700	100	5	CO ₂	6	8
6	Изохорный	1900	200	6	N ₂	8	3
7	Изобарный	2100	500	7	H ₂	10	12
8	Адиабатный	2300	200	8	CO ₂	12	6
9	Изобарный	1400	100	9	CO	7	9

Зависимость теплоемкости от температуры дана в Приложении 5.

Задача 2. Водяной пар, имея начальные параметры $p_1 = 5$ МПа и $x_1 = 0,9$, нагревается при постоянном давлении до температуры t_2 , затем дросселируется до давления p_3 . При давлении p_3 пар попадает в сопло Лавая, где расширяется до давления $p_4 = 5$ кПа. Определить, используя h - s -диаграмму водяного пара: количество теплоты, подведенной к пару в процессе 1-2; изменение внутренней энергии, а также конечную температуру t_3 в процессе дросселирования 2-3;

конечные параметры и скорость на выходе из сопла Лаваля, а также расход пара в процессе адиабатного истечения 3-4, если известна площадь минимального сечения сопла f_{\min} .

Все процессы показать на hs -диаграмме. Данные, необходимые для решения задачи, выбрать из таблицы 2.

Таблица 2

Предпоследняя цифра шифра	$t_2, ^\circ\text{C}$	Последняя цифра шифра	$p_3, \text{МПа}$	$f_{\min}, \text{см}^2$	Предпоследняя цифра шифра	$t_2, ^\circ\text{C}$	Последняя цифра шифра	$p_3, \text{МПа}$	$f_{\min}, \text{см}^2$
0	300	0	1,4	10	5	460	5	0,9	60
1	330	1	1,3	20	6	500	6	0,8	70
2	370	2	1,2	30	7	570	7	0,7	80
3	400	3	1,1	40	8	550	8	0,6	90
4	420	4	1,0	50	9	600	9	0,5	100

Задача 3. Для теоретического цикла ГТУ с подводом теплоты при постоянном давлении определить параметры рабочего тела (воздуха) в характерных точках цикла, подведенную и отведенную теплоту, работу и термический КПД цикла, если начальное давление $p_1 = 0,1 \text{ МПа}$, начальная температура $t_1 = 27^\circ\text{C}$, степень повышения давления в компрессоре β , температура газа перед турбиной t_3 .

Определить теоретическую мощность ГТУ при заданном расходе воздуха G . Дать схему и цикл установки в p - и Ts -диаграммах. Данные для решения задачи выбрать из таблицы 3.

Таблица 3

Предпоследняя цифра шифра	$\beta = \frac{p_2}{p_1}$	Последняя цифра шифра	$t_3, ^\circ\text{C}$	$G, \text{кг/с}$	Предпоследняя цифра шифра	$\beta = \frac{p_2}{p_1}$	Последняя цифра шифра	$t_3, ^\circ\text{C}$	$G, \text{кг/с}$
0	6,0	0	700	35	5	7,5	5	725	60
1	6,5	1	725	25	6	7,0	6	750	70
2	7,0	2	750	30	7	6,5	7	775	80
3	7,5	3	775	40	8	6,0	8	800	90
4	8,0	4	700	50	9	7,0	9	825	100

Указание: Теплоемкость воздуха принять не зависящей от температуры и равной $1,005 \text{ кДж}/(\text{кг}\cdot\text{К})$.

Задача 4. Пар фреона-12 при температуре t_1 поступает в компрессор, где адиабатно сжимается до давления, при котором его температура становится равной t_2 , а сухость пара $x_2 = 1$. Из компрессора фреон поступает в конденсатор,

где при постоянном давлении обращается в жидкость, после чего адиабатно расширяется в дросселе до температуры $t_4 = t_1$.

Определить холодильный коэффициент установки, массовый расход фреона, а также теоретическую мощность привода компрессора, если холодопроизводительность установки Q . Изобразите схему установки и ее цикл в Ts -диаграмме. Данные для решения задачи выбрать из таблицы 4.

Указание: Задачу решить с помощью таблиц параметров насыщенного пара фреона-12 (см.приложение б).

Таблица 4

Предпоследняя цифра шифра	$t_1, ^\circ\text{C}$	$t_2, ^\circ\text{C}$	Последняя цифра шифра	$Q, \text{кВт}$	Предпоследняя цифра шифра	$t_1, ^\circ\text{C}$	$t_2, ^\circ\text{C}$	Последняя цифра шифра	$Q, \text{кВт}$
0	-15	10	0	270	5	-20	30	5	260
1	-10	10	1	240	6	-15	15	6	190
2	-15	25	2	130	7	-10	15	7	170
3	-20	20	3	280	8	-15	20	8	200
4	-20	15	4	300	9	-20	15	9	180

ИСПОЛЬЗОВАННАЯ ЛИТЕРАТУРА

- 621.1 К43 **Кириллин В.А.** Техническая термодинамика [Электронный ресурс] : учебник для вузов / Кириллин Владимир Алексеевич, В. В. Сычев, А. Е. Шейндлин ; В.А. Кириллин, В.В. Сычев, А.Е. Шейндлин. - 4 Мб. - Москва : МЭИ, 2016. - 1 файл. - Систем. требования: Acrobat Reader.
URL: <http://ed.donntu.org/books/20/cd9840.pdf>
- 621.1 Т34 **Теплотехника [Электронный ресурс]** : учебник для вузов / А. А. Александров [и др.] ; А.А. Александров, А.М. Архаров, В.Н. Афанасьев и др. ; под общ. ред. А.М. Архарова, В.Н. Афанасьева. - 5-е изд. - 84 Мб. - Москва : МГТУ им. Н.Э. Баумана, 2017. - 1 файл. - (Техническая физика и энергомашиностроение). - Систем. требования: Acrobat Reader.
URL: <http://ed.donntu.org/books/20/cd9837.pdf>
- 621.1 Л99 **Ляшков В.И.** Теоретические основы теплотехники [Электронный ресурс] : учебное пособие для вузов / В. И. Ляшков ; В.И. Ляшков. - 2-е изд., испр. и доп. - 59 Мб. - Москва : КНОРУС, 2015. - 1 файл. - Систем. требования: Acrobat Reader.
URL: <http://ed.donntu.org/books/20/cd9635.pdf>

Приложение 1

**Единицы СИ и переводные множители
для важнейших теплотехнических величин**

Наименование величин	Единицы СИ	Переводные множители для некоторых внесистемных единиц
Масса	1 кг	1 т.е.м. = $1 \frac{\text{кг} \cdot \text{с}^2}{\text{м}} = 9,81 \text{ кг}$ 1 т = 10^3 кг 1 г = 10^{-3} кг
Сила	$1 \text{ Н} = 1 \frac{\text{кг} \cdot \text{м}}{\text{с}^2}$	1 кГ = 9,81 Н
Объем	1 м ³	1 л = 1 дм ³ = 10^{-3} м^3
Плотность	$1 \frac{\text{кг}}{\text{м}^3}$	$1 \frac{\text{т.е.м.}}{\text{м}^3}$
Давление	$1 \text{ Па} = 1 \frac{\text{Н}}{\text{м}^2}$	1 ат = $1 \frac{\text{кГ}}{\text{см}^2} = 9,8 \cdot 10^4 \text{ Па}$ 1 бар = $1 \cdot 10^5 \text{ Па}$ 1 бар = 750,24 мм рт. ст. 1 бар = $1,02 \cdot 10^4 \text{ мм вод. ст.}$ 1 мм рт. ст. = 133,322 Па 1 мм вод. ст. = 9,81 Па
Энергия, работа, количество теплоты	1 Дж = 1 Н·м	1 кГ·м = 9,81 Дж 1 ккал = $4,19 \cdot 10^3 \text{ Дж}$ 1 кВт·ч = $3,6 \cdot 10^6 \text{ Дж}$
Коэффициенты теплоотдачи и теплопередачи	$1 \frac{\text{Вт}}{\text{м}^2 \cdot \text{К}}$	$1 \frac{\text{ккал}}{\text{ч} \cdot \text{м}^2 \cdot \text{К}} = 1,163 \frac{\text{Вт}}{\text{м}^2 \cdot \text{К}}$
Коэффициент теплопроводности	$1 \frac{\text{Вт}}{\text{м} \cdot \text{К}}$	$1 \frac{\text{ккал}}{\text{ч} \cdot \text{м} \cdot \text{К}} = 1,163 \frac{\text{Вт}}{\text{м} \cdot \text{К}}$
Теплоемкость	$1 \frac{\text{Дж}}{\text{К}}$	$1 \frac{\text{ккал}}{\text{К}} = 4,19 \cdot 10^3 \frac{\text{Дж}}{\text{К}}$
Энтропия	$1 \frac{\text{Дж}}{\text{К}}$	$1 \frac{\text{ккал}}{\text{К}} = 4,19 \cdot 10^3 \frac{\text{Дж}}{\text{К}}$

Приложение 2

Множители и приставки для образования десятичных, кратных и дольных единиц и их наименований

Множитель	Приставка		Пример	
	наименование	обозначение		
10^{15}	пета	П	петагерц	ПГц
10^{12}	тера	Т	тераджоуль	ТДж
10^9	гига	Г	гиганьютон	ГН
10^6	мега	М	мегаом	МОм
10^3	кило	к	километр	км
10^2	гекто	г	гектоватт	гВ
10^1	дека	да	декалитр	дал
10^{-1}	деци	д	дециметр	дм
10^{-2}	санти	с	сантиметр	см
10^{-3}	милли	м	миллиампер	мА
10^{-6}	микро	мк	микровольт	мкВ
10^{-9}	нано	н	наносекунда	нс
10^{-12}	пико	п	пикофарад	пф
10^{-15}	фемто	ф	фемтограмм	фг

Приложение 3

Соотношения между температурными шкалами

Наименование шкалы	Шкала Цельсия, $t, ^\circ\text{C}$	Шкала Кельвина, T, K	Шкала Ренкина, $T, ^\circ\text{Ra}$	Шкала Фаренгейт, $a, t, ^\circ\text{F}$	Шкала Реомюра, $t, ^\circ\text{R}$
Шкала Цельсия, $t, ^\circ\text{C}$	—	$t^\circ\text{C} + 273,15$	$1,8(t^\circ\text{C} + 273,15)$	$1,8 t^\circ\text{C} + 32$	$0,8 t^\circ\text{C}$

Приложение 4

Значения газовой постоянной и теплоемкости для разных веществ

Вещество	Химическая формула	Молекулярная масса, μ , $\frac{\text{кг}}{\text{кмоль}}$	Газовая постоянная, $R, \frac{\text{Дж}}{\text{кг} \cdot \text{К}}$	Теплоемкость при $p \rightarrow 0$ и $t = 0^\circ\text{C}$				$k = \frac{c_p}{c_v}$
				Мольная, $\frac{\text{кДж}}{\text{кмоль} \cdot \text{К}}$		Массовая, $\frac{\text{кДж}}{\text{кг} \cdot \text{К}}$		
				μc_p	μc_v	c_p	c_v	
Водород	H ₂	2,016	4124,3	28,62	20,30	14,20	10,07	1,410
Гелий	He	4,003	2077,2	20,93	12,60	5,237	3,161	1,660
Метан	CH ₄	16,043	518,3	34,74	26,42	2,165	1,657	1,315
Аммиак	NH ₃	17,031	488,2	35,00	26,67	1,566	1,566	1,313
Водяной пар	H ₂ O	18,016	461,5					
Азот	N ₂	28,013	296,8	29,12	20,80	1,039	0,742	1,400
Оксид углерода	CO	28,011	296,8	29,12	20,81	1,040	0,743	1,400
Воздух	-	28,970	287,0	29,07	20,76	1,004	0,716	1,401
Кислород	O ₂	32,000	259,8	29,27	20,96	0,915	0,655	1,397
Диоксид углерода	CO ₂	44,011	189,9	35,86	27,545	0,815	0,626	1,302

Приложение 5

Средние изобарные мольные теплоемкости μc_p некоторых газов, кДж/(кмоль·К)

$t_1, ^\circ\text{C}$	Воздух	O ₂	N ₂	H ₂	Водяной пар H ₂ O	CO	CO ₂
0	29,073	29,274	29,115	28,617	33,499	29,123	35,860
100	29,153	29,538	29,144	29,935	33,741	29,178	38,112
200	29,299	29,931	29,228	29,073	34,188	29,303	40,059
300	29,521	30,400	29,383	29,123	34,575	29,517	41,755
400	29,789	30,878	29,601	29,186	35,090	29,789	43,250
500	30,095	31,334	29,864	29,249	35,630	30,099	44,573
600	30,405	31,761	30,149	29,316	36,195	30,426	45,758
700	30,723	32,150	30,451	29,408	36,789	30,752	46,813
800	31,028	32,502	30,748	29,517	37,392	31,070	47,763
900	31,321	32,825	31,037	29,647	38,008	31,376	48,617
1000	31,598	33,118	31,313	29,789	38,619	31,665	49,392
1200	32,109	33,633	31,828	30,107	39,825	32,192	50,740
1400	32,565	34,076	32,293	30,467	40,976	32,653	51,858
1600	32,967	34,474	32,699	30,832	42,056	33,051	52,800
1800	33,319	34,834	33,055	31,192	43,070	33,402	53,604
2000	33,641	35,169	33,373	31,548	43,995	33,708	54,290
2200	33,296	35,483	33,658	31,891	44,853	33,980	54,881
2400	34,185	35,785	33,909	32,222	45,645	34,223	55,391

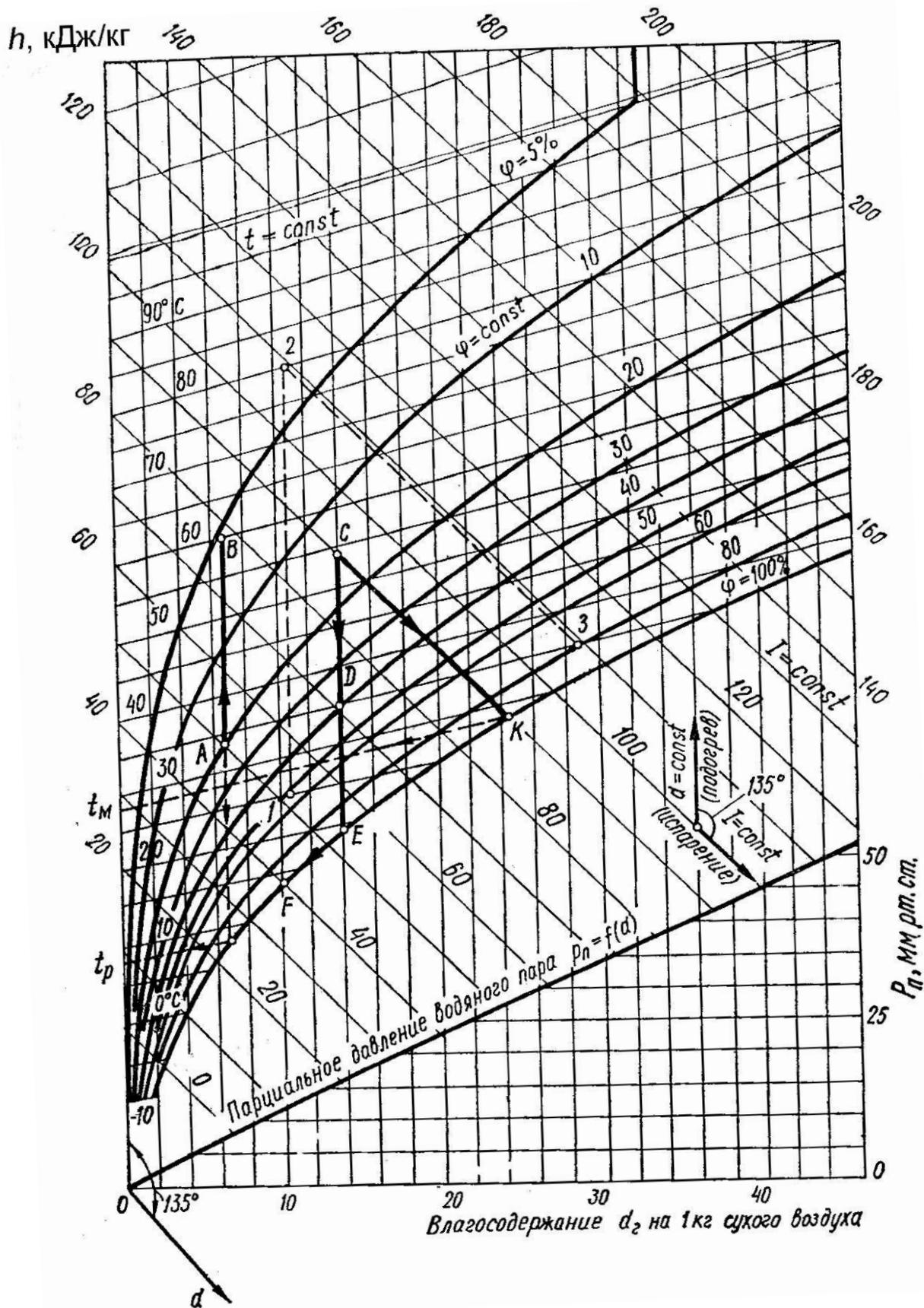
Приложение 6

Насыщенный пар фреона-12 (CCl_2F_2)

t , °C	P, МПа	v' , дм ³ /кг	v'' , м ³ /кг	h'	h''	r	s'	s''
				кДж/кг			кДж/(кг·К)	
-20	0,1510	0,6868	0,11070	400,5	564,0	163,5	4,1183	4,7645
-15	0,1826	0,6940	0,09268	405,0	566,4	161,4	4,1356	4,7613
-10	0,2191	0,7018	0,07813	409,5	568,9	159,4	4,1528	4,7586
-5	0,2609	0,7092	0,06635	414,0	571,2	157,2	4,1698	4,7561
0	0,3086	0,7173	0,05667	418,7	573,6	154,9	4,1868	4,7539
5	0,3624	0,7257	0,04863	423,4	575,9	152,4	4,2036	4,7519
10	0,4230	0,7342	0,04204	428,1	578,1	150,0	4,2204	4,7501
15	0,4911	0,7435	0,03648	433,0	580,3	147,3	4,2371	4,7484
20	0,5667	0,7524	0,03175	437,9	582,5	144,6	4,2537	4,7469
25	0,6508	0,7628	0,02773	442,8	584,5	141,7	4,2702	4,7455
30	0,7434	0,7734	0,02433	447,9	586,5	138,6	4,2868	4,7441
35	0,8460	0,7849	0,02136	452,9	988,3	135,4	4,3031	4,7425
40	0,9582	0,7668	0,01882	451,1	590,1	132,0	4,3194	4,7410

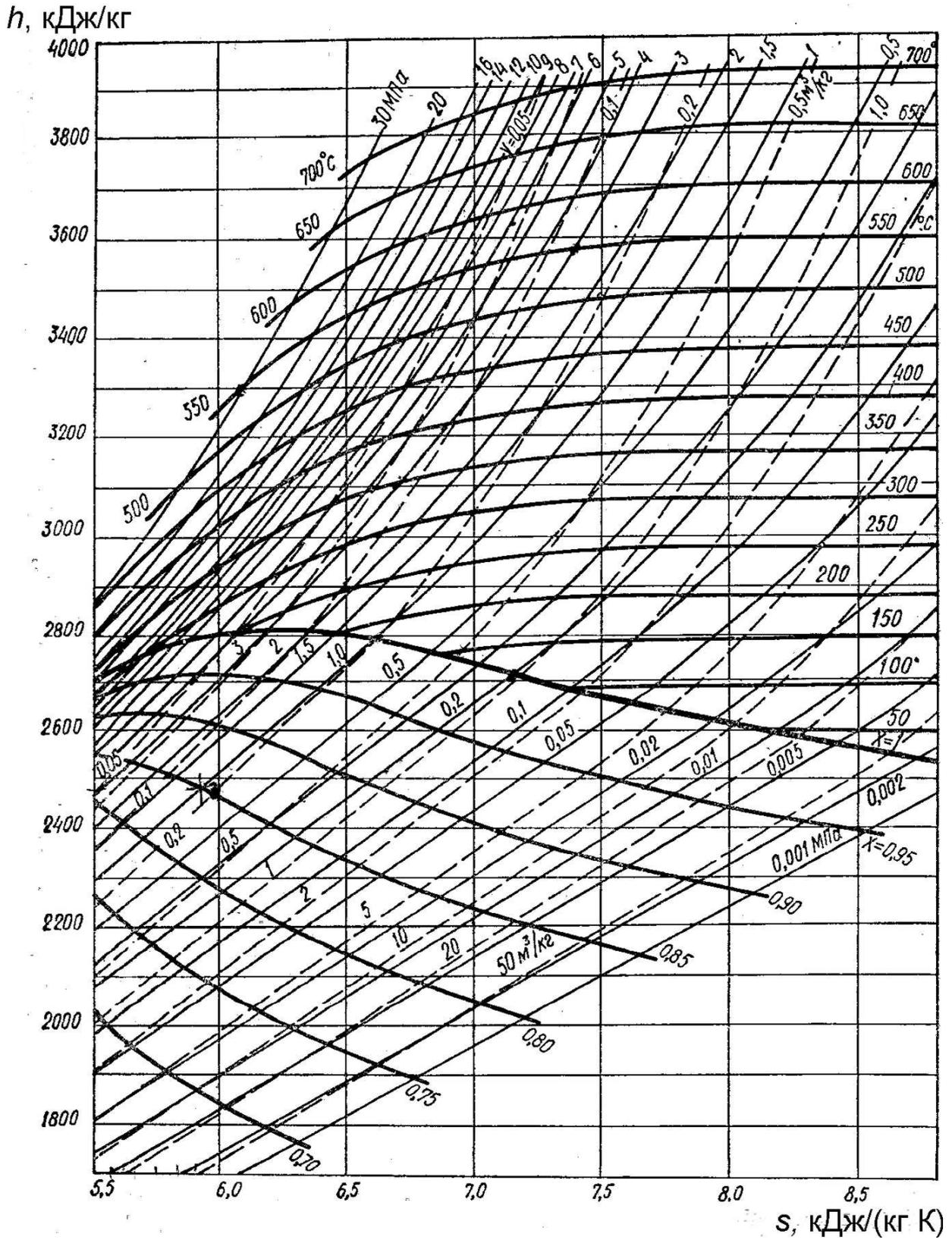
Приложение 7

h-d-Диаграмма влажного воздуха



Приложение 8

Рабочая часть $h-s$ —диаграммы водяного



Учебное издание

МЕТОДИЧЕСКИЕ РЕКОМЕНДАЦИИ

**для проведения практических (семинарских) занятий
по дисциплине «Термодинамика»**

для обучающихся по специальности 13.03.01 «Теплоэнергетика и
теплотехника», 21.05.04. «Горное дело» всех форм обучения

Составители: Лебедев Александр Николаевич, к.т.н., доцент
Волкова Елена Ивановна, к.х.н., доцент