

*Утверждено
Главным учебно-методическим управлением
высшего образования*

**Решения задач размещены
на сайте zadachi24.ru**

ТЕХНИЧЕСКАЯ ТЕРМОДИНАМИКА

МЕТОДИЧЕСКИЕ УКАЗАНИЯ
И КОНТРОЛЬНЫЕ ЗАДАНИЯ

для студентов-заочников
теплоэнергетических специальностей
высших учебных заведений

Издание второе



МОСКВА «ВЫСШАЯ ШКОЛА» 1990

ББК 31.31
Т38
УДК 621.1.016.7

А. А. Зайцев, В. П. Проценко, Ю. В. Юшков

Техническая термодинамика: Методические указания и
Т38 контрольные задания для студентов-заочников теплоэнергетических специальностей вузов / А. А. Зайцев, В. П. Проценко, Ю. В. Юшков. — 2-е изд. — М.: Высш. шк., 1990. — 72 с.

Т 2203020000 (4309000000) — 120 175 — 90
001(01) — 90

ББК 31.31
6П.2

Учебное издание

Зайцев Альберт Антонович
Проценко Валентин Прокофьевич
Юшков Юрий Владимирович

ТЕХНИЧЕСКАЯ ТЕРМОДИНАМИКА

Методические указания и контрольные задания
для студентов-заочников теплоэнергетических специальностей
высших учебных заведений

Заведующий редакцией А. В. Дубровский
Редакторы Л. Н. Шатунова, О. Г. Подобедова
Младший редактор Н. М. Шепина
Технический редактор И. В. Резникова
Корректор Р. К. Косинова

Н/К

Сдано в набор 19.12.88. Подп. в печать 25.12.89.

Бум. офс. № 2. Гарнитура литературная. Печать офсетная.

л. 4,66 усл. кр.-отт. 5,49 уч.-изд. л.

Зак. № 32 Цена 15 коп.

Издательство «Высшая школа». 101430. Москва ГСП-4, Неглинная ул., Д. 29/14.

Текстовые диапозитивы изготовлены на фотонаборном оборудовании издательства при помощи ЭВМ.

Отпечатано в Московской типографии № 4 Госкомпечати СССР.
129041, Москва. Б. Переяславская ул., 46.

© Коллектив авторов, 1990

ПРЕДИСЛОВИЕ

Термодинамика как наука сформировалась к середине XIX в. и ее положения использовались для исследования процессов, происходящих в тепловых двигателях. С тех пор область применения термодинамики значительно расширилась, ее основные закономерности используются при анализе самых различных физико-химических процессов: химических и фазовых превращений, электрических и магнитных явлений, излучения и др.

При этом особое место занимает взаимное превращение теплоты и механической работы, изучаемое в технической термодинамике.

Круг вопросов, который рассматривается в курсе технической термодинамики, постоянно расширяется. В него включаются новые вопросы, отражающие потребности современной техники. Сравнительно недавно, например, в этом курсе стали рассматриваться методы безмашинного преобразования теплоты в электрическую энергию, термодинамика диссоциированных и ионизированных газов. В связи с проблемой энергосбережения и необходимостью создания нетрадиционных систем теплоснабжения заметно увеличился объем раздела, посвященного трансформаторам теплоты (теплоснабственным и холодильным установкам). В курс технической термодинамики введена тема «Элементы химической термодинамики», так как в программе большинства энергетических вузов специальный курс химической термодинамики отсутствует.

Термодинамика имеет большое общеобразовательное значение для студентов всех специальностей. Особое значение имеет термодинамика для студентов-теплоэнергетиков, поскольку она является теоретической основой для изучения большинства специальных курсов.

3. Зубарев В. Н., Александров А. А., Охотин В. С. Практикум по технической термодинамике. М., 1986.
4. Ривкин С. Л., Александров А. А. Термодинамические свойства воды водяного пара. М., 1984.

Дополнительной

5. Мурзаков В. В. Основы технической термодинамики. М., 1973.
6. Новиков И. И. Термодинамика. М., 1984.
7. Техническая термодинамика / Под ред. В. И. Крутова. М., 1981.

ОБЩИЕ МЕТОДИЧЕСКИЕ УКАЗАНИЯ

При изучении курса «Техническая термодинамика» студенты-заочники самостоятельно работают над учебниками и учебными пособиями (см. список литературы). Учебник [1] рекомендуется в качестве основного. Для более полного изучения отдельных вопросов целесообразно обращаться к дополнительной литературе [5...7]. Следует также прослушать обзорные лекции по основным разделам курса.

Весь курс технической термодинамики разделен на 12 тем, которые следует изучать последовательно, переходя к следующей теме только после полного усвоения предыдущей. В конце каждой темы приводятся вопросы для самопроверки, по которым студент может контролировать степень усвоения материала. После изучения теоретического материала рекомендуется решить задачи и ответить на контрольные вопросы.

При изучении каждого раздела курса рекомендуется составлять конспект, использование которого особенно полезно при повторении материала. Если у студента-заочника возникают вопросы, на которые он затрудняется ответить самостоятельно, ему следует обратиться за устной или письменной консультацией на кафедру.

При самостоятельной работе над учебником студенту необходимо добиваться отчетливого представления о физическом смысле математических выводов, усвоения логики их получения.

Студенты-заочники должны выполнить три контрольные работы, каждая из которых состоит из пяти задач и двух вопросов, а также лабораторные работы (см. с. 59). К лабораторным работам допускаются лишь те студенты, которые имеют зачтенные контрольные работы.

«Задания для программированного контроля» (см. с. 60) могут быть использованы для проверки усвоения теоретической части курса при защите студентами лабораторных работ (или при подготовке к ним).

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

Основной

1. Кириллин В. А., Сычев В. В., Шейндлин А. Е. Техническая термодинамика. М., 1983.
2. Сборник задач по технической термодинамике / Андрианова Т. Н., Дзямпов Б. В., Зубарев В. Н., Ремизов С. А. М., 1981.

ПРОГРАММА И МЕТОДИЧЕСКИЕ УКАЗАНИЯ К ТЕМАМ КУРСА

ТЕМА I. ВВЕДЕНИЕ

Программа. История развития энергетики в СССР. Современное состояние теплоэнергетики.

Техническая термодинамика как теоретическая основа теплоэнергетики.

Методические указания. Для истории развития энергетики в СССР характерны четыре основных периода. Первый из них начался в 1920 г., когда VIII Всероссийским съездом Советов был принят план электрификации России (ГОЭЛРО). Этим планом предусматривалось опережающее развитие энергетики, сооружение 30 крупных районных станций, использование местных топлив, развитие централизованного энергоснабжения, рациональное размещение электростанций на территории страны. Задания плана ГОЭЛРО были выполнены уже в 1931 г.

За годы Великой Отечественной войны мощность действующих электростанций снизилась почти в 2 раза, около 60 крупных станций было разрушено. Поэтому основной задачей второго периода развития энергетики (1940—1950 гг.) было восстановление разрушенного энергетического хозяйства.

Для третьего периода развития энергетики (1951—1965 гг.) характерна концентрация энергоснабжения за счет создания объединенных энергосистем, строительство мощных тепловых электростанций, сооружение первых атомных станций.

Четвертый период (с 1966 г. по настоящее время) характеризуется переходом к качественно новому уровню развития топливно-энергетического комплекса. Внедряется блочная схема компоновки электростанций, причем мощность блоков непрерывно повышается. Пар сверхкритических параметров теперь используется не только на конденсационных электростанциях (КЭС), но и на теплоэлектростанциях (ТЭЦ). Формируется Единая энергосистема СССР.

До 1975 г. в СССР проводился курс на повышение расхода газа и мазута на нужды энергетики. Это позволило в короткий срок и без значительных капитальных затрат укрепить энергетическую базу народного хозяйства. Позже было решено, что дальнейший рост энергетического потенциала Европейской части СССР должен осуществляться за счет строительства гидравлических и атомных станций, а в восточных районах — за счет тепловых станций, работающих на дешевых углях.

Основные запасы органических топлив (угля, нефти, газа) расположены в восточной части страны, чаще всего в труднодоступных районах. Поэтому особое значение приобретает проблема экономии топливно-энергетических ресурсов.

Дальнейшая централизация теплоснабжения за счет строительства мощных ТЭЦ и котельных позволит получить значительную экономию топлива. Однако сооружение ТЭЦ экономически целесообразно лишь при наличии крупных централизованных потребителей теплоты. Другой путь снижения расхода топлива — применение теплонасосных установок, которые могут использовать как естественные источники теплоты, так и вторичные энергоресурсы.

Коэффициент использования теплоты топлива в большинстве отраслей промышленности обычно не превышает 30...35%. В связи с этим в настоящее время ставится вопрос о создании энерготехнологических агрегатов, в которых требования технологии и энергетики взаимно дополняли бы друг друга.

Разработать энерготехнологию, создать нетрадиционные и усовершенствовать существующие системы энергоснабжения, оценить их эффективность можно лишь с помощью термодинамического анализа. Поэтому для инженера-энергетика термодинамика является теоретической основой его практической деятельности.

При изучении термодинамики особое внимание следует уделить усвоению термодинамического метода исследования, который имеет следующие особенности. Во-первых, термодинамика строится по дедуктивному принципу, т.е. от общего к частному. Ее основой являются два закона (начала), установленных опытным путем. Первый из них представляет специфическую форму закона сохранения и превращения энергии и имеет поэтому всеобщий характер, второй же устанавливает качественную направленность процессов, осуществляемых в физических системах. С помощью математического аппарата термодинамики получают соотношения, позволяющие решать конкретные задачи (например, рассчитывать термодинамические процессы). Во-вторых, термодинамика имеет дело только с макроскопическими величинами. Микроструктура веществ здесь не рассматривается. Это, с одной стороны, обеспечивает достоверность общих выводов термодинамики, а с другой — приводит к некоторой ее ограниченности и требует привлечения дополнительных сведений из физики, химии и т.д. И наконец, описание процессов в термодинамике основывается на понятии о макроскопическом равновесии. Процессы здесь рассматриваются как непрерывная последовательность состояний равновесия (квазистатические процессы).

Литература: [1, гл. I, § 1-1].

Вопросы для самопроверки. 1. Перечислите основные периоды развития энергетики в СССР и дайте им краткую характеристику. 2. Каковы пути дальнейшего развития энергетики в СССР? 3. Каково значение теплоэнергетики в народном хозяйстве СССР? 4. Каковы основные резервы энергосбережения в народном хозяйстве СССР? 5. Каковы особенности термодинамического метода исследования?

ТЕМА 2. ПЕРВЫЙ ЗАКОН ТЕРМОДИНАМИКИ. ОСНОВНЫЕ ПОНЯТИЯ И ОПРЕДЕЛЕНИЯ

Программа. Термодинамическая система и окружающая среда. Изолированная и неизолированная термодинамические системы. Параметры состояния. Уравнение состояния. Термодинамическая поверхность. Термодинамический процесс. Равновесные и неравновесные процессы (взаимодействия). Теплота и работа как функции процесса. Внутренняя энергия и энтальпия как функции состояния термодинамической системы (рабочего тела). Закон сохранения и превращения энергии. Первый закон термодинамики. Различные аналитические выражения первого закона термодинамики. Краткая история открытия первого закона термодинамики и его место в философии диалектического материализма.

Методические указания. В данной теме рассматриваются понятия и определения, усвоение которых важно для понимания последующих разделов.

Объектом изучения в термодинамике является термодинамическая система, взаимодействие которой с окружающей средой состоит в обмене энергией. Если систему полностью изолировать от окружающей среды, то через некоторое время она придет в состояние макроскопического равновесия, которое будет сохраняться сколь угодно долго. Таким образом, единственной причиной нарушения равновесия может быть лишь взаимодействие системы с окружающей средой.

В технической термодинамике чаще всего рассматривается обмен энергией в форме теплоты q и механической работы l . Тогда в соответствии с правилом знаков, принятым в термодинамике, на основании закона сохранения энергии изменение внутренней энергии системы Δu может быть представлено в виде

$$\Delta u = q - l,$$

или в дифференциальной форме

$$du = dq - dl.$$

Необходимо подчеркнуть, что внутренняя энергия является функцией состояния, поэтому du — полный дифференциал. Теплота и работа — функции процесса, их элементарные количества dq и dl не являются полными дифференциалами.

Для дальнейшего использования необходимо выразить величины, входящие в уравнение первого закона термодинамики, через параметры состояния системы. В простой форме это можно сделать лишь для так называемых равновесных процессов.

Литература: [1, гл. 1, § 1-2, гл. 2, § 2-1, 2-2, 2-4, 2-5].

Вопросы для самопроверки. 1. Что такое рабочее тело? Почему в качестве рабочего тела используются вещества в газообразном (парообразном) состоянии? 2. Что такое параметр состояния? Являются ли параметры состояния независимыми величинами? 3. В чем состоит взаимодействие между системой и окружающей средой? 4. Какие процессы называются равновесными и какие неравновесными? 5. Что такое термодинамическая поверхность? 6. Как вычисляются теплота и работа? Функциями чего являются эти величины? 7. Дайте определения

энтальпии и внутренней энергии. Функцией чего являются эти величины? 8. Какие термодинамические диаграммы чаще всего применяют на практике и почему? 9. Чему равна площадь под кривой на p - v -диаграмме? 10. Сформулируйте первый закон термодинамики. 11. Запишите различные аналитические выражения первого закона термодинамики. 12. Какова история открытия первого закона термодинамики?

ТЕМА 3. ТЕРМОДИНАМИКА ИДЕАЛЬНОГО ГАЗА

Программа. Уравнение состояния идеального газа. Универсальная газовая постоянная. Удельная газовая постоянная. Нормальные физические условия. Молекулярно-кинетическая теория теплоемкости. Элементы квантовой теории теплоемкости. Истинная и средняя теплоемкости. Свойства теплоемкостей идеального газа. Связь между изохорной и изобарной теплоемкостями идеального газа (закон Майера). Эмпирические формулы для теплоемкостей идеального газа. Таблицы значений истинной и средней теплоемкостей идеального газа. Свойства внутренней энергии и энтальпии идеального газа. Таблицы термодинамических свойств идеальных газов. Изохорный, изобарный, изотермический и адиабатный процессы с идеальным газом. Политропные процессы и их анализ. Расчет количества теплоты и изменения температуры по таблицам значений энтальпии и внутренней энергии идеального газа. Смеси идеальных газов. Закон Дальтона. Теплоемкость газовых смесей.

Методические указания. При изучении этой темы прежде всего необходимо уяснить, в чем заключается отличие идеального газа от реального и как оно сказывается на зависимости его характеристики (теплоемкостей, энтальпии, внутренней энергии) от параметров состояния.

Из определения теплоемкости непосредственно следует, что она является функцией процесса. В приближенных расчетах процессов с идеальным газом теплоемкость конкретного процесса может считаться величиной постоянной. В этом случае ее значение может быть найдено на основе молекулярно-кинетической теории теплоемкости. Значения молярных изобарных и изохорных теплоемкостей в зависимости от атомности газа представлены в табл. 1 приложения. В более точных расчетах необходимо учитывать зависимость теплоемкости идеального газа от температуры, которая может быть получена либо на основе квантовой теории теплоемкостей, либо экспериментально. Эта зависимость может быть представлена в виде таблиц (см. табл. 2 приложения). Иногда она задается с помощью интерполяционных полиномов различной степени, простейшими из которых являются выражения вида: $c = a + bt$; $c_m = a_1 + b_1(t_1 + t_2)$, где c и c_m — истинная и средняя теплоемкости соответственно.

При изучении основных процессов следует обратить внимание на их изображение в координатах p , v и T , s . Взаимное расположение линий различных процессов определяется абсолютной величиной тангенса угла наклона каждой из них или, иными словами, величиной соответствующей производной. Рассмотрим, например, изотерму и адиабату идеального газа в координатах p , v . Тангенс угла

наклона изотермы $\operatorname{tg} \varphi_1 = \left(\frac{\partial p}{\partial v} \right)_T$, уравнение изотермы $pv = \text{const}$, откуда непосредственно следует, что $\left(\frac{\partial p}{\partial v} \right)_T = -p/v$. Соответственно для адиабаты: $\operatorname{tg} \varphi_2 = \left(\frac{\partial p}{\partial v} \right)_s$; $pv^k = \text{const}$; $\left(\frac{\partial p}{\partial v} \right)_s = -k \frac{p}{v}$. Так как величина $k = c_p/c_v > 1$ ($c_p > c_v$), то $|\operatorname{tg} \varphi_1| < |\operatorname{tg} \varphi_2|$ и адиабата в координатах p, v идет круче изотермы.

Литература: [1, гл. 1, § 1-4, 1-5, 1-6; гл. 7, § 7-1, 7-2, 7-3, 7-4, 7-5], [7, § 35...37].

Вопросы для самопроверки. 1. Какой газ называется идеальным? 2. Что такое нормальные физические условия? Какой объем занимает киломоль любого газа при нормальных физических условиях? 3. В чем сущность молекулярно-кинетической теории теплоемкости? Каковы основные недостатки этой теории? 4. В чем сущность квантовой теории теплоемкости? Какие преимущества имеет эта теория перед молекулярно-кинетической теорией теплоемкости? 5. Какова связь между истинной и средней теплоемкостями? Как вычислить теплоту процесса с помощью каждой из этих теплоемкостей? 6. Какими свойствами обладают теплоемкости идеального газа? 7. Как связаны изобарная и изохорная теплоемкости идеального газа? 8. В какой форме может быть задана зависимость теплоемкости идеального газа от температуры? 9. Какая из средних теплоемкостей идеального газа, вычисленная в интервале температур $0 \dots t_1, 0 \dots t_2, t_1 \dots t_2$ ($c_{|0}^{t_1}; c_{|0}^{t_2}; c_{|t_1}^{t_2}$), будет иметь наибольшее значение?

10. Какими свойствами обладают внутренняя энергия и энтальпия идеального газа? 11. Какое значение имеет показатель политропы в изобарном, изохорном и изотермическом процессах? 12. Какой процесс называется политропным? 13. Линия какого процесса — адиабатного или изотермического — идет круче в координатах p, v ? 14. В каких пределах изменяется теплоемкость политропного процесса? 15. Какими способами может быть задана смесь идеальных газов? 16. Что такое кажущаяся молекулярная масса смеси идеальных газов? 17. Сформулируйте закон Дальтона. В каком случае справедлив этот закон? 18. Что такое парциальное давление и парциальный (приведенный) объем? 19. Как рассчитывается теплоемкость смеси идеальных газов при различных способах задания этой смеси? 20. Получите выражение для определения удельной газовой постоянной смеси идеальных газов.

ТЕМА 4. ВТОРОЙ ЗАКОН ТЕРМОДИНАМИКИ

Программа. Прямые и обратные циклы. Термический к. п. д., коэффициент трансформации теплоты, холодильный коэффициент. Цикл Карно и его термический к. п. д. Теорема Карно. Регенеративный цикл. Влияние необратимости на процесс преобразования теплоты в работу.

Второй закон термодинамики. Аналитическое выражение второго закона термодинамики для обратимых и необратимых процессов. Необратимый адиабатный процесс. Эксергия как мера работоспособности. Эксергия теплоты. Потери эксергии в необратимых процессах. Эксергетический к. п. д. Статистическое

истолкование второго закона термодинамики. Энтропия и вероятность. Пределы применимости второго закона термодинамики.

Изменение энтропии идеального газа. Ts -диаграмма идеального газа и ее свойства; hs -диаграмма идеального газа. Таблицы энтропии идеальных газов. Термодинамическая шкала температур. Абсолютный нуль температуры.

Методические указания. При анализе термодинамических циклов тепловых двигателей следует обратить внимание на то, что эталонным является цикл Карно, построенный в том же интервале температур ($T_{\min} - T_{\max}$). Например, если известно, что термический к. п. д. некоторого прямого цикла равен 0,1, то само по себе это значение еще ни о чем не говорит. Оно должно быть сопоставлено со значением термического к. п. д. соответствующего цикла Карно, т. е. должен быть дополнительно задан интервал температур $T_{\min} - T_{\max}$. Скажем, для диапазона температур 300...2000 К термический к. п. д. цикла Карно $\eta_T^k = 0,85$ и степень совершенства рассматриваемого цикла мала, а для диапазона 300...335 К $\eta_T^k = 0,104$ — достаточно велика. Таким образом, для увеличения термического к. п. д. прямого цикла необходимо стремиться к тому, чтобы средние интегральные температуры подвода и отвода теплоты в цикле были как можно ближе к своим аналогам для соответствующего цикла Карно. Никакими новыми конструкциями тепловых двигателей или применением новых рабочих тел нельзя добиться того, чтобы термический к. п. д. цикла η_T стал больше η_T^k . Аналогичные соображения справедливы и для циклов холодильных машин и соответственно обратного цикла Карно.

Существует несколько формулировок второго закона термодинамики. Наиболее известна формулировка, предложенная Клаузиусом в виде принципа, согласно которому теплота не может сама собой переходить от более холодного тела к более нагретому. Этот принцип или какой-то другой, ему адекватный, может быть использован при рассмотрении ряда теоретических вопросов термодинамики (например, теоремы Карно). При этом необходимо иметь в виду, что второй закон термодинамики содержит два независимых друг от друга положения. Первое из них связано с вопросом существования энтропии, т. е. с утверждением, что в равновесных процессах элементарное количество теплоты может быть рассчитано по формуле $dq = Tds$, где s — некоторая функция состояния, называемая энтропией. Второе положение формулируется обычно как принцип возрастания энтропии в необратимых процессах (т. е. для них $ds > dq/T$). Таким образом, в аналитической форме второй закон термодинамики может быть представлен в виде соотношения

$$ds \geq dq/T,$$

где знак « $\geq$ » относится к обратимым процессам, а знак « $>$ » — к необратимым.

Первый закон термодинамики представляет собой всеобщий закон природы. В отличие от него второй закон нельзя считать универсальным. Экстраполяция закономерностей, установленных в определенных условиях существования материи, на все области Вселенной не является правомерной, так как в некоторых из них эти условия могут быть совершенно иными, чем на Земле. Кроме того, не-

обходимо дополнительно учитывать некоторые существенные физические факторы и прежде всего гравитацию. С учетом сил тяготения однородное изотермическое распределение не является наиболее вероятным состоянием Вселенной. В условиях нестатичной, расширяющейся Вселенной может происходить распад однородного вещества на отдельные объекты (например, галактики).

Литература: [1; гл. 3, § 3-1...3-10; гл. 9, § 9-1, 9-2, 9-4].

Вопросы для самопроверки. 1. Какой цикл называется прямым и какой обратным? 2. С помощью каких величин определяют степень совершенства прямых и обратных циклов? 3. Из каких процессов состоит цикл Карно? 4. Сформулируйте теорему Карно. 5. Какой цикл называется регенеративным? 6. Как влияет необратимость на процесс преобразования теплоты в работу? 7. В чем сущность второго закона термодинамики? 8. Приведите различные формулировки второго закона термодинамики. 9. Покажите, что для обратимых процессов интеграл Клаузиуса $\oint \frac{dq}{T} = 0$, а для необратимых $\oint \frac{dq}{T} < 0$. 10. Приведите аналитическое выражение второго закона термодинамики. 11. В чем сущность статистического истолкования второго закона термодинамики? 12. Как связаны энтропия и термодинамическая вероятность состояния? 13. В чем заключается различие между адиабатным и изоэнтальпным процессами? В каких случаях адиабатный процесс является одновременно и изоэнтальпным? 14. Что такое «тепловая смерть» Вселенной? 15. Что такое эксергия теплоты? 16. Приведите выражение для эксергетического к. п. д. 17. Как идут линии основных процессов в Ts -диаграмме идеального газа? 18. Приведите формулы для расчета изменения энтропии идеального газа в различных процессах. 19. Как строится абсолютная термодинамическая шкала температур? 20. Покажите, что термодинамическая и идеальная газовая шкалы идентичны.

ТЕМА 5. ХАРАКТЕРИСТИЧЕСКИЕ ФУНКЦИИ И ДИФФЕРЕНЦИАЛЬНЫЕ СООТНОШЕНИЯ ТЕРМОДИНАМИКИ

Программа. Характеристические функции. Внутренняя энергия, энтальпия, свободная энергия (изохорно-изотермический потенциал) и свободная энтальпия (изобарно-изотермический потенциал). Дифференциальные соотношения термодинамики. Термические коэффициенты и связь между ними. Зависимость изобарной и изохорной теплоемкостей от объема и давления. Связь между изобарной и изохорной теплоемкостями для веществ с любыми свойствами. Условия термодинамического равновесия.

Методические указания. Характеристические функции и дифференциальные соотношения составляют основу математического аппарата термодинамики, поэтому усвоение материала этого раздела является особенно важным. В том случае, когда система обменивается с окружающей средой теплотой и механической работой (термомеханическая система), имеются четыре характеристические функ-

ции: внутренняя энергия u , энтальпия h , свободная энергия (изохорно-изотермический потенциал) f и свободная энтальпия (изобарно-изотермический потенциал) ϕ . Характеристической называется такая функция состояния, частная производная которой по определенным образом выбранному параметру равна параметру с ним сопряженному. Сопряженными параметрами являются T и s ; p и v . Это значит, что одна и та же функция состояния, рассматриваемая как функция одной пары параметров, может быть характеристической, а при выборе другой — нет. Рассмотрим, например, внутреннюю энергию как функцию параметров: $u = u(s, v)$ и $u = u(T, v)$. Из выражения для полного дифференциала внутренней энергии $du = T ds - p dv$ непосредственно следует, что $\left(\frac{\partial u}{\partial s}\right)_v = T$; $\left(\frac{\partial u}{\partial v}\right)_s = -p$, т. е. в первом случае она является характеристической функцией. Во втором случае $\left(\frac{\partial u}{\partial T}\right)_v = C_v \neq s$ и поэтому внутренняя энергия не будет характеристической функцией.

Характеристические функции получают из внутренней энергии прибавлением к ее дифференциалу величин $d(pv)$, $-d(Ts)$ или обеих сразу (преобразование Лежандра). Например, энтальпия получается следующим образом: $dh = du + d(pv) = Tds + vdp$; $h \equiv u + pv$. Характеристические функции являются удобными расчетными энергетическими функциями для некоторых процессов. Например, теплоту изобарного процесса обычно определяют как разность энтальпий в конечной и начальной точках. В термодинамической теории равновесия используется принцип минимальности характеристических функций, согласно которому в состоянии равновесия соответствующая характеристическая функция принимает свое минимальное физически возможное значение. При этом выбор функции определяется условиями сопряжения системы с окружающей средой. И наконец, на основе характеристических функций можно получить дифференциальные соотношения термодинамики.

Полные дифференциалы характеристических функций и соответствующие дифференциальные соотношения могут быть представлены следующим образом:

$$\begin{aligned} du &= T ds - p dv; & \left(\frac{\partial T}{\partial v}\right)_s &= -\left(\frac{\partial p}{\partial s}\right)_v; \\ dh &= T ds + v dp; & \left(\frac{\partial T}{\partial p}\right)_s &= \left(\frac{\partial v}{\partial s}\right)_p; \\ df &= -s dT - p dv; & \left(\frac{\partial s}{\partial v}\right)_T &= \left(\frac{\partial p}{\partial T}\right)_v; \\ d\phi &= -s dT + v dp; & \left(\frac{\partial s}{\partial p}\right)_T &= -\left(\frac{\partial v}{\partial T}\right)_p. \end{aligned}$$

Дифференциальные соотношения являются следствием независимости величины второй смешанной производной функции двух переменных от того порядка, в каком она вычисляется. Этот формальный математический результат в термодинамике имеет большое практическое значение, так как позволяет заменять одну частную производную другой, вычисляемой для условий совершенно иного термодинамического процесса. Чаще всего приходится заменять производные, содержа-

щие энтропию, так как она не может быть непосредственно измерена и не входит в уравнение состояния.

Для изучения теоретических вопросов термодинамики или решения конкретных задач дифференциальные соотношения удобно применять по такой схеме.

1. Записать условие задачи в аналитической форме. Чаше всего здесь речь идет о значении какой-то частной производной.

2. Найти общее соотношение, из которого может быть вычислена эта производная.

3. Если полученное выражение содержит производную от энтропии, то необходимо с помощью соответствующего дифференциального соотношения заменить ее на другую производную.

4. С помощью заданного уравнения состояния вычислить значение искомой производной.

Например, выяснить вопрос о зависимости энтальпии идеального газа от давления можно следующим образом:

1. В общем случае энтальпия может рассматриваться как функция температуры и давления, т. е. $h = h(T, p)$. Если энтальпия идеального газа зависит от давления, то $\left(\frac{\partial h}{\partial p}\right)_T \neq 0$, если не зависит, то $\left(\frac{\partial h}{\partial p}\right)_T = 0$.

2. Запишем выражение для полного дифференциала энтальпии в виде $dh = T ds + v dp$. Тогда

$$\left(\frac{\partial h}{\partial p}\right)_T = T \left(\frac{\partial s}{\partial p}\right)_T + v.$$

3. В правой части полученного соотношения содержится производная $\left(\frac{\partial s}{\partial p}\right)_T$, которая не может быть вычислена с помощью уравнения состояния идеального газа. Заменяя эту производную с помощью дифференциального соотношения

$$\left(\frac{\partial s}{\partial p}\right)_T = -\left(\frac{\partial v}{\partial T}\right)_p,$$

имеем

$$\left(\frac{\partial h}{\partial p}\right)_T = -T \left(\frac{\partial v}{\partial T}\right)_p + v.$$

4. Вычисляя из уравнения состояния идеального газа $pv = RT$ производную $\left(\frac{\partial v}{\partial T}\right)_p = \frac{v}{T}$, окончательно получаем

$$\left(\frac{\partial h}{\partial p}\right)_T = -T \frac{v}{T} + v = 0,$$

т.е. энтальпия идеального газа от давления не зависит.

Литература: [1, гл. 4, § 4-1, 4-2, 4-3, 4-4; гл. 5, § 5-2]. [7, гл. 4, § 22...25].

Вопросы для самопроверки. 1. Какая функция называется характеристической? 2. Перечислите характеристические функции и запишите выражения для их

полных дифференциалов. 3. Получите дифференциальные соотношения термодинамики (соотношения Максвелла). 4. Дайте определение термических коэффициентов и вычислите их значения для идеального газа. 5. Получите уравнение связи между термическими коэффициентами. 6. Зависят ли изобарная и изохорная теплоемкости идеального газа от давления и объема? 7. Получите зависимости изобарной и изохорной теплоемкостей вещества от давления и объема в дифференциальной форме. 8. Зависит ли изохорная теплоемкость вещества, подчиняющегося уравнению Ван-дер-Ваальса, от объема? 9. Получите связь между изобарной и изохорной теплоемкостями для веществ с любыми свойствами. 10. На основе соотношения для веществ с любыми свойствами получите связь между изобарной и изохорной теплоемкостями для идеального газа (закон Майера). 11. Какой физический смысл имеет связь между изобарной и изохорной теплоемкостями для идеального газа? 12. Чем характеризуются соотношения устойчивого, неустойчивого и относительно устойчивого равновесия? 13. Каково условие равновесия для изолированной системы? 14. Сформулируйте принцип минимальности характеристических функций.

ТЕМА 6. РЕАЛЬНЫЕ ГАЗЫ И ПАРЫ. ВОДЯНОЙ ПАР

Программа. Термодинамические свойства реальных веществ. Фазовая pv -диаграмма. Уравнение Ван-дер-Ваальса. Критические параметры веществ. Принцип соответственных состояний. Термодинамическое подобие. pv — p -диаграмма. Коэффициент сжимаемости.

Условия равновесия при фазовом переходе. Правило фаз Гиббса. Парообразование и конденсация. Зависимость давления насыщенного пара от температуры. Теплота фазового перехода. Плавление. Сублимация. Уравнение Клапейрона — Клаузиуса. Фазовая pT -диаграмма. Тройная точка. Аномалии воды.

Степень сухости. Удельный объем, энтальпия и энтропия жидкости, влажного, сухого насыщенного и перегретого пара. Сверхкритическая область состояний пара. Таблицы термодинамических свойств воды и водяного пара в состоянии насыщения. Таблицы термодинамических свойств воды и перегретого водяного пара. Фазовая Ts -диаграмма для паров; hs -диаграмма для всех фаз веществ; фазовая hs -диаграмма для водяного пара. Расчет изохорного, изобарного, изотермического и адиабатного (изоэнтропного) процессов для реальных веществ по таблицам и диаграммам. Уравнения состояния реальных газов.

Теория ассоциации молекул и уравнение состояния водяного пара. Определение калорических функций газов по уравнению состояния. Зависимость изобарной теплоемкости газов от давления. Равновесие фаз при криволинейной поверхности раздела.

Методические указания. Изучая свойства реальных веществ, необходимо помнить, что соотношения, которые были получены для идеального газа, здесь не применимы. Ни в коем случае не следует использовать для расчетов реальных веществ уравнение Клапейрона. Уравнение Ван-дер-Ваальса описывает лишь качественные особенности реальных веществ. Более точные уравнения (например, уравнение Вукаловича—Новикова) довольно громоздки и, кроме того, имеют ограниченную область применения. В связи с этим расчет процессов для реальных

веществ, как правило, проводится либо по таблицам их термодинамических свойств, либо по диаграммам. Чаще всего в расчетах для водяного пара используется *hs*-диаграмма, поэтому на ее изучение следует обратить особое внимание.

Обычно сначала определяются удельные (на 1 кг вещества) значения величин, которые затем умножаются на массу. Если масса по условию задачи не задана, то она определяется делением полного объема вещества на его удельный объем в той же точке.

Как правило, здесь рассматриваются фазовые диаграммы состояния. Поэтому необходимо не только правильно изображать линии процессов в этих диаграммах, но и следить за их расположением относительно пограничных кривых.

Одной из наиболее важных характеристик реальных веществ является его сжимаемость, влияние которой особенно удобно рассматривать в *pv*—*p*-диаграмме. Необходимо также хорошо усвоить такие понятия, как температура и линия Бойля, фаза, фазовые переходы, условия равновесия и т. д.

Литература: [1; гл. 5, § 5-4...5-6, 5-9; гл. 6, 6-1...6-8; гл. 7, § 7-1...7-4].

Вопросы для самопроверки. 1. Изобразите изотермы реального вещества в фазовой *pv*-диаграмме. 2. В чем заключается принцип соответственных состояний? 3. Что такое критическое состояние вещества? 4. Какие свойства реальных веществ учитываются при выводе уравнения состояния Ван-дер-Ваальса? 5. В чем сущность теории ассоциации реальных газов? 6. Изобразите изотермы реального газа в *pv*—*p*-диаграмме. Что такое точка и линия Бойля? 7. Сформулируйте условия равновесия при фазовых переходах. 8. Существует ли принципиальное различие между парами и газами? 9. Какой пар называется влажным и сухим насыщенным, какой — перегретым? 10. Чем отличаются фазовые *pT*-диаграммы для нормальных и аномальных веществ? 11. Что такое фундаментальная (главная) тройная точка вещества? 12. Чем отличаются процессы испарения и кипения? 13. Что такое степень сухости? 14. Как рассчитываются удельный объем, энтропия и энтальпия влажного насыщенного пара? 15. Изобразите пограничные линии в фазовой *Ts*-диаграмме. 16. Покажите, что в области перегретого пара изобара на *Ts*-диаграмме идет круче изохоры. 17. Покажите, что критическая точка в фазовой *hs*-диаграмме не может располагаться на пограничной кривой в точке, соответствующей максимальному значению энтальпии. 18. Изобразите линии основных процессов в фазовых *pv*-, *Ts*- и *hs*-диаграммах. 19. Как строятся линии постоянной срепни сухости в фазовых *pv*-, *Ts*- и *hs*-диаграммах? 20. Получите уравнение Лапласа для дополнительного давления, обусловленного силами поверхностного натяжения.

ТЕМА 7. ВЛАЖНЫЙ ВОЗДУХ

Программа. Влагосодержание влажного воздуха. Абсолютная и относительная влажность. Точка росы. Газовая постоянная и плотность влажного воздуха. Энтальпия влажного воздуха. *hd*-диаграмма для влажного воздуха. Температура мокрого термометра. Измерение относительной влажности и точки росы с помощью психрометра и гигрометра.

Методические указания. При изучении этой темы необходимо ознакомиться с основными формулами для расчета параметров влажного пара, приобрести навыки в пользовании *hd*-диаграммой.

Литература: [1; гл. 14, § 14-1, 14-2].

Вопросы для самопроверки. 1. Что называется влажным воздухом? 2. При каких условиях влажный воздух можно считать с достаточной степенью точности идеальным газом? 3. Как определяется массовое и молярное влагосодержание влажного воздуха? 4. В каком случае влажный воздух называется насыщенным, а в каком — ненасыщенным? 5. Как определяется энтальпия влажного воздуха? 6. Что такое относительная влажность? 7. Постройте линии $\phi = \text{const}$; $t = \text{const}$; $h = \text{const}$ в *hd*-диаграмме влажного воздуха. 8. Почему в процессе испарения в идеальной сушилке энтальпию влажного воздуха можно считать постоянной? 9. Как определить состояние влажного воздуха с помощью психрометра? 10. Что такое точка росы?

ТЕМА 8. ТЕРМОДИНАМИКА ПОТОКА. ИСТЕЧЕНИЕ. ДРОССЕЛИРОВАНИЕ

Программа. Уравнение первого закона термодинамики для потока. Уравнение неразрывности потока. Уравнение механической энергии для потока (уравнение Бернулли). Располагаемая работа.

Адиабатные течения. Параметры полного адиабатного торможения потока. Сопло и диффузор. Скорость истечения газа (пара) из сужающегося сопла. Расход газа (пара) при истечении из сужающегося сопла. Максимальный расход и критическая скорость истечения. Критическое отношение давлений. Скорость звука. Зависимость скорости и расхода от отношения давлений. Условия перехода скорости потока через скорость звука. Комбинированное сопло Лаваля. Расчет скорости истечения водяного пара по изменению энтальпии. Истечение с учетом необратимости. Коэффициент скорости и расхода. Принцип обращения воздействия. Понятие о тепловом, механическом и расходном соплах. Течение с трением. Течение по длинным трубам. Смешение потоков газа.

Дросселирование. Уравнение процесса. Условное изображение процесса дросселирования на *hs*-диаграмме. Потеря эксергии при дросселировании. Изменение параметров при дросселировании. Дифференциальный адиабатный дроссель-эффект. Температура инверсии. Кривая инверсии. Использование процесса дросселирования в технике.

Методические указания. Расчетные соотношения для процессов течения строятся на основе уравнения первого закона термодинамики для потока, которое может быть представлено в двух формах: термической

$$dq = dh + \frac{dw^2}{2} + dl_{\text{tex}}$$

и механической (обобщенное уравнение Бернулли)

$$vdp + \frac{dw^2}{2} + dl_{\text{тр}} + dl_{\text{tex}} = 0.$$

Большинство процессов при этом могут рассматриваться как адиабатные ($dq = 0$), хотя для получения высоких скоростей стенки канала могут интенсивно охлаждаться. Однако чаще всего оказывается, что величина $q = Q/M \ll \Delta h$, так как при высоких скоростях течения массовые расходы газа M также будут весьма большими ($M = \omega f/v$).

Скорость истечения реальных газов и паров следует рассчитывать по формуле $\omega = 44,7 \sqrt{\Delta h}$, где Δh — перепад энтальпий. Эта формула, разумеется, справедлива и для идеального газа. Однако аналитические зависимости типа

$$\omega_2 = \sqrt{\frac{2k}{k-1} RT_1 \left[1 - \left(\frac{p_2}{p_1} \right)^{(k-1)/k} \right]},$$

полученные для идеального газа, не могут использоваться для расчета процессов с реальными газами. Кроме того, следует уяснить, в каких случаях происходит полное расширение пара или газа до давления окружающей среды, а в каких — неполное, как влияет форма канала на процесс течения, чем отличается расчет процессов течения с трением.

Процесс адиабатного дросселирования широко используется в технике, в частности в циклах холодильных машин. Поэтому необходимо хорошо представлять, в каких случаях в процессе дросселирования температура уменьшается, а в каких — остается неизменной. Проще всего это определять графически, анализируя выражение для дифференциального дроссель-эффекта с помощью Tv -диаграммы.

Литература: [1, гл. 8, § 8-1...8-7; гл. 7 § 7-6, 7-8].

Вопросы для самопроверки. 1. Получите выражение первого закона термодинамики для потока в термической и механической формах. 2. Что такое работа проталкивания? 3. Запишите уравнение неразрывности потока в дифференциальной форме. 4. Что такое располагаемая работа? 5. Для осуществления каких процессов используют сопла и диффузоры? 6. В каких случаях процесс течения можно считать адиабатным? 7. Почему в сужающемся сопле нельзя превзойти скорость звука? 8. Как связано изменение площади поперечного сечения с изменением скорости и числом Маха? 9. В каких случаях необходимо использовать комбинированное сопло Лаваля? 10. При каких условиях режим течения в сопле Лаваля становится нерасчетным? 11. Как учитывается влияние трения на скорость течения газа или пара? 12. В чем сущность принципа обращения воздействия? 13. Что такое тепловое, механическое и расходное сопла? 14. Какие предпосылки положены в основу идеализации процесса адиабатного дросселирования? 15. На что затрачивается работа расширения при дросселировании? 16. Получите выражение для дифференциального дроссель-эффекта. 17. Изобразите кривую инверсии. 18. Сопоставьте температурный эффект охлаждения при обратимом адиабатном расширении и адиабатном дросселировании. 19. Покажите с помощью h -диаграммы, как изменяется состояние водяного пара при дросселировании. 20. Как изменяются параметры идеального газа при дросселировании?

Программа. Компрессоры. Виды и назначение компрессоров. Работа, затрачиваемая на привод одноступенчатого поршневого компрессора. Изотермическое, адиабатное и политропное сжатие. Вредное пространство. Преимущества многоступенчатого сжатия. Оптимальное распределение перепада давления по ступеням многоступенчатого компрессора. Теоретическая индикаторная диаграмма компрессора и ее изображение в координатах p , v и T , s . Отводимая теплота. Необратимое адиабатное сжатие в компрессоре. Центробежные компрессоры.

Циклы двигателей внутреннего сгорания (ДВС). Индикаторная диаграмма и идеальный цикл ДВС. Цикл с изохорным подводом теплоты (цикл Отто). Цикл с изобарным подводом теплоты (цикл Дизеля). Цикл со смешанным подводом теплоты (цикл Тринклера). Сравнение термических к. п. д. циклов ДВС. Термодинамический анализ к. п. д. циклов по средним температурам подвода и отвода теплоты. Удельный расход топлива.

Циклы газотурбинных установок (ГТУ). Принципиальная схема и цикл ГТУ с изобарным подводом теплоты. Термический к. п. д. цикла. Методы повышения термического к. п. д. ГТУ. Отношение работы, затрачиваемой на привод компрессора, к работе турбины. Регенерация теплоты в цикле ГТУ. Многоступенчатое сжатие в компрессоре и ступенчатый подвод теплоты. Замкнутые схемы ГТУ. Рабочие тела замкнутых схем. Цикл ГТУ с изохорным подводом теплоты.

Циклы реактивных двигателей. Схема, цикл и термический к. п. д. прямоточного и турбореактивного двигателей. Схема и цикл ракетного двигателя.

Методические указания. При изучении поршневых компрессоров прежде всего уясните, в каких случаях необходимо применять многоступенчатое сжатие газа, насколько целесообразно охлаждение цилиндров компрессора и охлаждение газа в промежуточных холодильниках. Необходимо разбираться в том, как влияет наличие вредного пространства на производительность компрессора, чем ограничивается степень повышения давления газа в одной ступени компрессора. Нужно уметь проводить этот анализ как аналитически, так и с помощью pv - и Ts -диаграмм.

В технической термодинамике изучаются идеальные циклы тепловых двигателей, поэтому уясните основные отличия идеального цикла от индикаторной диаграммы этого двигателя. Идеальные циклы состоят из обратимых процессов, действительные процессы горения и выхлопа заменяются здесь термодинамическими процессами подвода и отвода теплоты, рабочее тело считается идеальным газом с постоянной теплоемкостью, масса которого и химический состав неизменны. Процессы расширения и сжатия в газовых двигателях в первом приближении принимают адиабатными, а процессы подвода теплоты — изохорными или изобарными. В газотурбинных установках и реактивных двигателях осуществляется полное расширение газов до давления окружающей среды, поэтому процесс отвода теплоты считается изобарным. В поршневых двигателях газы выбрасываются из цилиндра с давлением, в 2...4 раза большим атмосферного, поэтому здесь процесс отвода теплоты принимается изохорным.

Литература: [1, гл. 7, § 7-9; гл. 10, § 10-1...10-3].

Вопросы для самопроверки. 1. Как зависит работа, затрачиваемая на привод компрессора, от показателя политропы сжатия? 2. Изобразите в координатах p, v изотермический, политропный и адиабатный процессы сжатия в компрессоре. В каком из этих процессов работа, затрачиваемая на привод компрессора, будет наименьшей? 3. Что такое объемный к.п.д. компрессора? 4. Как влияет наличие вредного пространства на производительность компрессора? 5. В чем заключаются преимущества многоступенчатого сжатия газа в компрессоре? 6. Как вычисляется необходимое число ступеней сжатия в многоступенчатом компрессоре? 7. Что такое адиабатный и изотермический к.п.д. компрессора? 8. Изобразите индикаторную диаграмму одноступенчатого поршневого компрессора в координатах p, v и T, s . 9. Каковы особенности работы центробежных компрессоров? 10. Какие предпосылки положены в основу идеализации циклов поршневых двигателей внутреннего сгорания? 11. Почему в идеальных циклах поршневых двигателей внутреннего сгорания процесс отвода теплоты принимается изохорным? 12. Сравните графически термические к.п.д. идеальных циклов ДВС с подводом теплоты при постоянном объеме (цикл Отто) и постоянном давлении (цикл Дизеля), если степени сжатия и отведенные количества теплоты у них одинаковы. 13. Как влияет степень сжатия на термический к.п.д. идеального цикла ДВС с подводом теплоты при постоянном объеме (цикла Отто)? 14. Как влияет степень предварительного расширения на термический к.п.д. идеального цикла ДВС с изобарным подводом теплоты при постоянном давлении (цикла Дизеля)? 15. В чем заключаются преимущества двигателя, работающего по циклу со смешанным подводом теплоты (цикла Тринклера)? 16. Изобразите принципиальную схему ГТУ без регенерации и с регенерацией теплоты. 17. Какими методами можно повысить термический к.п.д. ГТУ? 18. Покажите графически в координатах T, s , что использование регенерации теплоты, ступенчатого сжатия и подвода теплоты приближает термический к.п.д. цикла ГТУ к термическому к.п.д. цикла Карно в том же интервале температур. 19. Почему в идеальных циклах ГТУ и реактивных двигателей отвод теплоты принимается изобарным? 20. Изобразите принципиальную схему и цикл прямоточного и турбореактивного двигателей в координатах p, v .

Т Е М А 10. ЦИКЛЫ ПАРОТУРБИННЫХ УСТАНОВОК. МЕТОДЫ НЕПОСРЕДСТВЕННОГО ПРЕОБРАЗОВАНИЯ ТЕПЛОТЫ В ЭЛЕКТРОЭНЕРГИЮ

Программа. Принципиальная схема паротурбинной установки (ПТУ). Идеальный цикл ПТУ (цикл Ренкина) в координатах p, v ; T, s и h, s . Работа турбины. Работа, затрачиваемая на привод питательного насоса. Термический к.п.д. цикла ПТУ. Расчет термического к.п.д. цикла по таблицам термодинамических свойств водяного пара и по h, s -диаграмме. Нецелесообразность практической реализации цикла Карно в области влажного насыщенного пара. Методы повышения термического к.п.д. ПТУ. Влияние начальных и конечных параметров пара на термический к.п.д. цикла. Применение пара высоких параметров. Действительный цикл с необратимым адиабатным расширением пара в турбине. Абсолютный эффективный к.п.д. ПТУ. Удельные расходы пара и топлива.

Промежуточный (вторичный) перегрев пара. Причины применения промежуточного перегрева пара. Принципиальная схема установки с промежуточным

перегревом. Цикл ПТУ с промежуточным перегревом пара. Циклы ПТУ со сверхкритическими параметрами водяного пара. Циклы ПТУ с двумя промежуточными перегревами пара.

Регенеративные циклы. Регенеративный подогрев питательной воды. Предельная регенерация. Схема установки с регенеративными отборами пара. Смешивающие и поверхностные подогреватели питательной воды. Изображение регенеративных циклов в координатах T, s . Термический к.п.д. регенеративного цикла. Влияние числа отборов на к.п.д. регенеративного цикла.

Комбинированные циклы. Преимущества и недостатки водяного пара как рабочего тела. Принципиальная схема бинарной ПТУ. Термический к.п.д. парогазовых циклов. Термодинамические циклы атомных электростанций. Термодинамические основы теплофикации.

Методы непосредственного преобразования теплоты в электроэнергию. Схема, цикл и к.п.д. магнетогидродинамической установки (МГДУ). Термоэлектрические и термоэмиссионные преобразователи. Термодинамические основы преобразования энергии в топливных элементах.

Методические указания. Изучая циклы паросиловых установок, выясните, почему в этих установках не применяется цикл Карно, хотя в области влажного пара осуществить его достаточно просто. Так как в качестве двигателей на тепловых электростанциях в основном используются ПТУ, особое внимание уделите рассмотрению способов повышения их экономичности. Совершенствование ПТУ возможно по пути увеличения мощности отдельных блоков, использования пара более высоких параметров (в частности, закритических), регенерации теплоты, применения комбинированных циклов. Кроме того, разрабатываются новые схемы преобразования энергии топлива в электрическую энергию. Поэтому изучите принцип действия и теоретические основы преобразования энергии в топливных элементах, термоэлектрических и термоэмиссионных преобразователях.

Исследование основного цикла — цикла Ренкина, а также более сложных циклов паросиловых установок осуществляется с помощью фазовых Ts - и h, s -диаграмм. Поэтому умение анализировать циклы с помощью этих диаграмм обязательно. В частности, нужно уметь изображать на Ts -диаграмме регенеративный цикл с конечным числом отборов пара и знать, как определяется термический к.п.д. этого цикла.

Как непосредственно следует из Ts -диаграммы, повышение начального давления или снижение конечного давления пара ведет к увеличению его влажности в конце адиабатного расширения. Для борьбы с этим явлением применяется промежуточный перегрев пара. Необходимо помнить, что в зависимости от параметров вторичного перегрева термический к.п.д. цикла паросиловой установки может как увеличиваться, так и уменьшаться.

Степень совершенства любого цикла определяется сопоставлением его термического к.п.д. с термическим к.п.д. цикла Карно в том же интервале температур. Особенно наглядно это сопоставление в Ts -диаграмме. При этом используется коэффициент заполнения цикла, т.е. отношение полезной площади (теплоты) цикла к полезной площади цикла Карно.

Термический к. п. д. цикла паросиловой установки (коэффициент заполнения) можно повысить, применяя бинарный цикл, в котором кроме воды используется дополнительное рабочее вещество (ртуть, цезий, дифенил и т. д.). Важно уяснить, какие свойства этих дополнительных рабочих тел дают им предпочтение по сравнению с водой (водяным паром).

Необходимо отчетливо представлять преимущества комбинированной выработки теплоты и электрической энергии на ТЭЦ.

Ограниченность и быстрое уменьшение запасов органических топлив, а также неравномерность расположения их источников на территории страны приводят к значительному росту выработки электрической энергии на атомных электростанциях (АЭС). Теоретические циклы АЭС подобны циклам соответствующих паро- и газотурбинных установок. Выбор того или иного термодинамического цикла зависит от вида и агрегатного состояния теплоносителя, который циркулирует через активную зону ядерного реактора. Верхняя температурная граница этого цикла определяется максимально допустимой температурой оболочек тепловыделяющих элементов или ядерного горючего. На АЭС с водяным охлаждением чаще всего используются низкотемпературные паровые циклы. Реакторы с газовым охлаждением (углекислый газ, гелий) позволяют повысить параметры водяного пара в цикле. Тепловая схема АЭС в этих случаях выполняется двухконтурной. В реакторах с кипящей водой или высокотемпературным газовым теплоносителем может применяться одноконтурная схема. В последнем случае возможно также использование обычного газотурбинного цикла.

На атомных станциях могут применяться те же способы повышения эффективности, что и на тепловых электрических станциях: регенерация теплоты, промежуточный перегрев пара, парогазовые и бинарные циклы и т. д. Однако в настоящее время строятся главным образом паротурбинные станции, а более сложные находятся пока в стадии исследования и предварительной отработки.

В последние годы появились атомные станции, предназначенные для централизованного теплоснабжения. К их числу относятся атомные котельные (атомные станции теплоснабжения — АСТ), атомные станции промышленного теплоснабжения (АСПТ), атомные теплоэлектростанции (АТЭЦ). Первые два типа установок предназначены только для теплоснабжения, а к третьему типу относятся станции, которые используют для одновременной выработки электрической энергии и теплоты (пар, горячая вода). Теплофикационные циклы АТЭЦ также ничем не отличаются от циклов ТЭЦ, сжигающих органические топлива.

Литература: [1; гл. 9, § 9-3, 9-4; гл. 11, § 11-1...11-7; гл. 12, § 12-1...12-3].

Вопросы для самопроверки. 1. Почему в паротурбинных установках не используется цикл Карно? 2. Почему основным рабочим телом паротурбинных установок служит водяной пар? 3. Изобразите цикл Ренкина в координатах p, v ; T, s и h, s . 4. Изобразите принципиальную схему паротурбинной установки. 5. При каких условиях можно пренебречь работой, затрачиваемой на привод питательного насоса паротурбинной установки? 6. Как влияют начальные параметры пара на термический к. п. д. цикла Ренкина? 7. Изобразите в координатах h, s условный процесс расширения пара в турбине с учетом потерь на трение. 8. Что такое внутренний относительный к. п. д. турбины? 9. Изобразите в координатах T, s

цикл паротурбинной установки с предельной регенерацией. 10. Покажите, что термический к. п. д. регенеративного цикла паротурбинной установки повышается с увеличением числа регенеративных отборов. 11. Составьте уравнение теплового баланса смешивающего регенеративного подогревателя паротурбинной установки с одним регенеративным отбором. 12. Изобразите в координатах T, s идеальный цикл паротурбинной установки с промежуточным перегревом пара. 13. Изобразите в координатах h, s процесс расширения пара в турбине паросиловой установки с двумя промежуточными перегревами пара. Как сказывается промежуточный перегрев пара на его конечной влажности? 14. В чем заключается сущность комбинированной выработки электроэнергии и теплоты на ТЭЦ? 15. Изобразите принципиальную схему парогазовой установки и ее идеальный цикл в координатах T, s . 16. В чем заключаются преимущества установок с МГД-генератором? 17. Каким образом повышается электропроводность плазмы в канале МГД-генератора? 18. Опишите принцип действия топливного элемента. 19. В чем заключается принципиальное преимущество установок прямого преобразования энергии по сравнению с современными теплосиловыми установками?

ТЕМА 11. ЦИКЛЫ ТРАНСФОРМАТОРОВ ТЕПЛОТЫ. ХОЛОДИЛЬНЫЕ И ТЕПЛОНАСОСНЫЕ УСТАНОВКИ

Программа. Холодильный коэффициент. Коэффициент трансформации теплоты. Обратный цикл Карно. Схема и цикл воздушной холодильной установки. Термодинамические свойства рабочих тел парокompрессионных трансформаторов теплоты. Схема, цикл и холодильный коэффициент парокompрессионной холодильной установки. Принцип действия теплового насоса. Термодинамическое сравнение эффективности теплового насоса и теплофикации. Схема и принцип работы абсорбционной холодильной установки. Методы сжижения газов.

Методические указания. При изучении циклов трансформаторов теплоты (холодильных и теплонасосных установок) следует иметь в виду, что здесь эталонным является обратный цикл Карно, осуществляемый в соответствующем интервале температур ($T_2...T_1$). Холодильный коэффициент цикла Карно $\epsilon_k = T_2/(T_1 - T_2)$ и коэффициент трансформации теплоты $\mu_k = T_1/(T_1 - T_2)$ имеют максимально возможные для этого интервала температур значения. Поэтому степень совершенства трансформатора теплоты будет тем выше, чем ближе его коэффициент трансформации μ к значению μ_k (или ϵ к ϵ_k). Для идеальных циклов парокompрессионных холодильных и теплонасосных установок коэффициенты трансформации почти совпадают со своими аналогами для обратного цикла Карно, а для воздушных — оказываются в несколько раз меньше.

Литература: [1, гл. 13, § 13-1, 13-2, 13-3, 13-5, 13-7, 13-8].

Вопросы для самопроверки. 1. Что такое холодильный коэффициент и коэффициент трансформации теплоты (отопительный коэффициент)? Как связаны эти

величины? 2. Изобразите принципиальную схему воздушной холодильной установки и ее идеальный цикл в координатах p , v и T , s . 3. Каково назначение дроссельного вентиля? 4. Изобразите принципиальную схему парокомпрессионной холодильной установки с дроссельным вентилем и ее идеальный цикл в координатах T , s . 5. Какие преимущества имеет парокомпрессионная холодильная установка по сравнению с воздушной? 6. В чем заключается принцип действия теплового насоса? 7. Изобразите принципиальную схему абсорбционной холодильной установки. Как повышается давление хладагента в этой установке? 8. Как влияет переохлаждение хладагента после конденсатора на значение коэффициента трансформации теплоты теплонасосной установки? 9. Какими свойствами должны обладать хладагенты? 10. Опишите основные методы сжижения газов.

основные следствия. 6. Каким законом определяется зависимость теплового эффекта химической реакции от температуры, при которой она протекает? 7. Что такое скорость химической реакции? 8. Сформулируйте закон действующих масс. 9. Что такое химическая обратимость реакции? 10. Дайте определения констант равновесия K_c и K_p . Какая связь существует между этими величинами? 11. Каким способом, зная константу равновесия, вычислить равновесный состав? 12. Что такое степень диссоциации и как она связана с константой равновесия? 13. Как зависит от давления степень диссоциации у реакций, протекающих с изменением и без изменения количества вещества? 14. Как определяется максимальная работа изохорно-изотермических и изобарно-изотермических реакций? 15. Выведите уравнение изотермы химической реакции. 16. Сформулируйте закон Вант-Гоффа. 17. Сформулируйте тепловой закон Нернста. 18. Покажите, что из закона Нернста следует принципиальная недостижимость абсолютного нуля температуры.

Т Е М А 12. ЭЛЕМЕНТЫ ХИМИЧЕСКОЙ ТЕРМОДИНАМИКИ

Программа. Первый закон термодинамики в термохимии. Тепловой эффект химической реакции. Закон Гесса и его следствия. Зависимость теплового эффекта химической реакции от температуры (закон Кирхгофа). Стандартный тепловой эффект. Второй закон термодинамики в термохимии. Закон действующих масс. Химическое равновесие. Константа равновесия. Степень диссоциации. Свободная энергия и изобарный потенциал (свободная энтальпия) как характеристические функции. Химический потенциал. Уравнение максимальной работы химической реакции (уравнение Гиббса — Гельмгольца). Химическое сродство. Константа равновесия и максимальная работа реакции. Зависимость константы равновесия от давления и температуры. Тепловая теорема Нернста. Стандартные значения термодинамических функций веществ.

Методические указания. При изучении этой темы обратите внимание на форму записи первого закона термодинамики в термохимии. Термодинамическая система имеет здесь дополнительную степень свободы, связанную с изменением химического состава вещества, поэтому химические реакции могут протекать при фиксированном значении двух параметров (например, $T = \text{const}$ и $v = \text{const}$). Следует также учитывать, что в понятие «обратимость химической реакции» вкладывается иной смысл, чем тот, который содержится в понятии «обратимость термодинамических процессов».

Литература: [1; гл. 15, § 15-1...15-4].

Вопросы для самопроверки. 1. Сколько параметров могут оставаться постоянными при протекании в системе химической реакции? 2. Запишите первый закон термодинамики для химически активной системы. 3. Что такое тепловой эффект химической реакции? 4. Как связаны тепловые эффекты изохорно-изотермических Q_v и изобарно-изотермических Q_p реакций? 5. Сформулируйте закон Гесса и его

КОНТРОЛЬНЫЕ ЗАДАНИЯ

Контрольные задачи и вопросы составлены по вариантной системе. Номер варианта определяется по таблице вариантов в зависимости от двух последних цифр учебного шифра студента. Например, при шифре 184212 студент выполняет 12-й вариант задания, для которого в таблице указаны номера задач: 5, 12, 27, 40, 46 и вопросов: 10, 16. Таким образом, в каждой из трех контрольных работ студент решает пять задач и отвечает на два вопроса. Работы, выполненные не по своему шифру, не рассматриваются.

Задания выполняются в таком порядке. Условие задачи или контрольный вопрос переписывается полностью. В решении задачи последовательно объясняется, какая величина определяется и по какой формуле. Написав формулу, необходимо дать экспликацию входящих в нее величин с объяснением, откуда они берутся (из условия задачи, из справочника или были определены раньше и т. д.). Необходимо указывать единицы величин, как заданных по условию задачи, так и найденных при ее решении. При решении задач и в ответах на вопросы следует использовать Международную систему единиц (СИ). Ответы на контрольные вопросы должны быть исчерпывающими.

Вычисленные значения величин округляются до трех значащих цифр. Значения показателей степени (например, показатели адиабаты k) должны содержать четыре значащих цифры.

Перед выполнением контрольного задания рекомендуется ознакомиться с решением типовых задач по учебнику или задачнику.

Контрольные работы выполняются в тетради. Для заметок рецензента оставляются поля и несколько чистых страниц. В конце работы приводится список использованной литературы, дата выполнения работы и подпись.

Таблица вариантов

Номер варианта	Номера задач	Номера вопросов	Номер варианта	Номера задач	Номера вопросов
1	2	3	4	5	6
01	5,11,26,39,49	9,19	51	10,11,30,38,43	8,13
02	4,20,24,31,50	1,20	52	9,20,28,33,42	3,12
03	3,19,22,40,48	10,18	53	8,19,26,31,41	1,11
04	2,18,30,32,47	12,17	54	6,17,24,40,49	10,19
05	1,17,28,37,46	7,16	55	5,16,21,34,48	4,18
06	10,16,25,33,44	3,14	56	4,15,29,39,47	9,17

1	2	3	4	5	6
07	9,15,23,38,45	8,15	57	7,18,22,36,45	6,15
08	8,14,21,36,50	6,20	58	2,16,28,40,41	10,11
09	7,13,27,31,49	1,19	59	1,15,26,35,43	5,13
10	6,12,29,35,48	5,18	60	10,14,23,31,45	1,15
11	6,13,30,36,47	6,17	61	9,13,21,36,47	6,17
12	5,12,27,40,46	10,16	62	8,12,29,34,49	4,19
13	4,11,25,35,45	5,15	63	7,11,25,39,50	8,20
14	3,20,23,31,44	1,14	64	6,20,27,33,48	3,18
15	2,19,21,33,43	3,13	65	5,19,24,37,46	7,16
16	1,18,29,38,42	8,12	66	4,18,22,32,44	2,14
17	10,17,26,34,41	4,11	67	4,19,23,33,42	3,12
18	9,16,24,39,50	9,20	68	3,18,21,39,46	9,16
19	8,15,22,37,48	7,18	69	2,17,29,31,43	1,13
20	7,14,28,32,46	2,16	70	1,16,27,36,45	6,15
21	7,15,29,33,44	3,14	71	10,15,24,32,44	2,14
22	6,14,21,37,42	7,12	72	9,14,22,37,46	7,16
23	5,13,28,31,43	1,13	73	8,13,30,35,47	5,17
24	4,12,26,36,45	6,15	74	7,12,26,40,48	10,18
25	3,11,24,32,47	2,17	75	6,11,28,34,41	4,11
26	2,20,22,34,49	4,19	76	5,20,25,38,42	8,12
27	1,19,30,39,50	9,20	77	1,20,26,39,43	9,13
28	10,18,27,35,41	5,11	78	3,14,27,35,50	5,20
29	9,17,26,40,43	10,13	79	2,13,25,37,49	7,19
30	8,16,23,38,45	8,15	80	1,12,23,32,48	2,18
31	8,17,24,39,47	9,17	81	1,13,24,33,47	3,17
32	7,16,30,34,49	4,19	82	10,12,21,39,46	9,16
33	6,15,22,38,50	8,20	83	9,11,29,34,45	4,15
34	5,14,29,32,48	2,18	84	7,19,23,37,44	7,14
35	4,13,27,37,46	7,16	85	6,18,25,31,43	1,13
36	3,12,25,33,44	3,14	86	5,17,22,35,42	5,12
37	2,11,23,35,43	5,13	87	4,16,30,40,41	10,11
38	1,20,21,40,42	10,12	88	3,15,28,36,43	6,13
39	10,19,28,36,41	6,11	89	2,14,26,38,45	8,15
40	9,18,26,31,44	1,14	90	2,15,27,39,47	9,17
41	9,19,27,32,46	2,16	91	1,14,25,34,49	4,19
42	8,18,25,40,48	10,18	92	10,13,22,40,50	10,20
43	7,17,21,35,47	5,17	93	9,12,30,35,48	5,18
44	6,16,23,39,45	9,15	94	8,11,28,33,46	3,16
45	5,15,30,33,43	3,13	95	7,20,24,38,44	8,14
46	4,14,28,38,42	8,12	96	6,19,26,32,42	2,12
47	3,13,26,34,41	4,11	97	5,18,23,36,43	6,13
48	2,12,24,36,46	6,16	98	4,17,21,31,44	1,14
49	1,11,22,40,47	10,17	99	3,16,29,37,46	7,16
50	10,20,29,37,48	7,18	100	3,17,30,38,48	8,18

КОНТРОЛЬНАЯ РАБОТА I

Контрольная работа I включает в себя задачи, относящиеся к темам 2...6 курса. В задачах 1...10 рассматривается обратимый адиабатный (изоэнтропный) процесс для смеси идеальных газов. Решая эти задачи, необходимо внимательно отнестись к способу задания смеси (в массовых или объемных долях) и расчету показателя изоэнтропии смеси, состоящей из двух- и трехатомных идеальных газов. Теплоемкость газов рекомендуется определять по табл. 1 приложения.

При использовании других источников они должны быть обязательно указаны. В задачах 11...20 рассматривается сочетание двух простейших термодинамических процессов идеального газа. Решая эти задачи, необходимо учесть зависимость теплоемкости газа от температуры. Среднюю в интервале температур от t_1 до t_2 теплоемкость следует рассчитывать по формуле

$$c \Big|_{t_1}^{t_2} = \left(c \Big|_0^{t_2} t_2 - c \Big|_0^{t_1} t_1 \right) / (t_2 - t_1),$$

определяя теплоемкости $c \Big|_0^t$ по табл. 2 приложения. При использовании других

методов расчета или других источников обязательна ссылка на источник.

Задачи 21...30 посвящены процессам, протекающим в области влажных паров различных веществ: аммиака (NH_3), диоксида углерода (CO_2), хладона R12 (CF_2CL_2) (в [1] это вещество называется фреоном 12). При решении этих задач необходимо пользоваться таблицами свойств веществ на линии насыщения, приведенными в приложении к данным методическим указаниям (табл. 3...5 приложения). Пользоваться диаграммами этих веществ разрешается лишь для контроля правильности решения задач.

В задачах 31...40 рассматриваются процессы изменения состояния водяного пара. Свойства водяного пара определять по h - s -диаграмме. Пользоваться таблицами и расчетами следует лишь в тех случаях, когда величина не может быть найдена по диаграмме, а также для контроля правильности расчетов.

Задачи 41...50 посвящены применению дифференциальных соотношений термодинамики. Наиболее существенным при изучении раздела является усвоение техники использования этих соотношений, поэтому здесь рассматриваются наиболее простые уравнения состояния. В некоторых задачах приходится иметь дело с зависимостями частного характера, которые получаются из соответствующих уравнений состояния при фиксированном значении одного из параметров. Это позволяет избежать громоздких вычислений и делает используемые для решения задач приемы более наглядными.

Решение задачи следует начинать с записи выражения для определения искомой величины в дифференциальной форме. Если это специально не оговорено в условии задачи, вывод этого выражения представлять не обязательно. Оно может быть найдено в соответствующем разделе учебника (ссылка на источник обязательна). Затем с помощью уравнения состояния вычисляются все частные производные, входящие в правую часть этого выражения. При этом производные, содержащие энтропию, предварительно должны быть заменены с помощью дифференциальных соотношений другими, которые ее не содержат.

Если требуется определить приращение какой-либо величины, то необходимо проинтегрировать выражение, включающее соответствующую производную. При этом необходимо помнить, что при фиксированном значении одного из параметров (например, $T = \text{const}$) она становится функцией только одной переменной. Проиллюстрируем изложенное на примере решения следующей задачи.

Определить приращение изохорной теплоемкости при изотермическом изменении ($T_1 = T_2 = 600 \text{ K}$) удельного объема от $v_1 = 1 \text{ м}^3/\text{кг}$ до $v_2 = 0,1 \text{ м}^3/\text{кг}$, если вещество подчиняется уравнению состояния

$$\left(p + \frac{a}{v^2 T} \right) (v - b) = R T,$$

где a и b — постоянные величины ($a = 1,1 \cdot 10^5 \text{ Н} \cdot \text{м}^4 \cdot \text{К}/\text{кг}^2$).

В общем случае изохорная теплоемкость вещества является функцией двух переменных, например $c_v = c_v(T, v)$. При фиксированном значении температуры ее приращение будет зависеть только от v , т. е.

$$T = \text{const} \rightarrow \Delta c_v = \Delta c_v(v) \text{ и } \Delta c_v = \int_{v_1}^{v_2} \left(\frac{\partial c_v}{\partial v} \right)_T dv.$$

Используя известное соотношение [1]

$$\left(\frac{\partial c_v}{\partial v} \right)_T = T \left(\frac{\partial^2 p}{\partial T^2} \right)_v$$

и учитывая, что из заданного по условию задачи уравнения состояния следует

$$\left(\frac{\partial p}{\partial T} \right)_v = \frac{R}{v - b} + \frac{a}{v^2 T^2},$$

$$\left(\frac{\partial^2 p}{\partial T^2} \right)_v = -\frac{2a}{v^2 T^3},$$

окончательно получаем

$$\left(\frac{\partial c_v}{\partial v} \right)_T = -\frac{2a}{v^2 T^2},$$

$$\Delta c_v = \int_{v_1}^{v_2} \left(\frac{\partial c_v}{\partial v} \right)_T dv = - \int_{v_1}^{v_2} \frac{2a}{v^2 T^2} dv = -\frac{2a}{T^2} \left(\frac{1}{v_2} - \frac{1}{v_1} \right) = -\frac{2 \cdot 1,1 \cdot 10^5}{600^2} \left(\frac{1}{0,1} - 1 \right) =$$

$$= 5,5 \text{ Дж}/(\text{кг} \cdot \text{К}).$$

Если учесть, что для многих веществ изохорная теплоемкость имеет значение порядка $10^3 \text{ Дж}/(\text{кг} \cdot \text{К})$, то можно считать зависимость теплоемкости от объема достаточно слабой.

ЗАДАЧИ

1. Смесь идеальных газов состоит из 8 кг CO_2 , 10 кг N_2 и 2 кг O_2 . В начальном состоянии объем смеси $V_1 = 16 \text{ м}^3$, а температура $t_1 = 57^\circ\text{C}$. В результате адиабатного сжатия давление смеси возрастает до значения $p_2 = 0,6 \text{ МПа}$. Определить давление смеси в начальном состоянии, объем и температуру смеси в конечном состоянии, работу сжатия и изменение внутренней энергии смеси. Считать, что теплоемкость газов не зависит от температуры и определяется по табл. 1 приложения. Определить парциальные давления газов, входящих в смесь, в конечном состоянии. Изобразить процесс в p - v и T - s -диаграммах.

2. Смесь идеальных газов задана объемными долями: $r_{\text{CO}_2} = 0,6$, $r_{\text{N}_2} = 0,3$, $r_{\text{O}_2} = 0,1$. Общая масса смеси $M = 20 \text{ кг}$. В начальном состоянии объем смеси $V_1 = 15 \text{ м}^3$ и температура $t_1 = 47^\circ\text{C}$. В результате адиабатного сжатия давление смеси увеличивается до $p_2 = 0,9 \text{ МПа}$. Определить давление смеси в начальном состоянии, температуру и объем смеси в конечном состоянии, работу сжатия и изменение внутренней энергии смеси. Считать, что теплоемкость газов не зависит от температуры и определяется по табл. 1 приложения. Определить парциальные давления газов, входящих в смесь, в конечном состоянии. Изобразить процесс в p - v и T - s -диаграммах.

3. Смесь идеальных газов состоит из 30 кг CO_2 , 24 кг N_2 и 6 кг O_2 . В начальном состоянии объем смеси $V_1 = 1,7 \text{ м}^3$ и температура $t_1 = 330^\circ\text{C}$. В результате

адиабатного расширения температура газа уменьшается до $t_2 = 10^\circ\text{C}$. Определить давление смеси в начальном состоянии, объем и давление в конечном состоянии, работу расширения и изменение внутренней энергии смеси. Считать, что теплоемкость газов не зависит от температуры и определяется по табл. 1 приложения. Определить парциальные давления газов, входящих в смесь, в конечном состоянии. Изобразить процесс в p - v - и T - s -диаграммах.

4. Смесь идеальных газов задана объемными долями: $r_{\text{CO}_2} = 0,3$; $z_{\text{N}_2} = 0,25$; $r_{\text{O}_2} = 0,45$. Общая масса смеси $M = 20$ кг. Параметры смеси в начальном состоянии: $p_1 = 0,1$ МПа, $t_1 = 40^\circ\text{C}$. В результате адиабатного сжатия объем смеси уменьшается до значения $V_2 = 7$ м³. Определить объем смеси в начальном состоянии, давление и температуру смеси в конечном состоянии, работу сжатия и изменение внутренней энергии смеси. Считать, что теплоемкость газов не зависит от температуры и определяется по табл. 1 приложения. Определить парциальные давления газов, входящих в смесь, в конечном состоянии. Изобразить процесс в p - v - и T - s -диаграммах.

5. Смесь идеальных газов состоит из 15 кг CO_2 , 12 кг N_2 и 3 кг O_2 . Объем смеси в начальном состоянии $V_1 = 20$ м³, а давление $p_1 = 0,1$ МПа. В результате адиабатного сжатия температура смеси возрастает до $t_2 = 327^\circ\text{C}$. Определить температуру смеси в начальном состоянии, объем и давление смеси в конечном состоянии, работу сжатия и изменение внутренней энергии смеси. Считать, что теплоемкость газов не зависит от температуры и определяется по табл. 1 приложения. Определить парциальные давления газов, входящих в смесь, в конечном состоянии. Изобразить процесс в p - v - и T - s -диаграммах.

6. Смесь идеальных газов состоит из 32 кг CO_2 , 40 кг N_2 и 8 кг O_2 . В начальном состоянии параметры смеси $p_1 = 0,6$ МПа и $t_1 = 370^\circ\text{C}$. В результате адиабатного расширения давление смеси уменьшается до $p_2 = 0,1$ МПа. Определить объем смеси в начальном и конечном состояниях, температуру и плотность смеси в конечном состоянии, работу расширения и изменение внутренней энергии смеси. Считать, что теплоемкость газов не зависит от температуры и определяется по табл. 1 приложения. Определить парциальные давления газов, входящих в смесь, в конечном состоянии. Изобразить процесс в p - v - и T - s -диаграммах.

7. Смесь идеальных газов задана объемными долями: $r_{\text{O}_2} = 0,45$, $r_{\text{CO}_2} = 0,30$ и $r_{\text{N}_2} = 0,25$. Общая масса смеси $M = 10$ кг. Объем смеси в начальном состоянии $V_1 = 3,5$ м³, а давление $p_1 = 0,3$ МПа. В результате адиабатного расширения объем смеси увеличился до значения $V_2 = 7$ м³. Определить температуру смеси в начальном состоянии, давление и температуру смеси в конечном состоянии, работу расширения и изменение внутренней энергии смеси. Принять, что теплоемкость газов не зависит от температуры и определяется по табл. 1 приложения. Определить парциальные давления газов, входящих в смесь, в конечном состоянии. Изобразить процесс в p - v - и T - s -диаграммах.

8. Смесь идеальных газов задана объемными долями: $r_{\text{N}_2} = 0,6$, $r_{\text{CO}_2} = 0,2$ и $r_{\text{O}_2} = 0,2$. Общая масса смеси $M = 10$ кг. Объем смеси в начальном состоянии $V_1 = 4$ м³, температура $t_1 = 387^\circ\text{C}$. В результате адиабатного расширения смеси ее давление уменьшается до значения $p_2 = 0,1$ МПа. Определить давление смеси в начальном состоянии, температуру и объем смеси в конечном состоянии, работу расширения и изменение внутренней энергии смеси. Считать, что теплоемкость газов не зависит от температуры и определяется по табл. 1 приложения.

Определить парциальные давления газов, входящих в смесь, в конечном состоянии. Изобразить процесс в p - v - и T - s -диаграммах.

9. Смесь идеальных газов состоит из 20 кг N_2 , 16 кг CO_2 и 4 кг O_2 . Параметры смеси в начальном состоянии $p_1 = 0,1$ МПа и $t_1 = 60^\circ\text{C}$. В результате адиабатного сжатия давление смеси возрастает до значения $p_2 = 0,5$ МПа. Определить объем смеси в начальном и конечном состояниях, температуру и плотность смеси в конечном состоянии, работу сжатия и изменение внутренней энергии смеси. Считать, что теплоемкость газов не зависит от температуры и определяется по табл. 1 приложения. Определить парциальные давления газов, входящих в смесь, в конечном состоянии. Изобразить процесс в p - v - и T - s -диаграммах.

10. Смесь идеальных газов задана объемными долями: $r_{\text{CO}_2} = 0,4$, $r_{\text{O}_2} = 0,35$ и $r_{\text{N}_2} = 0,25$. Общая масса смеси $M = 10$ кг. В начальном состоянии параметры смеси $p_1 = 0,9$ МПа и $t_1 = 330^\circ\text{C}$. В результате адиабатного расширения объем смеси увеличивается до значения $V_2 = 7,5$ м³. Определить объем смеси в начальном состоянии, температуру и давление смеси в конечном состоянии, работу расширения и изменение внутренней энергии смеси. Считать, что теплоемкость газов не зависит от температуры и определяется по табл. 1 приложения. Определить парциальные давления газов, входящих в смесь, в конечном состоянии. Изобразить процесс в p - v - и T - s -диаграммах.

11. Воздух из начального состояния 1 ($p_1 = 4$ МПа и $t_1 = 1600^\circ\text{C}$) изохорно охлаждается до температуры $t_2 = 200^\circ\text{C}$, а затем изотермически сжимается до состояния 3, в котором $p_3 = p_1$. Показать процесс 1-2-3 в p - v - и T - s -диаграммах. Определить значения t , p и v воздуха в точках 1, 2 и 3. Вычислить удельные значения работы, теплоты, изменения внутренней энергии и энтропии воздуха в процессах 1-2, 2-3 и 1-2-3 в целом. Изохорный процесс рассчитать с учетом зависимости теплоемкости воздуха от температуры (см. табл. 2 приложения).

12. Кислород из начального состояния 1 изотермически сжимается до состояния 2, а затем в изохорном процессе охлаждается до состояния 3, в котором $p_3 = p_1$. В точке 2 параметры кислорода $t_2 = 1200^\circ\text{C}$ и $p_2 = 6$ МПа, в точке 3 температура $t_3 = 300^\circ\text{C}$. Показать процесс 1-2-3 в p - v - и T - s -диаграммах. Определить значения t , p и v в точках 1, 2 и 3. Вычислить удельные значения работы, теплоты, изменения внутренней энергии и энтропии кислорода в процессах 1-2, 2-3 и 1-2-3 в целом. Изохорный процесс рассчитать с учетом зависимости теплоемкости кислорода от температуры (см. табл. 2 приложения).

13. Воздух из начального состояния 1 изотермически сжимается до состояния 2, а затем в изобарном процессе расширяется до состояния 3, в котором $v_3 = v_1$. Параметры воздуха в точке 2 $p_2 = 0,5$ МПа и $t_2 = 200^\circ\text{C}$. Температура воздуха в точке 3 $t_3 = 1400^\circ\text{C}$. Показать процесс 1-2-3 в p - v - и T - s -диаграммах. Определить значения t , p и v воздуха в точках 1, 2 и 3. Вычислить удельные значения работы, теплоты, изменения внутренней энергии и энтропии воздуха в процессах 1-2, 2-3 и 1-2-3 в целом. Изобарный процесс рассчитать с учетом зависимости теплоемкости воздуха от температуры (см. табл. 2 приложения).

14. Кислород из начального состояния 1 изотермически расширяется до состояния 2, в котором параметры кислорода $p_2 = 0,1$ МПа и $t_2 = 1000^\circ\text{C}$, а затем сжимается в изобарном процессе до объема $v_3 = v_1$. Температура кислорода в состоянии 3 $t_3 = 300^\circ\text{C}$. Показать процесс 1-2-3 в p - v - и T - s -диаграммах. Определить значения t , p и v кислорода в точках 1, 2 и 3. Вычислить удельные

значения работы, теплоты, изменения внутренней энергии и энтропии кислорода в процессах 1-2, 2-3 и 1-2-3 в целом. Изобарный процесс рассчитать с учетом зависимости теплоемкости кислорода от температуры (см. табл. 2 приложения).

15. Воздух из начального состояния 1 ($p_1 = 0,1$ МПа и $t_1 = 300$ °С) в изобарном процессе нагревается до температуры $t_2 = 1600$ °С, а затем изотермически сжимается до состояния 3, в котором $v_3 = v_1$. Показать процесс 1-2-3 в pv - и Ts -диаграммах. Определить значения t , p и v воздуха в точках 1, 2 и 3. Вычислить удельные значения работы, теплоты, изменения внутренней энергии и энтропии воздуха в процессах 1-2, 2-3 и 1-2-3 в целом. Изобарный процесс рассчитать с учетом зависимости теплоемкости воздуха от температуры (см. табл. 2 приложения).

16. Воздух из начального состояния 1 ($p_1 = 0,1$ МПа, $t_1 = 300$ °С) в изохорном процессе нагревается до $t_2 = 1400$ °С, а затем изотермически расширяется до состояния 3, в котором $p_3 = p_1$. Показать процесс 1-2-3 в pv - и Ts -диаграммах. Определить значения p , t и v в точках 1, 2 и 3. Вычислить удельные значения работы, теплоты, изменения внутренней энергии и энтропии воздуха в процессах 1-2, 2-3 и 1-2-3 в целом. Изохорный процесс рассчитать с учетом зависимости теплоемкости воздуха от температуры (см. табл. 2 приложения).

17. Азот от состояния 1 ($p_1 = 0,1$ МПа и $t_1 = 100$ °С) в изобарном процессе расширяется до состояния 2, в котором $t_2 = 900$ °С, а затем изотермически переводится в состояние 3, в котором $v_3 = v_1$. Показать процесс 1-2-3 в pv - и Ts -диаграммах. Определить значения p , t и v азота в точках 1, 2 и 3. Вычислить удельные работу, теплоту, изменение внутренней энергии и энтропии азота в процессах 1-2, 2-3 и 1-2-3 в целом. Изобарный процесс рассчитать с учетом зависимости теплоемкости азота от температуры (см. табл. 2 приложения).

18. Кислород из состояния 1 изотермически расширяется до состояния 2, в котором $p_2 = 0,1$ МПа и $t_2 = 200$ °С, а затем в изохорном процессе нагрева переходит в состояние 3, в котором $p_3 = p_1$ и $t_3 = 1400$ °С. Показать процесс 1-2-3 в pv - и Ts -диаграммах. Определить значения p , t и v кислорода в точках 1, 2 и 3. Вычислить удельные работу, теплоту, изменение внутренней энергии и энтропии кислорода в процессах 1-2, 2-3 и 1-2-3 в целом. Изохорный процесс рассчитать с учетом зависимости теплоемкости кислорода от температуры (см. табл. 2 приложения).

19. Азот из состояния 1 ($p_1 = 6$ МПа и $t_1 = 1000$ °С) в изохорном процессе охлаждается до температуры $t_2 = 100$ °С, а затем изотермически сжимается до состояния 3, в котором $p_3 = p_1$. Показать процессы 1-2 и 2-3 в pv - и Ts -диаграммах. Определить значения p , t и v в точках 1, 2 и 3. Вычислить удельные работу, теплоту, изменение внутренней энергии и энтропии азота в процессах 1-2, 2-3 и 1-2-3 в целом. Изохорный процесс рассчитать с учетом зависимости теплоемкости азота от температуры (см. табл. 2 приложения).

20. Воздух из состояния 1 ($t_1 = 1400$ °С и $p_1 = 0,5$ МПа) в изобарном процессе охлаждается до температуры $t_2 = 200$ °С, а затем изотермически расширяется до состояния 3, в котором $v_3 = v_1$. Показать процессы 1-2 и 2-3 в pv - и Ts -диаграммах. Определить значения p , t и v в точках 1, 2 и 3. Вычислить удельные работу, теплоту, изменение внутренней энергии и энтропии в процессах 1-2, 2-3 и 1-2-3 в целом. Изобарный процесс рассчитать с учетом зависимости теплоемкости воздуха от температуры (см. табл. 2 приложения).

21. Влажный пар аммиака из состояния 1 ($p_1 = 0,615$ МПа, $x_1 = 0,2$) в изохорном процессе переходит в состояние 2, где его температура $t_2 = 40$ °С. Опреде-

лить значения p , t , v , h , s , u и x в состояниях 1 и 2 и удельную теплоту q процесса. Показать процесс в pv -, Ts - и hs -диаграммах.

22. Влажный пар диоксида углерода из состояния 1 ($t_1 = -40$ °С, $x_1 = 0,1$) переходит в изохорном процессе в состояние 2, где $t_2 = 15$ °С. Определить значения p , t , v , h , s , u и x в состояниях 1 и 2 и удельную теплоту q процесса. Показать процесс в pv -, Ts - и hs -диаграммах.

23. Влажный пар хладагента R12 из состояния 1 ($t_1 = 20$ °С, $x_1 = 0,91$) адиабатно расширяется до состояния 2, в котором $t_2 = -15$ °С. Определить значения p , t , v , h , s , u и x в состояниях 1 и 2 и изменение удельной внутренней энергии в этом процессе. Показать процесс в pv -, Ts - и hs -диаграммах.

24. Сухой пар аммиака с начальной температурой $t_1 = 50$ °С в результате охлаждения при постоянном объеме переходит в двухфазное состояние 2, в котором $t_2 = 10$ °С. Затем в изобарном процессе аммиак нагревается до состояния 3, в котором степень сухости аммиака $x_3 = 0,8$. Определить значения p , v , h , s , u и x в состоянии 2 и удельную теплоту процесса 1-2-3. Показать процесс 1-2-3 в pv -, Ts - и hs -диаграммах.

25. Влажный пар диоксида углерода из состояния 1 ($t_1 = 15$ °С и $x_1 = 0,67$) адиабатно расширяется до состояния 2, в котором $t_2 = -40$ °С. Определить значения p , v , t , h , s , u и x в состояниях 1 и 2 и изменение внутренней энергии диоксида углерода в процессе 1-2. Показать процесс в pv -, Ts - и hs -диаграммах.

26. Влажный пар аммиака из состояния 1 ($t_1 = 40$ °С, $x_1 = 0,5$) адиабатно расширяется до состояния 2, в котором $t_2 = 10$ °С. Определить значения p , t , v , h , s , u и x в состояниях 1 и 2 и изменение удельной внутренней энергии аммиака в процессе 1-2. Показать процесс в pv -, Ts - и hs -диаграммах.

27. Влажный пар хладагента R12 из состояния 1 ($t_1 = -15$ °С, $x_1 = 0,3$) в изохорном процессе переходит в состояние 2, в котором $t_2 = 20$ °С. Определить значения p , v , h , s , u и x в состояниях 1 и 2 и удельную теплоту процесса. Показать процесс в pv -, Ts - и hs -диаграммах.

28. Сухой пар диоксида углерода с начальной температурой $t_1 = 15$ °С адиабатно расширяется до состояния 2, в котором $t_2 = -50$ °С. Затем в изобарном процессе отвода теплоты диоксид углерода переходит в состояние 3, в котором степень сухости $x_3 = 0,25$. Определить значения p , v , t , h , s и u в конечном состоянии, удельную теплоту и изменение удельной внутренней энергии в процессе 1-2-3. Показать процесс 1-2-3 в pv -, Ts - и hs -диаграммах.

29. Сухой пар хладагента R12 с начальной температурой $t_1 = 30$ °С адиабатно расширяется до состояния 2, в котором $t_2 = -20$ °С. Затем в изобарном процессе отвода теплоты хладагент переходит в состояние 3, в котором степень сухости $x_3 = 0,3$. Определить значения p , t , v , h , s и u в конечном состоянии, изменения удельной внутренней энергии и энтальпии в процессе 1-2-3. Показать процесс 1-2-3 в pv -, Ts - и hs -диаграммах.

30. Влажный пар хладагента R12 из состояния 1 ($t_1 = 15$ °С, $x_1 = 0,1$) в изохорном процессе подвода теплоты нагревается до температуры $t_2 = 30$ °С, а затем при постоянном давлении переходит в состояние 3, где его степень сухости $x_3 = 0,6$. Определить значения p , v , h , s и u в конечном состоянии, удельное количество теплоты и работу процесса 2-3. Показать процесс 1-2-3 в pv -, Ts - и hs -диаграммах.

31. Начальное состояние водяного пара задано параметрами $p_1 = 0,3$ МПа и $t_1 = 250$ °С. Из этого состояния пар охлаждается при постоянном давлении до состояния сухого пара ($x_2 = 1$), а затем адиабатно расширяется до удельного

объема $v_3 = 5 \text{ м}^3/\text{кг}$. Определить параметры пара в точках 1, 2 и 3, удельные количество теплоты и работу расширения процесса 1-2-3. Показать процессы в Ts - и hs -диаграммах.

32. Начальное состояние водяного пара задано параметрами $p_1 = 0,1 \text{ МПа}$ и $x_1 = 0,9$. Из этого состояния пар адиабатно сжимается до состояния сухого пара ($x_2 = 1$) и далее при постоянном давлении нагревается до температуры $t_3 = 350^\circ\text{C}$. Определить параметры пара в точках 1, 2 и 3, удельные количество теплоты и работу расширения процесса 1-2-3. Показать процесс 1-2-3 в Ts - и hs -диаграммах.

33. Водяной пар в начальном состоянии имеет параметры $p_1 = 1,5 \text{ МПа}$ и $x_1 = 0,76$. Из этого состояния при постоянном объеме пар нагревается до температуры $t_2 = 550^\circ\text{C}$ и далее при неизменной температуре расширяется до удельного объема $v_2 = 2,0 \text{ м}^3/\text{кг}$. Определить параметры пара в состояниях 1, 2 и 3, удельные количество теплоты и работу расширения процесса 1-2-3. Процесс 1-2-3 показать в Ts - и hs -диаграммах.

34. Начальное состояние водяного пара задано параметрами $t_1 = 600^\circ\text{C}$ и $p_1 = 3 \text{ МПа}$. Из этого состояния пар адиабатно расширяется до состояния сухого пара ($x_2 = 1$), а затем при постоянном давлении охлаждается до степени сухости $x_3 = 0,8$. Определить параметры пара в состояниях 1, 2 и 3, удельные количество теплоты и работу расширения процесса 1-2-3. Показать процесс в Ts - и hs -диаграммах.

35. Водяной пар из начального состояния $p_1 = 2,0 \text{ МПа}$ и $t_1 = 600^\circ\text{C}$ при постоянном объеме охлаждается до температуры $t_2 = 300^\circ\text{C}$, а затем адиабатно переводится в состояние 3, где его степень сухости $x_3 = 0,9$. Определить параметры пара в состояниях 1, 2 и 3, удельные количество теплоты и работу расширения пара в процессе 1-2-3. Процесс показать в Ts - и hs -диаграммах.

36. Водяной пар в начальном состоянии имеет параметры $p_1 = 0,01 \text{ МПа}$ и $x_1 = 0,9$. Из этого состояния пар адиабатно сжимается до давления $p_2 = 2 \text{ МПа}$ и затем при постоянном давлении охлаждается до температуры $t_3 = 250^\circ\text{C}$. Определить параметры пара в состояниях 1, 2 и 3, удельные количество теплоты и работу расширения процесса 1-2-3. Показать процесс в Ts - и hs -диаграммах.

37. Начальное состояние водяного пара задано параметрами $t_1 = 550^\circ\text{C}$ и $p_1 = 2,0 \text{ МПа}$. Из этого состояния при постоянном давлении пар переходит в двухфазное состояние с $x_2 = 0,8$. Определить параметры пара в начальном и конечном состояниях, удельные количество теплоты и работу сжатия пара в процессе. Показать процесс в Ts - и hs -диаграммах.

38. Сухой насыщенный водяной пар с начальной температурой $t_1 = 160^\circ\text{C}$ адиабатно сжимается так, что объем пара уменьшается в 10 раз. Определить параметры пара в начальном и конечном состояниях, удельную работу сжатия и изменение энтальпии пара в процессе. Показать процесс в pv -, Ts - и hs -диаграммах.

39. Водяной пар с начальными параметрами $p_1 = 0,005 \text{ МПа}$ и $t_1 = 150^\circ\text{C}$ сжимается при постоянной температуре и переходит в двухфазное состояние со степенью сухости $x_2 = 0,9$. Определить начальные и конечные параметры пара, удельные количество теплоты и работу сжатия процесса. Показать процесс в pv -, Ts - и hs -диаграммах.

40. Начальное состояние водяного пара задано параметрами $t_1 = 250^\circ\text{C}$ и $p_1 = 0,26 \text{ МПа}$. Из этого состояния пар охлаждается при постоянном давлении

до состояния сухого пара ($x_2 = 1$), а затем адиабатно расширяется до удельного объема $v_3 = 10 \text{ м}^3/\text{кг}$. Определить параметры пара в состояниях 1, 2 и 3, удельные количество теплоты и работу расширения процесса 1-2-3. Показать процессы в Ts - и hs -диаграммах.

41. Определить приращение изохорной теплоемкости вещества при изотермическом изменении его удельного объема от $v_1 = 1 \text{ м}^3/\text{кг}$ до $v_2 = 6 \text{ м}^3/\text{кг}$ ($T_1 = T_2 = 800 \text{ К}$), если свойства этого вещества при $v = \text{const}$ задаются уравнением $p = a + bT^2$, где a и b — постоянные величины ($b = 3 \cdot 10^{-5} \text{ Па/К}^2$).

42. Вещество подчиняется уравнению состояния Ван-дер-Ваальса $(p + a/v^2) \times (v - b) = RT$, где a и b — постоянные величины ($a = 191 \text{ Н} \cdot \text{м}^4/\text{кг}^2$). Найти изменение внутренней энергии при изотермическом изменении удельного объема от $v_1 = 0,1 \text{ м}^3/\text{кг}$ до $v_2 = 0,4 \text{ м}^3/\text{кг}$.

43. Определить приращение энтальпии вещества при изотермическом изменении давления от $p_1 = 0,1 \text{ МПа}$ до $p_2 = 10 \text{ МПа}$, если вещество подчиняется уравнению состояния $p(v - b) = RT$, где $b = 1,7 \cdot 10^{-3} \text{ м}^3/\text{кг}$.

44. Вещество подчиняется уравнению состояния $p(v - b) = RT$, где b — постоянная величина. Найти значение энтропии этого вещества при $p_1 = 20 \text{ МПа}$ и $t_1 = 0^\circ\text{C}$, приняв за начало отсчета значение энтропии в точке $p_0 = 0,1 \text{ МПа}$ и $t_0 = 0^\circ\text{C}$ (молекулярная масса $\mu = 44 \text{ кг/кмоль}$).

45. Определить приращение изобарной теплоемкости вещества при изотермическом изменении давления от $p_1 = 0,1 \text{ МПа}$ до $p_2 = 1 \text{ МПа}$ ($T_1 = T_2 = 600 \text{ К}$), если свойства этого вещества при $p = \text{const}$ задаются уравнением $v = a + b \ln T$, где a и b — постоянные величины ($b = 0,05 \text{ м}^3/\text{кг}$).

46. Используя соотношение для дифференциального дроссель-эффекта в форме $\left(\frac{\partial T}{\partial p}\right)_h = \frac{T}{c_p} \left\{ \left(\frac{\partial v}{\partial T}\right)_p - \frac{v}{T} \right\}$, определить изменение температуры при дросселировании вещества, подчиняющегося уравнению состояния $p(v - b) = RT$, если $b = 0,002 \text{ м}^3/\text{кг}$, $c_p = 1 \text{ кДж/(кг} \cdot \text{К)}$, а давление уменьшается от $p_1 = 2 \text{ МПа}$ до $p_2 = 1 \text{ МПа}$.

47. Вещество подчиняется уравнению состояния $p(v - b) = RT$, ($b = 1,7 \times 10^{-3} \text{ м}^3/\text{кг}$). Найти изменение энтропии в изотермическом процессе, если удельный объем уменьшается от $v_1 = 0,04 \text{ м}^3/\text{кг}$ до $v_2 = 0,01 \text{ м}^3/\text{кг}$, а молекулярная масса $\mu = 44 \text{ кг/кмоль}$.

48. Вещество подчиняется уравнению состояния $p(v - b) = RT$, где $b = 1,7 \cdot 10^{-3} \text{ м}^3/\text{кг}$. Найти количество теплоты, которое подводится к 1 кг этого вещества при изотермическом расширении ($T = 500 \text{ К}$) от $v_1 = 0,05 \text{ м}^3/\text{кг}$ до $v_2 = 0,15 \text{ м}^3/\text{кг}$ (молекулярная масса $\mu = 44 \text{ кг/кмоль}$).

49. Определить изобарную теплоемкость вещества, подчиняющегося уравнению состояния $p(v - b) = RT$ (b — постоянная величина), если изохорная теплоемкость при той же температуре $c_v = 0,661 \text{ кДж/(кг} \cdot \text{К)}$, а молекулярная масса $\mu = 44 \text{ кг/кмоль}$.

50. Используя выражение для полного дифференциала давления в форме $dp = \left(\frac{\partial p}{\partial v}\right)_T dv + \left(\frac{\partial p}{\partial T}\right)_v dT$, получить уравнение, связывающее коэффициенты термической расширяемости $\alpha = \frac{1}{v} \left(\frac{\partial v}{\partial T}\right)_p$, термической упругости $\beta = \frac{1}{p} \left(\frac{\partial p}{\partial T}\right)_v$.

и изотермической сжимаемости $\mu = -\frac{1}{v} \left(\frac{\partial v}{\partial p} \right)_T$. Вычислить величину μ при давлении $p = 0,05$ МПа, если при этих условиях $\alpha = \beta$.

ВОПРОСЫ

1. При изучении свойств вещества в двух его состояниях были измерены параметры $p_1 = 0,1$ МПа, $t_1 = 27^\circ\text{C}$, $v_1 = 0,78$ м³/кг и $p_2 = 0,05$ МПа, $t_2 = 60^\circ\text{C}$, $v_2 = 2$ м³/кг. Какие выводы можно сделать по результатам измерений?
2. Может ли газовая постоянная смеси идеальных газов CO и CO_2 быть равна $R_{\text{см}} = 305$ Дж/(кг · К)? Дайте обоснование ответу.
3. Можно ли найти такой состав идеальных газов N_2 , O_2 и CO , при котором газовая постоянная смеси была бы равна $R_{\text{см}} = 250$ Дж/(кг · К)? Дайте обоснование ответу.
4. Найдите энтальпию вещества массой 10 кг, если его внутренняя энергия равна 3400 кДж при давлении $p = 0,2$ МПа и удельном объеме $v = 0,3$ м³/кг.
5. Для некоторого газа зависимость истинной теплоемкости [кДж/(кг · К)] от температуры определяется формулой $c_p = 0,873 + 0,00025t$. Найдите значение средней изобарной теплоемкости этого вещества в интервале температур от $t_1 = 300^\circ\text{C}$ до $t_2 = 500^\circ\text{C}$.
6. Чему равна мольная теплоемкость μc двухатомного идеального газа в политропном процессе, в котором на каждые 4 кДж подведенного количества теплоты газ совершает работу, равную 2 кДж?
7. При расчете политропного процесса расширения идеального двухатомного газа с показателем политропы $n = 1,2$ получено, что к газу подведено количество теплоты $Q = 500$ кДж и температура газа увеличилась на 30°C . Можно ли признать правильными результаты расчета? Дайте обоснование ответу.
8. В процессе расширения идеальный газ совершает работу $L = 700$ кДж, а его внутренняя энергия уменьшается на 400 кДж. Как изменяется энтропия газа в этом процессе? Изобразите процесс в координатах p , v и T , s .
9. В политропном процессе сжатия над идеальным газом совершается работа, а его внутренняя энергия уменьшается. Как изменяется энтропия газа в этом процессе? Изобразите процесс в координатах p , v и T , s .
10. В политропном процессе идеальный газ совершает работу $L = 200$ кДж/кг, а его внутренняя энергия уменьшается на 300 кДж/кг. Как изменяется энтропия газа в этом процессе? Можно ли, не зная, какой это газ, вычислить показатель политропы?
11. Покажите, что в координатах T , s изохоры идут круче, чем изобары.
12. В чем состоит сходство и в чем различие понятий «теплота» и «работа»?
13. Покажите, что изохорная и изобарная теплоемкости вещества с любыми свойствами не могут быть отрицательными величинами.
14. Почему нельзя определить состояние вещества в двухфазной области, задав значения давления p и температуры T ? Величину какого типа следует здесь использовать вместо одного из этих параметров? Приведите конкретный пример.
15. Необходимо экспериментально определить зависимость приращения энтропии от объема в изотермическом процессе. Каким образом это можно осуществить, если непосредственное измерение энтропии (или ее приращения) невозможно?

16. Приведите уравнение связи между изобарной и изохорной теплоемкостями для вещества с любыми свойствами. Могут ли эти теплоемкости в каком-то состоянии иметь равные значения?

17. Покажите, что нижняя пограничная кривая идет в координатах T , s слева направо вверх. Как объяснить, почему эта кривая имеет точку перегиба?

18. Покажите, что в изобарном процессе теплота равна изменению энтальпии, а в изохорном — меньше изменения энтальпии.

19. Используя уравнение Ван-дер-Ваальса $\left(p + \frac{a}{v^2}\right)(v - b) = RT$, выразите критическую температуру, давление и удельный объем через константы этого уравнения.

20. Покажите, что в фазовой hs -диаграмме критическая точка не может совпадать с точкой пограничной кривой, в которой энтальпия имеет максимальное значение. На какой ветви пограничной кривой, левой или правой, находится критическая точка?

КОНТРОЛЬНАЯ РАБОТА 2

В задачах 1...10 рассматривается изменение состояния ненасыщенного влажного воздуха в сушильных установках. Задачи должны решаться с использованием hd -диаграммы (в некоторых учебниках она называется Id -диаграммой). Величины, не приведенные на диаграмме, но необходимые для решения задач, рассчитываются по формулам [1]. Внимательно отнеситесь к тому, расход какого воздуха — влажного или сухого — определяется в задаче, при необходимости сделайте пересчет. Имейте также в виду формулу связи массового и объемного расходов: $V = Mv$, где V — объемный расход, м³/с; M — массовый расход, кг/с; v — удельный объем, м³/кг.

Задачи 11...20 посвящены процессам течения идеальных газов в сужающихся соплах и соплах Лавалю. Во всех приведенных задачах течение считается адиабатным. Расчеты следует приводить по формулам течения идеального газа, пренебрегая скоростью на входе в сопло. Решение задач необходимо начинать с сопоставления располагаемого ($\beta_{\text{расп}} = p_2/p_1$) и критического ($\beta_{\text{кр}} = p_{\text{кр}}/p_1$) значений величины β (в [1] эта величина обозначена ψ). В результате сопоставления должен быть сделан вывод о режиме течения в сопле и выбраны соответствующие расчетные формулы. Необходимо также привести схему сопла с обозначением рассчитываемых сечений.

При решении задач 21...30 на истечение водяного пара должна использоваться hs -диаграмма водяного пара. Если на диаграмме не приведены изохоры, то значения удельного объема v необходимо определять по таблицам свойств воды и водяного пара. Эти задачи следует начинать с сопоставления располагаемого и критического значений величины β . Критическое значение $\beta_{\text{кр}}$ водяного пара зависит от начальных и конечных параметров водяного пара и, в принципе, должно определяться и уточняться в процессе решения задачи. Однако точность определения параметров по hs -диаграмме делает такие уточнения нецелесообразными, и в приведенных задачах величина $\beta_{\text{кр}}$ задается в условии.

В задачах 31...40 рассматривается сжатие идеального газа в одно- и многоступенчатых компрессорах. Теплоемкость рабочего тела считается здесь не зависящей от температуры, и для определения показателя адиабаты k используется табл. 1 приложения. При решении задач 34 и 35 следует использовать соотношения для адиабатного и изотермического к. п. д. компрессора в виде:

$$\eta_{ад} = N_{ад}/N_{факт}; \quad \eta_{из} = N_{из}/N_{факт};$$

где $N_{ад}$ и $N_{из}$ — теоретическое значение мощности, затрачиваемой при адиабатном и изотермическом сжатии, соответственно; $N_{факт}$ — ее фактическое значение.

Распределение перепада давлений по ступеням при многоступенчатом сжатии принимается оптимальным и рассчитывается по формуле

$$p_{i+1}/p_i = \sqrt[n]{p_n/p_1}.$$

где p_i и p_{i+1} — давление газа на входе и выходе из ступени соответственно; p_n — давление на выходе из последней ступени; p_1 — давление на входе в первую ступень; n — число ступеней сжатия.

Задачи 41...50 посвящены идеальным циклам двигателей внутреннего сгорания и газотурбинных установок. Рабочее тело (воздух) считается идеальным газом с показателем адиабаты $k=1,4$, а для определения его теплоемкости используется табл. 1 приложения.

В ряде задач требуется изобразить рассчитываемые процессы и циклы в соответствующих координатах ($p, v; T, s; h, s$). При этом имеется в виду лишь их принципиально правильное изображение, а не построение этих диаграмм в масштабе.

ЗАДАЧИ

1. В идеальную сушильную камеру подается 50 кг влажного воздуха в секунду при параметрах $\varphi_1 = 5\%$, $t_1 = 90^\circ\text{C}$. Относительная влажность воздуха на выходе из камеры $\varphi_2 = 60\%$. Определить массовый и объемный расход влажного воздуха на выходе из камеры. Принять давление в камере $B = 0,1$ МПа. Задачу решить с использованием Hd -диаграммы и привести схему решения.

2. Определить массовый и объемный расход влажного воздуха на входе в идеальную сушильную камеру, если известно, что в камере испаряется 10 кг воды в секунду, параметры влажного воздуха на выходе из камеры $\varphi_2 = 60\%$ и $t_2 = 45^\circ\text{C}$, а изменение влагосодержания воздуха в камере $\Delta d = 20$ г на 1 кг сухого воздуха. Принять давление в камере $B = 0,1$ МПа. Задачу решить с использованием Hd -диаграммы и привести схему решения.

3. В сушильную установку подается 50 кг/с влажного воздуха с параметрами $B = 0,1$ МПа, $\varphi_1 = 40\%$ и $t_1 = 25^\circ\text{C}$. Определить объемный расход влажного воздуха на входе в установку и количество воды, испаряющейся из высушиваемого материала в секунду, если изменение влагосодержания воздуха в установке $\Delta d = 19$ г на 1 кг сухого воздуха.

4. Влажный воздух поступает в идеальную сушильную камеру при параметрах $t_1 = 70^\circ\text{C}$ и $\varphi_1 = 10\%$ и выходит из камеры при относительной влажности $\varphi_2 = 90\%$. Приняв давление в камере $B = 0,1$ МПа, определить плотность влаж-

ного воздуха на выходе из камеры и количество сухого воздуха, необходимого для испарения 1000 кг воды из высушиваемого материала. При расчете использовать Hd -диаграмму и привести схему решения.

5. Влажный воздух на входе в идеальную сушильную установку имеет относительную влажность $\varphi_1 = 50\%$ и температуру $t_1 = 15^\circ\text{C}$. В калорифере он подогревается до $t_2 = 90^\circ\text{C}$. Затем в сушильной камере во влажный воздух испаряется вода в количестве 20 г на 1 кг сухого воздуха. Приняв давление в сушильной установке $B = 0,1$ МПа, определить температуру и плотность влажного воздуха на выходе из сушильной камеры и расход теплоты на испарение 1 кг воды. Задачу решить с использованием Hd -диаграммы и привести схему решения.

6. Влажный воздух на входе в сушильную установку имеет параметры $\varphi_1 = 50\%$ и $t_1 = 15^\circ\text{C}$. Объемный расход влажного воздуха на входе $V_1 = 50$ м³/с. Определить количество воды, испаряемой этим воздухом в секунду из высушиваемого материала, если изменение влагосодержания в камере $\Delta d = 20$ г на 1 кг сухого воздуха. Задачу решить с использованием Hd -диаграммы. Принять давление $B = 0,1$ МПа.

7. Определить необходимый объемный расход влажного воздуха на входе в сушильную установку V_1 для испарения из материала 10 кг воды в секунду, если параметры влажного воздуха на входе в установку $\varphi_1 = 40\%$ и $t_1 = 25^\circ\text{C}$, а изменение влагосодержания воздуха в сушильной камере составляет $\Delta d = 20$ г на 1 кг сухого воздуха. Принять давление $B = 0,1$ МПа.

8. Расход сухого воздуха через идеальную сушильную установку составляет 50 кг/с. Определить объемный расход влажного воздуха на входе в установку V_1 , на входе в сушильную камеру V_2 и на выходе из нее V_3 , если $\varphi_1 = 40\%$, $t_1 = 20^\circ\text{C}$, $t_2 = 85^\circ\text{C}$ и $\varphi_3 = 80\%$. Принять давление $B = 0,1$ МПа. Задачу решить с использованием Hd -диаграммы и привести схему решения.

9. Влажный воздух поступает в сушильную установку с параметрами $t_1 = 25^\circ\text{C}$ и $\varphi_1 = 80\%$, а выходит из нее с параметрами $t_2 = 55^\circ\text{C}$ и $\varphi_2 = 50\%$. Определить массовый и объемный расход влажного воздуха на выходе из установки, если из высушиваемого материала испаряется 2,8 кг воды в секунду. Задачу решить с использованием Hd -диаграммы. Принять давление $B = 0,1$ МПа.

10. Влажный воздух массой 5 кг с параметрами $\varphi_1 = 10\%$ и $t_1 = 70^\circ\text{C}$ адиабатно смешивается с 10 кг влажного воздуха, параметры которого $\varphi_2 = 40\%$ и $t_2 = 60^\circ\text{C}$. Определить влагосодержание, относительную влажность, температуру и плотность образовавшегося при смешении влажного воздуха. Принять давление воздуха до и после смешения $B = 0,1$ МПа.

У к а з а н и е. При решении задачи учесть, что при адиабатном смешении в условиях $B = \text{const}$ энтальпии системы до и после смешения одинаковы, т. е.

$$G_{см}^{возд} H_{см} = \sum_{i=1}^n G_i^{возд} H_i.$$

11. К соплу парциальной газовой турбины подводятся продукты сгорания топлива с начальными параметрами $p_1 = 1,3$ МПа и $t_1 = 550^\circ\text{C}$. В сопле давление понижается до $p_2 = 0,2$ МПа. Считая продукты сгорания идеальным газом с $R = 280$ Дж/(кг · К) и $k = 1,33$, определить: 1) какой тип сопла применен в турбине; 2) параметры и скорость газа в выходном сечении сопла; 3) расход газа, если минимальный диаметр сопла $d_{\min} = 10$ мм. Потерями на трение пренебречь.

12. Воздух с начальными параметрами $p_1 = 12$ МПа и $t_1 = 1000$ °С вытекает через сопло во внешнюю среду, давление в которой постоянно и равно 0,1 МПа. Считая воздух идеальным газом с $k = 1,34$, определить: 1) параметры и скорость воздуха в выходном сечении сужающегося сопла при скоростном коэффициенте $\varphi = 0,94$; 2) параметры и скорость воздуха в выходном сечении сопла Лавала на расчетном режиме при $\varphi = 1$; 3) площадь минимального сечения сопла Лавала при расходе воздуха 20 кг/с.

13. Водород с начальными параметрами $p_1 = 6$ МПа и $t_1 = 300$ °С вытекает через сопло во внешнюю среду, давление в которой постоянно и равно 0,42 МПа. Считая водород идеальным газом с $k = 1,4$, определить: 1) параметры и скорость в выходном сечении идеального сужающегося сопла; 2) параметры и скорость в выходном сечении сопла Лавала при расчетном режиме ($\varphi = 0,96$); 3) площадь минимального сечения сопла Лавала при расходе 3 кг/с.

14. Азот с начальными параметрами $p_1 = 0,4$ МПа и $t_1 = 600$ °С вытекает через сужающееся сопло в среду, давление в которой постоянно и равно 0,1 МПа. Считая азот идеальным газом с $k = 1,4$, определить значения p_2 , w_2 , t_2 , ρ_2 и массовый расход азота через сопло, если площадь выходного сечения сопла $F_2 = 6$ см², а скоростной коэффициент $\varphi = 0,92$. Изменяются ли параметры азота в выходном сечении, если давление среды увеличится до 0,28 МПа?

15. Кислород с начальными параметрами $p_1 = 6$ МПа и $t_1 = 300$ °С вытекает через сопло в среду, давление в которой постоянно и равно 0,42 МПа. Считая кислород идеальным газом с $k = 1,36$, определить: 1) параметры и скорость в выходном сечении сужающегося сопла при скоростном коэффициенте $\varphi = 0,95$; 2) параметры и скорость в выходном сечении идеального сопла Лавала при расчетном режиме; 3) расход кислорода при минимальной площади канала $F_{\min} = 2$ см².

16. Воздух с начальными параметрами $p_1 = 0,4$ МПа и $t_1 = 600$ °С вытекает через сужающееся сопло в среду, давление в которой постоянно и равно 0,1 МПа. Считая воздух идеальным газом с $k = 1,38$, определить давление, скорость, температуру, плотность в выходном сечении и массовый расход воздуха, если площадь выходного сечения $F_2 = 5,8$ см², а скоростной коэффициент $\varphi = 0,92$. Изменяются ли определяемые в задаче величины, если давление среды увеличится до 0,2 МПа?

17. Гелий с начальными параметрами $p_1 = 5$ МПа и $t_1 = 100$ °С вытекает через сопло, минимальный диаметр которого $d_{\min} = 10$ мм, во внешнюю среду, где давление постоянно и равно $p_c = 1$ МПа. Считая гелий идеальным газом с $k = 1,66$, определить: 1) параметры и скорость газа в выходном сечении, если сопло сужающееся и $\varphi = 1$; 2) параметры и скорость газа в выходном сечении сопла Лавала на расчетном режиме, если $\varphi = 0,96$; 3) расход гелия для первого и второго сопл, приняв для сужающейся части сопла Лавала $\varphi = 1$.

18. Диоксид углерода с начальными параметрами $p_1 = 0,6$ МПа и $t_1 = 500$ °С вытекает через сужающееся сопло в среду, давление в которой постоянно и равно 0,4 МПа. Считая диоксид углерода идеальным газом с $k = 1,2$, определить площадь выходного сечения сопла, а также параметры и скорость газа в этом сечении, если массовый расход газа равен 2 кг/с, а скоростной коэффициент $\varphi = 0,94$. Изменится ли расход газа, если давление среды понизить до $p_c = 0,2$ МПа?

19. Воздух с начальными параметрами $p_1 = 0,3$ МПа и $t_1 = 40$ °С вытекает через сужающееся сопло во внешнюю среду, в которой давление постоянно и равно 0,12 МПа. Считая воздух идеальным газом с $k = 1,4$, определить давление, скорость, температуру и плотность воздуха в выходном сечении сопла, если скоростной коэффициент $\varphi = 0,95$. Определить также площадь выходного сечения, необходимую для обеспечения расхода воздуха, равного 3 кг/с. Изменится ли расход воздуха, если давление внешней среды снизить до 0,05 МПа?

20. Воздух с начальными параметрами $p_1 = 10$ МПа и $t_1 = 600$ °С вытекает через сопло Лавала во внешнюю среду. Давление воздуха в выходном сечении сопла $p_2 = 0,1$ МПа, расход воздуха 60 кг/с. Считая воздух идеальным газом с $k = 1,4$, определить параметры и скорость воздуха в критическом и выходном сечениях сопла. Теплообменом и потерями на трение в сопле пренебречь. Определить длину расширяющейся части сопла Лавала, считая, что оно имеет коническую форму с углом раствора сопла $\gamma = 12^\circ$.

21. Водяной пар с начальными параметрами $p_1 = 3$ МПа и $t_1 = 600$ °С вытекает через сужающееся сопло в среду, давление в которой постоянно и равно 0,1 МПа. Объемный расход пара во входном сечении $V_1 = 2,7$ м³/с. Приняв для пара $\beta_{кр} = 0,55$, определить параметры и скорость пара в выходном сечении сопла, а также площадь выходного сечения, если скоростной коэффициент $\varphi = 0,93$. Какую скорость и температуру имел бы пар в выходном сечении сопла Лавала при расчетном режиме работы и $\varphi = 1$?

22. Определить скорость и степень сухости водяного пара в выходном сечении, а также отношение расходов пара для двух сужающихся сопл: 1) пар на входе в сопло имеет параметры $p_1 = 1$ МПа и $t_1 = 200$ °С; 2) пар от состояния с параметрами p_1 и t_1 дросселируется до давления $p_{1д} = 0,6$ МПа, а затем вытекает через сопло.

Для обоих случаев принять, что давление в среде, куда вытекает пар, равно $p_c = 0,1$ МПа, а $\beta_{кр} = 0,55$. Изобразить рассчитываемые процессы в h - s -диаграмме.

23. Определить скорость и степень сухости водяного пара в выходном сечении, а также отношение расходов пара для двух сопл Лавала: 1) пар на входе в сопло имеет параметры $p_1 = 5$ МПа и $t_1 = 510$ °С, а в выходном сечении сопла давление пара $p_2 = 0,1$ МПа; 2) перед поступлением в сопло пар дросселируется от заданного выше состояния (p_1 и t_1) до давления $p_{1д} = 2$ МПа, а затем в сопле расширяется до давления $p_2 = 0,1$ МПа.

Принять, что площади выходных сечений обоих сопл одинаковы. Изобразить рассчитываемые процессы в h - s -диаграмме.

24. Водяной пар вытекает через сужающееся сопло в среду, где давление постоянно и равно $p_c = 1$ МПа. Параметры пара на входе в сопло $p_1 = 10$ МПа и $t_1 = 400$ °С, скоростной коэффициент $\varphi = 0,94$. Приняв $\beta_{кр} = 0,55$, определить скорость истечения пара из сопла, его параметры в выходном сечении и массовый расход пара при площади выходного сечения $F = 200$ мм². Какую скорость и температуру имел бы пар в выходном сечении при том же скоростном коэффициенте, если бы истечение происходило через сопло Лавала, работающее в расчетном режиме?

25. Определить скорость и степень сухости водяного пара в выходном сечении, а также отношение расходов пара для двух сужающихся сопл: 1) пар на

входе в сопло имеет параметры $p_1 = 0,3$ МПа и $t_1 = 150$ °С; 2) пар от состояния с параметрами p_1 и t_1 дросселируется до давления $p_{1д} = 0,2$ МПа, а затем вытекает через сопло.

Для обоих случаев принять, что давление в среде, в которую происходит истечение пара, $p_c = 0,1$ МПа, а $\beta_{кр} = 0,55$. Изобразить рассчитываемые процессы в h -диаграмме.

26. Водяной пар течет по соплу Лавала. Параметры пара во входном сечении сопла $p_1 = 10$ МПа, $t_1 = 650$ °С. Давление пара в выходном сечении сопла $p_2 = 0,2$ МПа. Приняв для пара $\beta_{кр} = 0,55$, определить параметры пара в критическом и выходном сечениях сопла. Определить также площадь этих сечений, если расход пара равен 30 кг/с. Потерями на трение в сужающейся части сопла пренебречь, а для расширяющейся части сопла принять $\varphi = 0,94$.

27. Определить скорость и степень сухости водяного пара в выходном сечении, а также отношение расходов пара для двух сопел Лавала: 1) пар на входе в сопло имеет параметры $p_1 = 5$ МПа и $t_1 = 500$ °С, а в выходном сечении сопла давление пара $p_2 = 0,2$ МПа; 2) перед поступлением в сопло пар от указанного выше состояния (p_1 и t_1) дросселируется до давления $p_{1д} = 2$ МПа, а затем в сопле расширяется до давления $p_2 = 0,2$ МПа.

Принять, что в обоих случаях сопла имеют одинаковую площадь критического сечения, а $\beta_{кр} = 0,55$. Изобразить рассчитываемые процессы в h -диаграмме.

28. Водяной пар течет по соплу Лавала. Параметры пара во входном сечении сопла $p_1 = 5$ МПа, $t_1 = 600$ °С. Объемный расход пара на входе в сопло $V_1 = 1,6$ м³/с. Давление пара в выходном сечении сопла $p_2 = 0,2$ МПа. Приняв для пара $\beta_{кр} = 0,55$, определить его параметры и скорости в выходном и критическом сечениях, площади выходного и критического сечений. Потерями на трение в сужающейся части сопла пренебречь, а для расширяющейся части принять скоростной коэффициент $\varphi = 0,95$.

29. Водяной пар вытекает через сужающееся сопло во внешнюю среду, давление в которой постоянно и равно 0,1 МПа. Параметры пара на входе в сопло $p_1 = 0,5$ МПа и $t_1 = 450$ °С. Пренебрегая трением и теплообменом в сопле и приняв для пара $\beta_{кр} = 0,55$, определить параметры пара в выходном сечении, скорость истечения, массовый расход пара и площадь выходного сечения, если объемный расход пара в выходном сечении $V_2 = 2,2$ м³/с. Какую скорость, температуру и плотность имел бы пар в выходном сечении сопла Лавала на расчетном режиме при скоростном коэффициенте $\varphi = 0,94$?

30. Водяной пар течет по соплу Лавала, имея на входе в сопло давление $p_1 = 0,5$ МПа, температуру $t_1 = 470$ °С и объемный расход $V_1 = 1,4$ м³/с. Давление пара в выходном сечении сопла $p_2 = 0,01$ МПа. Приняв для пара $\beta_{кр} = 0,55$, определить параметры пара и его скорости в критическом и выходном сечениях, а также площади этих сечений. Потерями на трение в сужающейся части сопла пренебречь, а для расширяющейся части сопла принять скоростной коэффициент $\varphi = 0,96$.

31. Определить предельную степень повышения давления и теоретическую мощность, затрачиваемую на привод одноступенчатого компрессора при адиабатном сжатии воздуха, если во избежание горения смазки температура воздуха на выходе не должна превышать 200 °С. Массовый расход воздуха $m = 0,25$ кг/с, а его начальная температура $t_1 = 20$ °С. Изобразить процесс в координатах p, v и T, s .

32. Определить предельную степень повышения давления и теоретическую мощность, затрачиваемую на привод одноступенчатого компрессора при политропном ($n = 1,25$) сжатии азота, а также расход охлаждающей воды, если во избежание горения смазки температура азота на выходе не должна превышать 200 °С. Массовый расход азота $m = 0,15$ кг/с, а его начальная температура $t_1 = 15$ °С. Охлаждающая вода нагревается в рубашке цилиндра на 10 °С. Изобразить процесс в координатах p, v и T, s .

33. Воздух адиабатно сжимается в одноступенчатом компрессоре от давления $p_1 = 0,1$ МПа до $p_2 = 0,5$ МПа. Во сколько раз уменьшится теоретическая мощность, затрачиваемая на привод компрессора, если адиабатное сжатие заменить изотермическим. Изобразить процессы в координатах p, v и T, s .

34. Фактическая мощность, затрачиваемая на привод одноступенчатого компрессора, составляет 52 кВт. Определить адиабатный к. п. д. этого компрессора, если в нем адиабатно сжимается 0,3 кг/с воздуха от давления $p_1 = 0,1$ МПа ($t_1 = 20$ °С) до $p_2 = 0,45$ МПа. Изобразить процесс в координатах p, v и T, s .

35. Фактическая мощность, затрачиваемая на привод одноступенчатого охлаждаемого компрессора, составляет 43,5 кВт. Определить изотермический к. п. д. этого компрессора, если в нем политропно сжимается 0,2 кг/с азота от давления $p_1 = 0,1$ МПа ($t_1 = 10$ °С) до $p_2 = 0,7$ МПа. Изобразить процесс в координатах p, v и T, s .

36. Воздух, массовый расход которого равен 0,2 кг/с, адиабатно сжимается в поршневом компрессоре от давления $p_1 = 0,1$ МПа ($t_1 = 20$ °С) до $p_2 = 2,5$ МПа. Определить необходимое число ступеней сжатия, а также теоретическую мощность, затрачиваемую на привод компрессора, если во избежание горения смазки температура воздуха на выходе из каждой ступени не должна превышать 200 °С. Изобразить процессы в координатах p, v и T, s .

37. Азот сжимается в одноступенчатом компрессоре по политропе с показателем $n = 1,15$ от давления $p_1 = 0,1$ МПа ($t_1 = 20$ °С) до давления $p_2 = 2,8$ МПа. Во сколько раз уменьшится теоретическая мощность, затрачиваемая на привод компрессора, если одноступенчатое сжатие заменить двухступенчатым при неизменном показателе политропы. Определить также максимальные температуры азота в обоих случаях и изобразить процессы в координатах p, v и T, s .

38. Определить расход охлаждающей воды, а также массовую и объемную (при начальных условиях) подачи одноступенчатого компрессора, в котором по политропе с показателем $n = 1,25$ сжимается гелий от давления $p_1 = 0,1$ МПа ($t_1 = 0$ °С) до давления $p_2 = 0,4$ МПа. Теоретическое значение мощности, затрачиваемой на привод компрессора, $N = 20$ кВт, а вода нагревается в рубашке цилиндра на 15 °С. Изобразить процесс в координатах p, v и T, s .

39. Определить массовую и объемную (при начальных условиях) подачу двухступенчатого компрессора, в котором адиабатно сжимается воздух от давления $p_1 = 0,1$ МПа ($t_1 = 20$ °С) до $p_2 = 2,2$ МПа. Теоретическое значение мощности, затрачиваемой на привод компрессора, $N = 100$ кВт. Определить также количество теплоты, которое отводится от воздуха в промежуточном холодильнике. Изобразить процессы в координатах p, v и T, s .

40. Определить массовую и объемную (при начальных условиях) подачу трехступенчатого компрессора, в котором адиабатно сжимается воздух от давления $p_1 = 0,1$ МПа ($t_1 = 30$ °С) до $p_2 = 15$ МПа. Теоретическое значение мощности,

затрачиваемой на привод компрессора, $N = 450$ кВт. Определить также количество теплоты, которое отводится в каждом из промежуточных холодильников. Изобразить процессы в координатах p , v и T , s .

41. Рассчитать цикл ДВС с изохорным подводом теплоты (цикл Отто), если начальные параметры рабочего тела $p_1 = 0,1$ МПа, $t_1 = 20$ °С, степень сжатия $\epsilon = 6,5$, а отведенное количество теплоты $|q_2| = 320$ кДж/кг. Определить параметры в характерных точках цикла, подведенное количество теплоты, работу и термический к. п. д. цикла, а также термический к. п. д. цикла Карно в том же интервале температур. Изобразить цикл в координатах p , v и T , s . Рабочее тело — воздух.

42. Рассчитать цикл ДВС с изобарным подводом теплоты (цикл Дизеля), если начальные параметры рабочего тела $p_1 = 0,1$ МПа, $t_1 = 0$ °С, степень сжатия $\epsilon = 15$, а отведенное количество теплоты $|q_2| = 400$ кДж/кг. Определить параметры в характерных точках цикла, подведенное количество теплоты, работу и термический к. п. д. цикла, а также термический к. п. д. цикла Карно в том же интервале температур. Изобразить цикл в координатах p , v и T , s . Рабочее тело — воздух.

43. Рассчитать цикл ДВС со смешанным подводом теплоты (цикл Тринклера), если начальные параметры рабочего тела $p_1 = 0,1$ МПа, $t_1 = 30$ °С, степень сжатия $\epsilon = 10$, степень повышения давления $\lambda = 1,5$, а отведенное количество теплоты $|q_2| = 600$ кДж/кг. Определить параметры в характерных точках цикла, подведенное количество теплоты, работу и термический к. п. д. цикла, а также термический к. п. д. цикла Карно в том же интервале температур. Изобразить цикл в координатах p , v и T , s . Рабочее тело — воздух.

44. Определить параметры в характерных точках циклов ДВС с изохорным (цикл Отто) и изобарным (цикл Дизеля) подводом теплоты и сопоставить значения их термических к. п. д., если начальные параметры, максимальные температуры и отведенные количества теплоты одинаковы и равны: $p_1 = 0,1$ МПа; $t_1 = 20$ °С; $t_{\max} = 1800$ °С; $|q_2| = 480$ кДж/кг. Изобразить циклы в координатах p , v и T , s . Рабочее тело — воздух.

45. Определить параметры в характерных точках циклов ДВС с изобарным (цикл Дизеля) и смешанным (цикл Тринклера) подводом теплоты и сопоставить значения их термических к. п. д., если начальные параметры, максимальные температуры и отведенные количества теплоты одинаковы и равны: $p_1 = 0,1$ МПа; $t_1 = 30$ °С; $t_{\max} = 1600$ °С; $|q_2| = 540$ кДж/кг. Степень повышения давления в цикле со смешанным подводом теплоты $\lambda = 1,6$. Изобразить циклы в координатах p , v и T , s . Рабочее тело — воздух.

46. Определить параметры в характерных точках циклов ДВС с изохорным (цикл Отто) и изобарным (цикл Дизеля) подводом теплоты и сопоставить значения термических к. п. д., если начальные параметры, степени сжатия и отведенные количества теплоты одинаковы и равны: $p_1 = 0,1$ МПа; $t_1 = 0$ °С; $\epsilon = 8$; $|q_2| = 370$ кДж/кг. Изобразить циклы в координатах p , v и T , s . Рабочее тело — воздух.

47. Рассчитать цикл ГТУ с изобарным подводом теплоты и адиабатным сжатием в компрессоре, если начальные параметры рабочего тела $p_1 = 0,1$ МПа; $t_1 = 10$ °С, степень повышения давления при сжатии $\beta = 6$, а температура рабочего тела на входе в турбину $t_3 = 850$ °С. Определить параметры в характер-

ных точках цикла, подведенное и отведенное количество теплоты, работу и термический к. п. д. цикла, а также термический к. п. д. цикла Карно в том же интервале температур. Изобразить цикл в координатах p , v и T , s . Рабочее тело — воздух.

48. Рассчитать цикл ГТУ с изохорным подводом теплоты, если начальные параметры рабочего тела $p_1 = 0,1$ МПа; $t_1 = -20$ °С, степень повышения давления при сжатии $\beta = 5$, а температура рабочего тела на входе в турбину $t_3 = 750$ °С. Определить параметры в характерных точках цикла, подведенное и отведенное количество теплоты, работу и термический к. п. д. цикла, а также термический к. п. д. цикла Карно в том же интервале температур. Изобразить цикл в координатах p , v и T , s .

49. Рассчитать цикл ГТУ с адиабатным сжатием в компрессоре, изобарным подводом теплоты и предельной регенерацией, если начальные параметры рабочего тела $p_1 = 0,1$ МПа, $t_1 = 0$ °С, температура воздуха на выходе из компрессора $t_2 = 200$ °С, температура рабочего тела на выходе из турбины $t_4 = 450$ °С. Определить параметры в характерных точках цикла, подведенное и отведенное количество теплоты, полезную работу и термический к. п. д. цикла, а также термический к. п. д. цикла Карно в том же интервале температур. Изобразить цикл в координатах p , v и T , s . Рабочее тело — воздух.

50. Рассчитать цикл ГТУ с изобарным подводом теплоты и регенерацией (степень регенерации $\sigma = 0,8$), если начальные параметры рабочего тела $p_1 = 0,1$ МПа, $t_1 = -10$ °С; степень повышения давления при сжатии $\beta = 5,5$, а температура рабочего тела на выходе из турбины $t_4 = 420$ °С. Определить параметры в характерных точках цикла, подведенное и отведенное количество теплоты, полезную работу и термический к. п. д., а также термический к. п. д. цикла Карно в том же интервале температур. Изобразить цикл в координатах p , v и T , s . Рабочее тело — воздух.

ВОПРОСЫ

1. Выведите формулу для расчета объема влажного воздуха, приходящегося на 1 кг сухого воздуха.

2. Постройте на h - d -диаграмме влажного воздуха линию, соответствующую значению газовой постоянной влажного воздуха $R_{\text{вв}} = 290$ кДж/(кг · К).

3. Почему процесс испарения в идеальной сушильной камере изображается в h - d -диаграмме линией $H = \text{const}$?

4. От каких факторов зависит расход газа при критическом течении в минимальном сечении сопла? Как влияет каждый из них на расход?

5. Воздух течет по каналу, имеющему форму сопла Лаваля. Давление воздуха во входном сечении $p_1 = 0,12$ МПа, давление в среде, куда вытекает воздух, $p_c = 0,1$ МПа. Приведите графики изменения скорости и давления воздуха по длине канала.

6. В каком случае адиабатное обратимое расширение и дросселирование пара при заданном падении давления Δp сопровождается одинаковым изменением температуры пара?

7. Через данное сужающееся сопло при критическом режиме вытекает во внешнюю среду в первом случае воздух, во втором — водород. Сравните скорости

истечения w_2 и расходы в этих двух случаях при одинаковых значениях параметров на входе p_1 и T_1 .

8. Используя уравнение первого закона термодинамики для потока, покажите, при каких допущениях техническая работа сжатия в компрессоре может быть определена по формуле $|l_{\text{т}}| = h_1 - h_2$.

9. Покажите, что в сужающемся сопле ($dF/F < 0$) нельзя превзойти скорость звука.

10. Воздух с давлением $p_1 = 1$ МПа и температурой 400°C вытекает через сужающееся сопло в среду с давлением 0,1 МПа. Как изменятся скорость истечения и массовый расход воздуха, если сужающееся сопло заменить комбинированным (соплом Лаваля)? Площади выходного сечения сужающегося сопла и минимального сечения сопла Лаваля одинаковы.

11. В каком случае мощность, затрачиваемая на привод компрессора, будет иметь наибольшее, а в каком наименьшее значение, если в нем адиабатно сжимается азот, гелий и диоксид углерода? Начальные и конечные температуры, а также массовые расходы газа во всех трех случаях одинаковы.

12. Объясните, почему с увеличением числа ступеней сжатия в поршневом компрессоре его подача при прочих равных условиях увеличивается?

13. Используя выражение для дифференциального дроссель-эффекта, покажите, что при дросселировании веществ с аномальными свойствами ($(\partial v/\partial T)_p < 0$; $(\partial p/\partial T)_v < 0$) температура повышается.

14. Получите расчетную формулу для определения оптимального распределения перепада давления по ступеням компрессора при многоступенчатом сжатии газа.

15. Постройте график, иллюстрирующий влияние интенсивности охлаждения воздуха в рубашке одноступенчатого поршневого компрессора, в относительных координатах $l_{\text{пол}}/l_{\text{изот}}$, $q_{\text{пол}}/q_{\text{изот}}$, где $l_{\text{пол}}$ и $l_{\text{изот}}$, $q_{\text{пол}}$ и $q_{\text{изот}}$ — работа, затрачиваемая на привод компрессора, и отведенное количество теплоты при политропном ($k \geq n \geq 1$) и изотермическом сжатии соответственно.

Указание. Следует задать ряд значений n (1; 1,1; ...; 1,4) и по ним определить величины $l_{\text{пол}}/l_{\text{изот}}$ и $q_{\text{пол}}/q_{\text{изот}}$.

16. Получите выражения для дифференциального дроссель-эффекта газа, подчиняющегося уравнению состояния $p(v - b) = RT$ (b — постоянная величина). Существует ли для этого газа линия инверсии?

17. Постройте график зависимости термического к. п. д. цикла ДВС с изобарным подводом теплоты (цикл Дизеля) от степени сжатия в интервале значений $\epsilon = 8 \dots 18$. Показатель адиабаты для рабочего тела $k = 1,35$.

18. Сравните графическим способом термические к. п. д. циклов с изохорным (цикл Отто) и изобарным (цикл Дизеля) подводом теплоты. Степени сжатия и максимальные температуры в циклах одинаковы.

19. Постройте график зависимости термического к. п. д. цикла ДВС с изохорным подводом теплоты (цикл Отто) от показателя адиабаты рабочего тела ($k = 1,3; 1,31; \dots; 1,4$) при степени сжатия $\epsilon = 6,5$.

20. Изобразите графически влияние степени регенерации теплоты ($\sigma = 0; 0,2; \dots; 1$) на термический к. п. д. ГТУ с изобарным подводом теплоты и адиабатным сжатием в компрессоре, если полезная работа цикла $l_{\text{ц}} = 320$ кДж/кг, подведенное количество теплоты в цикле без регенерации ($\sigma = 0$) $q_1 = 1200$ кДж/кг, а в цикле с предельной регенерацией ($\sigma = 1$) $q_1 = 700$ кДж/кг.

КОНТРОЛЬНАЯ РАБОТА 3

Задачи 1...20 посвящены расчету паротурбинных установок, работающих по циклу Ренкина. В задачах 1...10 рассматриваются установки конденсационных электростанций (КЭС), а 11...20 — теплоэлектроцентрали (ТЭЦ). Эти задачи можно решать либо с помощью h - s -диаграммы водяного пара, используя таблицы [4] лишь для определения параметров тех точек, которые находятся за ее пределами (например, параметров жидкости), либо полностью по таблицам [4]. При этом следует пояснять, как находилась каждая рассчитываемая точка. В первом случае (решение с помощью диаграммы) должны быть указаны две линии, пересечение которых определяет рассматриваемую точку. Во втором — названы два параметра, которые позволяют найти состояние по таблицам [4].

Если в задаче специально не оговорено и не задано значение внутреннего относительного к. п. д. турбины или ее отдельных частей, то процесс расширения пара в ней следует считать изоэнтальпным.

Степень совершенства идеального цикла теплового двигателя определяется его термическим к.п.д. $\eta_{\text{т}}$, а реального — внутренним абсолютным к.п.д. $\eta_{\text{а}}$. Связь между этими к. п. д. для простейших циклов паротурбинных установок может быть записана в виде

$$\eta_{\text{а}} = \eta_{\text{т}} \eta_{\text{от}}^{\text{тн}}$$

где $\eta_{\text{от}}^{\text{тн}}$ — внутренний относительный к. п. д. комплекса турбина—насос. Так как работа, затрачиваемая на привод питательного насоса, относительно невелика, то при использовании этой формулы можно считать, что величина $\eta_{\text{от}}^{\text{тн}}$ совпадает с внутренним относительным к. п. д. турбины $\eta_{\text{от}}$.

Для определения внутреннего абсолютного к. п. д. цикла с регенеративным подогревом питательной воды следует использовать выражение

$$\eta_{\text{пер}} = \left\{ h_1 - h_2 - \sum_{j=1}^n (h_j^{\text{отб}} - h_2) \alpha_j - |l_{\text{н}}| \right\} / (h_1 - h_{\text{в}}),$$

где h_1 , h_2 , $h_j^{\text{отб}}$ и $h_{\text{в}}$ — значение энтальпии перед турбиной, на входе в конденсатор, в j -м регенеративном отборе и на выходе из последнего по ходу воды смешивающего подогревателя соответственно; α_j — доля отбираемого пара в j -м отборе; $l_{\text{н}}$ — работа, затрачиваемая на привод питательного насоса (питательных насосов). Значения $h_j^{\text{отб}}$ и α_j должны определяться с учетом потерь в соответствующей группе ступеней турбины.

Рабочее тело газовой части цикла парогазовых (задачи 21...23), магнито-гидродинамических (задачи 24, 25), а также воздушных холодильных и тепло-насосных установок (задачи 39, 40) следует считать идеальным газом с постоянной теплоемкостью. Если по условию задачи теплоемкость газа не задана, то она определяется по табл. 1 приложения.

В задачах 26 и 27 ртутный и цезиевый циклы Ренкина в области насыщенного пара заменяются циклами Карно в соответствующем интервале температур, так как вследствие сравнительно низкой теплоемкости жидкой фазы нижняя пограничная кривая близка к адиабате (изоэнтропе).

Расчет хладоновых и аммиачных подстроек бинарных циклов (задачи 28...30) выполняется по табл. 3 и 4 приложения, в которых приводятся свойства этих веществ на линии насыщения. По этим же таблицам рассчитываются циклы холодильной и теплонасосной установок, работающих в области влажного насыщенного пара (задачи 31, 32).

При решении задач 33...38 помимо таблиц состояния насыщения хладон-12 и аммиака используются также таблицы термодинамических параметров этих веществ в области перегретого пара (см. табл. 6 и 7 приложения). В задачах 37, 38 энтальпия и энтропия переохлажденной жидкости (точка 5) определяются с помощью заданной по условию задачи средней изобарной теплоемкости жидкости c_{pm} по формулам:

$$h_5 = h_4 - c_{pm}(T_4 - T_5); s_5 = s_4 - c_{pm} \ln(T_4/T_5).$$

Решение задач 1...40 рекомендуется начинать с изображения принципиальной схемы установки и ее цикла в координатах h, s или T, s . При этом обозначения точек в условии задачи, на диаграмме и в дальнейших расчетах должны совпадать. Как и прежде, диаграммы строятся без масштаба, однако изображения процессов, а для паросиловых установок и пограничных кривых должны быть качественно правильными. Необходимо помнить, что в термодинамических диаграммах могут изображаться только квазистатические (обратимые) процессы. Необратимые процессы (например, процесс расширения пара в группе ступеней турбины с учетом потерь) могут быть здесь представлены лишь условно, своими начальными и конечными состояниями, между которыми проводятся пунктирные прямые линии.

Задачи 41...45 посвящены расчету тепловых эффектов химических реакций. При их решении используется таблица стандартных теплот образования веществ (см. табл. 8 приложения). Теплоемкости идеальных газов определяются с учетом их зависимости от температуры по табл. 2 приложения (при необходимости применяется линейная интерполяция). Степени диссоциации веществ (задачи 46...50) рассчитываются с помощью значений констант равновесия соответствующих химических реакций (см. табл. 9 приложения).

ЗАДАЧИ

1. Параметры водяного пара перед конденсационной турбиной: $p_1 = 9$ МПа, $t_1 = 500$ °С, давление в конденсаторе $p_2 = 0,004$ МПа. Внутренний относительный к. п. д. турбины $\eta_{oi} = 0,8$. Определить состояние пара после расширения в турбине, термический и внутренний абсолютный к. п. д. цикла Ренкина. Изобразить процесс в турбине и цикл в координатах h, s и T, s .

2. Сопоставить значения термического к. п. д. цикла Ренкина при следующих параметрах водяного пара перед турбиной КЭС: 1) $p_1 = 3,5$ МПа, $t_1 = 435$ °С; 2) $p_1 = 9$ МПа, $t_1 = 500$ °С; 3) $p_1 = 13$ МПа, $t_1 = 560$ °С. Давление в конденсаторе во всех случаях равно 0,004 МПа. В расчетах следует учесть работу, затрачиваемую на привод питательного насоса. Изобразить циклы в координатах h, s и T, s .

3. Параметры водяного пара перед конденсационной турбиной $p_1 = 13$ МПа, $t_1 = 560$ °С, а после промежуточного перегрева $p_3 = 3$ МПа, $t_3 = 560$ °С. Давле-

ние в конденсаторе $p_4 = 0,004$ МПа. Определить подводимое количество теплоты в промежуточном перегревателе, а также термический к. п. д. цикла. Сопоставить полученное значение этого к. п. д. с его аналогом для цикла без промежуточного перегрева. В обоих случаях необходимо учесть работу, затрачиваемую на привод питательного насоса. Изобразить циклы в координатах h, s и T, s .

4. Паротурбинная установка электрической мощностью 200 МВт работает по циклу с промежуточным перегревом пара и регенеративным подогревом питательной воды. Начальные параметры водяного пара: $p_1 = 13$ МПа, $t_1 = 560$ °С, давление в конденсаторе $p_4 = 0,004$ МПа. При давлении $p_2 = 3$ МПа часть пара отбирается для подогрева воды в смешивающем подогревателе, а остальная часть поступает в промежуточный перегреватель, после которого с температурой 560 °С направляется в ступени низкого давления турбины. Значения внутреннего относительного, механического к. п. д. турбины и к. п. д. электрогенератора соответственно равны: $\eta_{oi} = 0,8$; $\eta_m = 0,98$; $\eta_{\text{эг}} = 0,98$. Определить расход пара. Изобразить процесс расширения пара в турбине и цикл в координатах h, s и T, s .

5. Параметры водяного пара перед конденсационной турбиной: $p_1 = 24$ МПа, $t_1 = 560$ °С, а после промежуточного перегрева $p_3 = 4$ МПа, $t_3 = 560$ °С. Давление в конденсаторе $p_4 = 0,004$ МПа. Определить количество теплоты, подводимое в промежуточном перегревателе, а также термический к. п. д. цикла с учетом работы, затрачиваемой на привод питательного насоса, и без учета этой работы. Изобразить цикл в координатах h, s и T, s .

6. Паротурбинная установка работает по циклу с регенеративным подогревом питательной воды в смешивающем подогревателе. Параметры пара перед турбиной: $p_1 = 9$ МПа, $t_1 = 500$ °С, давление в конденсаторе $p_3 = 0,004$ МПа. Отбор пара для подогрева воды осуществляется при давлении 0,12 МПа. Внутренний относительный к. п. д. ступеней $\eta_{oi} = 0,8$. Определить расход пара через турбину, если ее мощность равна 50 МВт. Изобразить процесс расширения пара в турбине и цикл в координатах h, s и T, s .

7. Параметры водяного пара перед конденсационной турбиной: $p_1 = 9$ МПа, $t_1 = 500$ °С, давление в конденсаторе $p_3 = 0,004$ МПа. Внутренний относительный к. п. д. ступеней $\eta_{oi} = 0,82$. Давление пара, отбираемого для регенеративного подогрева питательной воды в смешивающем подогревателе, равно 2 МПа. Определить температуру питательной воды и внутренний абсолютный к. п. д. цикла. Сопоставить полученное значение этого к. п. д. с его аналогом для цикла без регенеративного подогрева воды. Изобразить процесс расширения пара в турбине и циклы в координатах h, s и T, s .

8. Параметры водяного пара перед конденсационной турбиной: $p_1 = 13$ МПа, $t_1 = 560$ °С, давление в конденсаторе $p_4 = 0,004$ МПа. При давлении $p_3 = 3$ МПа часть пара отбирается для регенеративного подогрева воды в смешивающем подогревателе, а остальная часть сначала поступает в промежуточный перегреватель, где перегревается до температуры 560 °С, а затем в цилиндр низкого давления турбины. Внутренний относительный к. п. д. цилиндра высокого давления турбины $\eta_{oi}^H = 0,8$, цилиндра низкого давления $\eta_{oi}^H = 0,82$. Определить внутренний абсолютный к. п. д. цикла. Изобразить процесс расширения пара в турбине и цикл в координатах h, s и T, s .

9. Паротурбинная установка может работать по циклу с одно- или двух-ступенчатым отбором пара для регенеративного подогрева питательной воды.

Начальные параметры водяного пара: $p_1 = 9$ МПа, $t_1 = 500$ °С, давление в конденсаторе 0,004 МПа. Подогрев осуществляется в смешивающих подогревателях до температуры воды на входе в котел 230 °С. Внутренний относительный к. п. д. ступеней $\eta_{oi} = 0,8$. Сопоставить значения внутреннего абсолютного к. п. д. цикла для этих двух случаев, если при двухступенчатом подогреве в каждом подогревателе подводится одинаковое количество теплоты. Изобразить циклы в координатах h , s и T , s .

10. Параметры водяного пара перед конденсационной турбиной: $p_1 = 24$ МПа, $t_1 = 560$ °С, давление в конденсаторе $p_5 = 0,004$ МПа. При давлении $p_2 = 4$ МПа часть пара отбирается для регенеративного подогрева питательной воды в смешивающем подогревателе, а остальная часть поступает в промежуточный перегреватель, где нагревается до температуры 560 °С. При давлении $p_4 = 0,2$ МПа осуществляется второй отбор пара для регенеративного подогрева воды, который также производится в смешивающем подогревателе. Внутренние относительные к. п. д. групп ступеней турбины до промежуточного перегрева и после него соответственно равны 0,8 и 0,82. Определить внутренний абсолютный к. п. д. цикла. Изобразить процесс расширения пара в турбине и цикл в координатах h , s и T , s .

11. В конденсаторе ТЭЦ, работающей по схеме с ухудшенным вакуумом, поддерживается давление $p_2 = 0,12$ МПа, а конденсат из него отводится при температуре насыщения. Определить мощность турбины и расход теплоты, направляемой потребителю, если расход пара $D = 50$ кг/с, а начальные параметры пара $p_1 = 3,5$ МПа, $t_1 = 435$ °С. Процесс расширения пара в турбине считать изэнтропным. Изобразить цикл в координатах h , s и T , s .

12. Мощность турбины ТЭЦ, работающей по схеме с ухудшенным вакуумом, составляет 30 МВт. Определить расход пара и количество теплоты, направляемое потребителю, если начальные параметры пара $p_1 = 3,5$ МПа, $t_1 = 435$ °С, давление в конденсаторе $p_2 = 0,12$ МПа, а конденсат из него отводится при температуре насыщения. Процесс расширения пара в турбине считать изэнтропным. Изобразить цикл в координатах h , s и T , s .

13. На ТЭЦ установлена турбина с противодавлением $p_2 = 0,25$ МПа мощностью 50 МВт. Определить расход пара и количество теплоты, направляемое потребителю, если начальные параметры пара $p_1 = 9$ МПа, $t_1 = 535$ °С. Конденсат возвращается на станцию с температурой 70 °С. Процесс расширения пара в турбине считать изэнтропным. Изобразить цикл в координатах h , s и T , s .

14. Определить расход пара и мощность турбины с противодавлением $p_2 = 0,25$ МПа, если известно, что расход теплоты, направляемой ТЭЦ потребителю, равен 27 МВт. Начальные параметры пара $p_1 = 9$ МПа, $t_1 = 535$ °С. Конденсат возвращается на станцию с температурой 70 °С. Процесс расширения пара в турбине считать изэнтропным. Изобразить цикл в координатах h , s и T , s .

15. Определить мощность турбины ТЭЦ, если известно, что на производственные нужды отбирается 10 кг/с пара при давлении $p_2 = 1$ МПа. Остальная часть пара в количестве 25 кг/с расширяется в ступенях низкого давления до $p_3 = 0,25$ МПа и направляется на теплофикацию. Начальные параметры пара: $p_1 = 9$ МПа, $t_1 = 535$ °С. Процесс расширения пара в турбине считать изэнтропным. Изобразить цикл в координатах h , s и T , s и представить принципиальную схему установки.

16. Параметры пара перед теплофикационной турбиной мощностью 80 МВт: $p_1 = 9$ МПа, $t_1 = 535$ °С. В ступенях высокого давления пар расширяется до давления $p_2 = 1$ МПа и часть его в количестве 20 кг/с отбирается на производственные нужды. Оставшаяся часть пара расширяется в ступенях низкого давления до $p_3 = 0,12$ МПа и направляется на теплофикацию. Определить расход теплоты на теплофикацию, если конденсат возвращается на станцию с температурой 30 °С. Процесс расширения пара в турбине считать изэнтропным. Изобразить цикл в координатах h , s и T , s и представить принципиальную схему установки.

17. Во сколько раз уменьшится электрическая мощность ТЭЦ, работающей по схеме с ухудшенным вакуумом, если при неизменном расходе пара давление в конденсаторе возрастает с $p_2 = 0,12$ МПа до $p_3 = 0,25$ МПа? Начальные параметры пара: $p_1 = 3,5$ МПа, $t_1 = 435$ °С. Процесс расширения пара в турбине считать изэнтропным. Изобразить цикл в координатах h , s и T , s .

18. Параметры пара перед теплофикационной турбиной: $p_1 = 9$ МПа, $t_1 = 535$ °С. В ступенях высокого давления пар расширяется до давления $p_2 = 1$ МПа и 30% его отбирается на производственные нужды. Оставшаяся часть пара расширяется в ступенях низкого давления до $p_3 = 0,12$ МПа и направляется на теплофикацию. Во сколько раз изменится мощность турбины, если расход пара на теплофикацию (при неизменном общем расходе) уменьшится в 2 раза? Процесс расширения пара в турбине считать изэнтропным. Изобразить цикл в координатах h , s и T , s и представить принципиальную схему установки.

19. В ступенях высокого давления теплофикационной турбины пар расширяется от давления $p_1 = 3,5$ МПа ($t_1 = 435$ °С) до $p_2 = 0,5$ МПа и 40% его отбирается на производственные нужды. Оставшаяся часть пара расширяется до $p_3 = 0,12$ МПа и направляется на теплофикацию. Во сколько раз увеличится расход пара, если пар на производственные нужды отпустить непосредственно из котла через редукционный клапан? Электрическую мощность установки, расход теплоты на производство и температуру возвращаемого конденсата (70 °С) считать неизменными, а процесс расширения пара в турбине — изэнтропным. Изобразить цикл в координатах h , s и T , s и представить принципиальную схему установки.

20. Определить мощность теплофикационной турбины, имеющей два отбора пара. На производственные нужды отбирается 25 кг/с пара при давлении $p_4 = 0,5$ МПа, а на теплофикацию — 40 кг/с при давлении $p_5 = 0,2$ МПа. Остальная часть пара в количестве 30 кг/с расширяется до давления в конденсаторе $p_6 = 0,004$ МПа. Начальные параметры пара: $p_1 = 13$ МПа, $t_1 = 540$ °С; параметры промежуточного перегрева: $p_3 = 3$ МПа, $t_3 = 540$ °С. Процесс расширения пара в турбине считать изэнтропным. Изобразить цикл в координатах h , s и T , s и представить принципиальную схему установки.

21. Парогазовая установка работает по параллельной схеме и состоит из газо- и паротурбинной установок. Воздух с параметрами $p_1 = 0,1$ МПа и $t_1 = 20$ °С сжимается в компрессоре до давления $p_2 = 0,6$ МПа и подается в топку высоконапорного парогенератора. Из парогенератора продукты сгорания при температуре $t_3 = 750$ °С поступают в газовую турбину, где расширяются до давления $p_4 = p_1$. В ПТУ водяной пар при давлении $p_5 = 13$ МПа и $t_5 = 540$ °С расширяется в ступенях высокого давления до $p_6 = 3$ МПа и поступает в промежуточный перегреватель, где вновь нагревается до температуры $t_7 = 540$ °С. После этого

он расширяется до давления в конденсаторе $p_8 = 0,004$ МПа, и конденсат при $p_{10} = p_5$ подается насосом в парогенератор. Определить термический к. п. д. цикла, если известно, что мощность ГТУ составляет 25% мощности ПТУ. Изобразить цикл в координатах T, s и представить принципиальную схему установки. Процессы расширения в турбинах и сжатия в компрессоре считать изэнтропными. В расчетах продукты сгорания условно заменить воздухом.

22. Парогазовая установка работает по последовательной схеме и состоит из газо- и паротурбинной установок. ГТУ работает по циклу с изобарным подводом теплоты при начальных параметрах $p_1 = 0,1$ МПа и $t_1 = 20$ °С, степени повышения давления $\lambda = 5$ и температуре в конце процесса расширения $t_4 = 375$ °С. Отходящие газы ГТУ сбрасываются в топку парогенератора ПТУ. В ПТУ водяной пар при давлении $p_5 = 13$ МПа и $t_5 = 540$ °С расширяется в ступенях высокого давления до $p_6 = 3$ МПа и поступает в промежуточный пароперегреватель, где вновь нагревается до температуры $t_7 = 540$ °С. После этого он расширяется до давления в конденсаторе $p_8 = 0,004$ МПа, и конденсат при давлении $p_{10} = p_5$ подается насосом в парогенератор. Определить термический к. п. д. цикла, если известно, что мощность ГТУ составляет 20% мощности ПТУ, а температура уходящих газов на выходе из топки парогенератора $t_{yx} = 150$ °С. Изобразить цикл в координатах T, s и представить принципиальную схему установки. Процессы расширения в турбинах и сжатия в компрессоре считать изэнтропными. Рабочее тело ГТУ — воздух.

23. Парогазовая установка работает по комбинированной схеме и состоит из газо- и паротурбинной установок. ГТУ работает по циклу с изобарным подводом теплоты при начальных параметрах $p_1 = 0,1$ МПа и $t_1 = 0$ °С и степени повышения давления $\lambda = 6$. В газовой турбине рабочим телом являются продукты сгорания, которые поступают из высоконапорного парогенератора ПТУ при температуре $t_3 = 800$ °С и расширяются до давления $p_4 = p_1$. ПТУ работает по циклу с промежуточным перегревом пара. Начальные параметры пара $p_5 = 9$ МПа, $t_5 = 535$ °С, параметры промежуточного перегрева $p_7 = 1$ МПа, $t_7 = 540$ °С, давление в конденсаторе $p_8 = 0,004$ МПа. Конденсат при давлении $p_{10} = p_5$ подается насосом в газовый экономайзер, где нагревается до температуры кипения t_{11} отходящими газами ГТУ, которые охлаждаются при этом от температуры t_4 до $t_{yx} = 120$ °С. Определить термический к. п. д. цикла, изобразить цикл в координатах T, s , представить принципиальную схему установки. Процессы расширения в турбинах и сжатия в компрессоре считать изэнтропными. Рабочее тело ГТУ — воздух.

24. Определить термический к. п. д. магнитогиродинамической установки, работающей по закрытому циклу, и сопоставить его значение с к. п. д. цикла Карно в том же интервале температур, если начальные параметры рабочего тела $p_1 = 0,1$ МПа, $t_1 = 20$ °С; степень повышения давления в компрессоре $\lambda = 4,5$, температура на входе в МГД-генератор $t_3 = 2000$ °С, а давление на выходе из него $p_4 = p_1$. Охлаждение рабочего тела от температуры t_4 до $t_5 = 60$ °С осуществляется в парогенераторе ПТУ с промежуточным перегревом пара, а от температуры t_5 до t_1 — в дополнительном водяном теплообменнике. Начальные параметры водяного пара $p_6 = 24$ МПа, $t_6 = 540$ °С; параметры промежуточного перегрева $p_8 = 4$ МПа, $t_8 = 540$ °С, давление в конденсаторе $p_9 = 0,004$ МПа. Изобразить цикл в координатах T, s и представить принципиальную схему установки. Про-

цессы расширения и сжатия считать изэнтропными, а рабочее тело газового цикла — идеальным газом с постоянной теплоемкостью $c_p = 0,520$ кДж/(кг · К) и показателем изэнтропы $k = 1,667$.

25. Магнитогиродинамическая установка работает по открытому циклу. Воздух при давлении $p_1 = 0,1$ МПа и $t_1 = 20$ °С сжимается в компрессоре до $p_2 = 0,5$ МПа, подогревается в регенеративном подогревателе до температуры $t_3 = 1000$ °С и подается в камеру сгорания. Продукты сгорания с температурой $t_4 = 2600$ °С поступают в МГД-генератор, где расширяются изэнтропно до давления $p_5 = p_1$, а затем направляются через воздухоподогреватель в парогенератор ПТУ, охлаждаются до температуры $t_7 = 150$ °С и выбрасываются в атмосферу. Параметры ПТУ: начальное давление и температура пара на входе в турбину $p_8 = 30$ МПа; $t_8 = 570$ °С; давление и температура промежуточного перегрева $p_9 = 5$ МПа, $t_9 = 570$ °С; давление в конденсаторе $p_{10} = 0,004$ МПа. Определить термический к. п. д. установки, изобразить ее цикл в координатах T, s и представить принципиальную схему. Процессы расширения и сжатия считать изэнтропными. Рабочее тело газового цикла условно заменить воздухом.

26. Паротурбинная установка работает по циклу с промежуточным перегревом пара. Начальные параметры пара $p_1 = 9$ МПа, $t_1 = 535$ °С; параметры промежуточного перегрева $p_3 = 1$ МПа, $t_3 = 540$ °С; давление в конденсаторе $p_4 = 0,004$ МПа. Как изменится термический к. п. д. этого цикла, если к нему присоединить ртутный цикл, осуществляемый в интервале температур 330...500 °С. В образовавшемся при этом бинарном цикле подогрев воды и получение сухого насыщенного пара осуществляются в конденсаторе ртутного цикла, а перегрев пара — в дополнительных перегревателях. Принять, что ртутный цикл в области насыщенного пара соответствует циклу Карно (см. методические указания), в котором изменение энтропии составляет $\Delta s = 0,37$ кДж/(кг · К). Изобразить бинарный цикл в координатах T, s и представить принципиальную схему установки. Процесс расширения пара в турбине считать изэнтропным.

27. Паротурбинная установка работает по циклу с промежуточным перегревом пара. Начальные параметры пара $p_1 = 13$ МПа, $t_1 = 540$ °С; параметры промежуточного перегрева $p_3 = 3$ МПа, $t_3 = 540$ °С, давление в конденсаторе $p_4 = 0,004$ МПа. Как изменится термический к. п. д. этого цикла, если к нему присоединить цезиевый цикл, осуществляемый в интервале температур 350...800 °С. В образовавшемся при этом бинарном цикле подогрев воды и получение сухого насыщенного пара осуществляются в конденсаторе цезиевого цикла, а перегрев пара — в дополнительных перегревателях. Принять, что цезиевый цикл в области насыщенного пара соответствует циклу Карно (см. методические указания), в котором изменение энтропии составляет 0,52 кДж/(кг · К). Изобразить бинарный цикл в координатах T, s и представить принципиальную схему установки. Процесс расширения пара в турбине считать изэнтропным.

28. Энергетическая установка в зимнее время года работает по бинарному циклу, состоящему из цикла паротурбинной установки и низкотемпературной аммиачной подстройки. Начальные параметры пара ПТУ $p_1 = 3,5$ МПа, $t_1 = 435$ °С; давление в конденсаторе $p_2 = 0,004$ МПа. Сухой насыщенный пар аммиака, получаемый в конденсаторе ПТУ при температуре $t_5 = 25$ °С, расширяется в аммиачной турбине и направляется в конденсатор, где полностью конденсируется при $t_6 = -15$ °С, отдавая теплоту наружному воздуху. образо-

вавшийся конденсат насосом подается в испаритель-конденсатор, тем самым замыкая цикл. Определить термический к. п. д. бинарного цикла, изобразить цикл в координатах T, s и представить принципиальную схему установки. Процессы расширения в турбинах считать изотропными.

29. Начальные параметры ПТУ: $p_1 = 1$ МПа, $t_1 = 420$ °С; давление в конденсаторе $p_2 = 0,0065$ МПа. Как изменится термический к. п. д. этого цикла, если к нему присоединить хладоновую подстройку. В образовавшемся при этом бинарном цикле получение сухого насыщенного пара хладона R12 осуществляется в конденсаторе ПТУ при температуре $t_5 = 35$ °С. После расширения в хладоновой турбине пар направляется в конденсатор, где полностью конденсируется при $t_6 = 5$ °С, отдавая теплоту артезианской воде. Образовавшийся конденсат подается насосом в испаритель-конденсатор, тем самым замыкая цикл. Изобразить бинарный цикл в координатах T, s и представить принципиальную схему установки. Процессы расширения в турбинах считать изотропными.

30. Энергетическая установка в зимнее время года работает по бинарному циклу, состоящему из цикла ПТУ с промежуточным перегревом пара и низкотемпературной хладоновой подстройки. Начальные параметры водяного пара ПТУ: $p_1 = 9$ МПа, $t_1 = 535$ °С; параметры промежуточного перегрева $p_3 = 1$ МПа, $t_3 = 540$ °С, давление в конденсаторе $p_4 = 0,005$ МПа. Рабочим телом для низкотемпературной подстройки служит хладон R12, сухой насыщенный пар которого получается в конденсаторе ПТУ при температуре $t_7 = 30$ °С. После расширения в хладоновой турбине пар направляется в конденсатор, где полностью конденсируется при температуре $t_8 = -20$ °С, отдавая теплоту наружному воздуху. Образовавшийся конденсат насосом подается в испаритель-конденсатор, тем самым замыкая цикл. Определить термический к. п. д. бинарного цикла, изобразить цикл в координатах T, s и представить принципиальную схему установки. Процессы расширения в турбине считать изотропными.

31. Рассчитать цикл аммиачной парокомпрессионной холодильной установки с дроссельным вентилем, которая работает в области влажного пара в интервале температур от $t_1 = -30$ °С до $t_2 = 20$ °С. Определить параметры в характерных точках цикла, количество теплоты, отводимое в конденсаторе, холодильный коэффициент цикла и мощность, затрачиваемую на привод компрессора, если теоретическая холодильная мощность (холодопроизводительность) установки $Q_0 = 500$ кВт, а пар выходит из компрессора сухим насыщенным. Изобразить цикл в координатах T, s .

32. Рассчитать цикл парокомпрессионной теплонасосной установки с дроссельным вентилем, которая работает в области влажного пара хладона R12 в интервале температур от $t_1 = 10$ °С до $t_2 = 60$ °С. Определить параметры в характерных точках цикла, количество теплоты, подводимое в испарителе, коэффициент трансформации теплоты и мощность, затрачиваемую на привод компрессора, если теоретическая тепловая мощность (теплопроизводительность) установки $Q = 300$ кВт, а пар выходит из компрессора сухим насыщенным. Изобразить цикл в координатах T, s .

33. Сухой насыщенный пар аммиака сжимается в компрессоре холодильной установки и поступает в конденсатор, где конденсируется при температуре $t_3 = 10$ °С. Образовавшийся конденсат дросселируется и направляется в испаритель, где кипит при температуре $t_5 = -20$ °С. Определить параметры в характерных точках цикла, холодильную мощность установки и холодильный коэффициент

цикла, если теоретическая мощность, затрачиваемая на привод компрессора, $N = 80$ кВт. Изобразить цикл в координатах T, s .

34. Сухой насыщенный пар хладона R12 сжимается в компрессоре холодильной установки и поступает в конденсатор, где конденсируется при температуре $t_3 = 20$ °С. Образовавшийся конденсат дросселируется и направляется в испаритель, где кипит при температуре $t_5 = -25$ °С. Определить параметры в характерных точках цикла, холодильную мощность установки и холодильный коэффициент цикла, если теоретическая мощность, затрачиваемая на привод компрессора, $N = 600$ кВт. Изобразить цикл в координатах T, s .

35. Перегретый пар хладона R12 при давлении $p_1 = 0,1006$ МПа и $t_1 = -25$ °С сжимается в компрессоре холодильной установки до $p_2 = 0,3629$ МПа и полностью конденсируется в конденсаторе ($x_4 = 0$); конденсат дросселируется и направляется в испаритель, где кипит при давлении p_1 . Определить параметры в характерных точках цикла, холодильную мощность установки и холодильный коэффициент цикла, а также теоретическую мощность, затрачиваемую на привод компрессора, если в конденсаторе отводится 240 кВт теплоты. Изобразить цикл в координатах T, s .

36. Перегретый пар аммиака при давлении $p_1 = 0,1194$ МПа и $t_1 = -25$ °С сжимается в компрессоре холодильной установки до $p_2 = 0,8579$ МПа и полностью конденсируется в конденсаторе ($x_4 = 0$); конденсат дросселируется и направляется в испаритель, где кипит при давлении p_1 . Определить параметры в характерных точках цикла, холодильную мощность установки и холодильный коэффициент цикла, а также теоретическую мощность, затрачиваемую на привод компрессора, если в конденсаторе отводится 1,2 МВт теплоты. Изобразить цикл в координатах T, s .

37. Сухой насыщенный пар хладона R12 сжимается в компрессоре теплонасосной установки и поступает в конденсатор, где конденсируется при температуре $t_3 = 60$ °С. Затем конденсат переохлаждается до $t_5 = 40$ °С, дросселируется и направляется в испаритель, где кипит при температуре $t_6 = 30$ °С. Определить параметры в характерных точках цикла, коэффициент трансформации теплоты и мощность, затрачиваемую на привод компрессора, если теоретическая тепловая мощность установки $Q = 800$ кВт. Изобразить цикл в координатах T, s . Значение средней изобарной теплоемкости жидкого хладона R12 принять равным 1,06 кДж/(кг · К).

38. Сухой насыщенный пар аммиака сжимается в компрессоре теплонасосной установки и поступает в конденсатор, где конденсируется при температуре $t_3 = 50$ °С. Затем конденсат переохлаждается до $t_5 = 30$ °С, дросселируется и направляется в испаритель, где кипит при температуре $t_6 = 20$ °С. Определить параметры в характерных точках цикла, коэффициент трансформации теплоты и мощность, затрачиваемую на привод компрессора, если теоретическая тепловая мощность установки $Q = 450$ кВт. Изобразить цикл в координатах T, s . Значение средней изобарной теплоемкости жидкого аммиака принять равным 4,95 кДж/(кг · К).

39. Рассчитать цикл воздушной холодильной установки, которая работает в интервале температур $t_1 = -20$ °С до $t_3 = 10$ °С. Начальное давление воздуха $p_1 = 0,1$ МПа, давление на выходе из компрессора $p_2 = 0,45$ МПа. Определить параметры в характерных точках цикла, холодильную мощность установки и холодильный коэффициент цикла, если теоретическая мощность, затрачиваемая на привод компрессора, $N = 180$ кВт. Изобразить цикл в координатах p, v и T, s .

40. Рассчитать цикл воздушной теплонасосной установки, которая работает в интервале температур от $t_1 = 15^\circ\text{C}$ до $t_3 = 60^\circ\text{C}$. Начальное давление воздуха $p_1 = 0,1$ МПа, давление на выходе из компрессора $p_2 = 0,35$ МПа. Определить параметры в характерных точках цикла, тепловую мощность установки и коэффициент трансформации теплоты, если теоретическая мощность, затрачиваемая на привод компрессора, $N = 90$ кВт. Изобразить цикл в координатах p , v и T , s .

41. Используя таблицу стандартных теплот образования и таблицы зависимости теплоемкости веществ от температуры (см. табл. 2 и 8 приложения), определить тепловой эффект Q_p реакции $\text{CO} + 1/2\text{O}_2 = \text{CO}_2$ при стандартной температуре $t_1 = 25^\circ\text{C}$ и при температуре $t_2 = 500^\circ\text{C}$.

42. Используя таблицу стандартных теплот образования веществ (см. табл. 8 приложения), найти тепловые эффекты Q_p^{25} и Q_v^{25} для реакции $\text{NH}_3 + \text{HCl} = \text{NH}_4\text{Cl}(т) + Q$. Принять, что газообразные компоненты реакции являются идеальными газами.

43. Используя таблицу стандартных теплот образования веществ (см. табл. 8 приложения), найти тепловые эффекты Q_p^{25} и Q_v^{25} для реакции полного сгорания пропана $\text{C}_3\text{H}_8 + 5\text{O}_2 = 3\text{CO}_2 + 4\text{H}_2\text{O} + Q$. Принять, что вода в продуктах сгорания находится в жидком состоянии, а остальные компоненты реакции — идеальные газы.

44. Пользуясь таблицей стандартных теплот образования веществ (см. табл. 8 приложения), найти тепловые эффекты Q_p^{25} и Q_v^{25} реакции полного сгорания метана $\text{CH}_4 + 2\text{O}_2 = \text{CO}_2 + 2\text{H}_2\text{O} + Q$. Принять, что вода в продуктах сгорания находится в жидком состоянии, а остальные компоненты реакции — идеальные газы.

45. При температуре $t_1 = 100^\circ\text{C}$ тепловой эффект реакции $\text{H}_2\text{O} + \text{CO} = \text{H}_2 + \text{CO}_2$ составляет $Q_p^{100} = -41\,500$ кДж/кмоль. Определить тепловые эффекты Q_p и Q_v этой реакции при температуре $t_2 = 500^\circ\text{C}$. Необходимые для решения задачи значения теплоемкостей взять из табл. 2 приложения. Считать все компоненты реакции идеальными газами.

46. Считая все компоненты реакции $\text{H}_2 + \text{O}_2 \rightleftharpoons 2\text{OH}$ идеальными газами, определить кажущуюся молекулярную массу равновесной смеси при $T = 3000$ К, если для реакции было взято по 2 кмоль H_2 и O_2 . При решении задачи использовать табл. 9 приложения.

47. Диссоциация паров воды определяется уравнением реакции $2\text{H}_2\text{O} \rightleftharpoons 2\text{H}_2 + \text{O}_2$. Определить объемный состав смеси веществ при $T = 2500$ К и $p = 0,1$ МПа, если в начальном состоянии имелось 2 моля воды. При решении задачи использовать табл. 9 приложения и считать все компоненты смеси идеальными газами.

48. Начальный равновесный состав смеси идеальных газов, реагирующих по уравнению $\text{CO} + \text{H}_2\text{O} \rightleftharpoons \text{CO}_2 + \text{H}_2$, задан объемными долями: $r_{\text{CO}}^{\text{нач}} = 0,2$; $r_{\text{H}_2\text{O}}^{\text{нач}} = 0,04$; $r_{\text{CO}_2}^{\text{нач}} = 0,02$; $r_{\text{H}_2}^{\text{нач}} = 0,06$ и $r_{\text{N}_2}^{\text{нач}} = 0,68$. Вследствие изменения температуры равновесный состав изменился и константа равновесия стала равной $K_c = 1,84$. Определить температуру начального равновесного состояния, состав и температуру смеси во втором равновесном состоянии. При решении использовать табл. 9 приложения.

49. Определить степень диссоциации диоксида углерода при давлении $p = 0,01$ МПа и температурах $T_1 = 2000$ К и $T_2 = 2500$ К, если реакция диссоциации соответствует уравнению $2\text{CO}_2 \rightleftharpoons 2\text{CO} + \text{O}_2$. В какую сторону смещается

реакция с ростом температуры? При решении задачи считать все вещества идеальными газами и использовать табл. 9 приложения.

50. Определить степень диссоциации паров воды при давлении $p = 0,1$ МПа и температурах $T_1 = 2500$ К и $T_2 = 3000$ К, если реакция соответствует уравнению $2\text{H}_2\text{O} \rightleftharpoons 2\text{OH} + \text{H}_2$. В какую сторону смещается реакция с ростом температуры? При решении задачи использовать табл. 9 приложения.

ВОПРОСЫ

1. Изобразите в координатах p , v ; T , s и h , s цикл конденсационной ПТУ со сверхкритическими параметрами водяного пара. Поясните, почему в этом случае особенно эффективно использование промежуточного перегрева пара.

2. ПТУ работают по циклу Ренкина и Карно в области влажного насыщенного пара. Сопоставьте значения термического и внутреннего абсолютного к. п. д. этих циклов в одном и том же интервале температур. Какие выводы можно сделать на основе этого сопоставления? Приведите конкретный численный пример и изобразите эти циклы в координатах T , s и h , s .

3. Перечислите способы уменьшения влажности пара на выходе из турбины, которые применяются в настоящее время на конденсационных электрических станциях. Изобразите соответствующие циклы в координатах T , s и h , s .

4. Изобразите циклы ПТУ с предельной регенерацией, осуществляемые с применением насыщенного и перегретого водяного пара в координатах T , s и h , s . Покажите, в каком случае термический к. п. д. регенеративного цикла будет совпадать с к. п. д. цикла Карно (в том же интервале температур), а в каком — будет меньше? Приведите конкретный численный пример.

5. Покажите графически, как зависит термический к. п. д. цикла ПТУ от давления пара перед турбиной. Какими эффектами сопровождается повышение давления? Приведите конкретный численный пример и изобразите соответствующие циклы в координатах T , s и h , s .

6. Покажите графически, как зависит термический к. п. д. цикла ПТУ от температуры пара перед турбиной. Какими эффектами сопровождается повышение температуры? Чем определяется ее предельное значение? Приведите конкретный численный пример и изобразите соответствующие циклы в координатах T , s и h , s .

7. Покажите графически, как зависит термический к. п. д. цикла конденсационной ПТУ от давления пара в конденсаторе. Какими эффектами сопровождается понижение этого давления? Чем определяется его предельное значение? Приведите конкретный численный пример и изобразите соответствующие циклы в координатах T , s и h , s .

8. Определите эксергетический к. п. д. парогенератора, в котором получается сухой насыщенный водяной пар при температуре 300°C . К. п. д. парогенератора (энергетический) принять равным 0,9, а температуру воды на входе — равной температуре кипения. Температура окружающей среды $t_0 = 15^\circ\text{C}$. Объясните, почему значение эксергетического к. п. д. парогенератора будет значительно меньше 0,9.

9. В конденсаторе паротурбинной установки влажный водяной пар со степенью сухости 0,9 полностью конденсируется при температуре 30°C . Найдите отдаваемую паром теплоту и потерю эксергии. Объясните, почему первая из этих

величин значительно больше второй. Изобразите процесс конденсации в координатах T , s и h , s .

10. Водяной пар при давлении $p_1 = 10$ МПа и температуре $t_1 = 500$ °С расширяется в турбине до давления $p_2 = 1$ МПа. Внутренний относительный к. п. д. турбины $\eta_{0t} = 0,85$, температура окружающей среды $t_0 = 15$ °С. Найдите потерю работы за счет трения и потерю эксергии. Объясните, почему первая из этих величин больше второй. Изобразите процесс расширения пара в турбине в координатах T , s и h , s .

11. Покажите графически, в каком случае термический к. п. д. цикла ПТУ при использовании промежуточного перегрева будет возрастать, а в каком — убывать. Приведите конкретные численные примеры и изобразите соответствующие циклы в координатах T , s и h , s .

12. В качестве рабочего тела в ПТУ, работающей по циклу Ренкина в области влажного пара, могут использоваться два вещества. У первого из них изобарная теплоемкость в жидком состоянии $c_{рж} = 4$ кДж/(кг · К), у второго $c_{рж} = 1$ кДж/(кг · К). Все точки, за исключением точки кипения жидкости в котле, у обоих циклов совпадают. В каком случае термический к. п. д. цикла будет выше? Изобразите циклы в координатах T , s .

13. Ртутно-водяной бинарный цикл осуществляется для обоих рабочих тел в области их влажного насыщенного пара. Как изменится термический к. п. д. этого цикла, если часть теплоты подводить в котле непосредственно к воде, минуя ртутную надстройку? Приведите принципиальную схему установки и изобразите цикл в координатах T , s .

14. Какие требования предъявляются к свойствам рабочих тел ПТУ с термодинамической точки зрения? Проиллюстрируйте каждое из этих требований изображением цикла в соответствующей системе координат.

15. От каких параметров зависит работа, затрачиваемая на привод питательного насоса конденсационной ПТУ? В каких случаях этой работой можно пренебречь при вычислении термического к. п. д. установки? Проиллюстрируйте ответ изображением цикла Ренкина в координатах p , v ; T , s и h , s при докритических и сверхкритических параметрах водяного пара перед турбиной.

16. Как влияет переохлаждение хладагента после конденсатора на коэффициент трансформации теплоты (отопительный коэффициент) идеальной парокомпрессионной теплонасосной установки. Приведите конкретный численный пример и изобразите цикл этой установки в координатах T , s и h , s .

17. Постройте зависимость холодильного коэффициента воздушной холодильной установки от степени повышения давления воздуха в компрессоре ($p_2/p_1 = 2 \dots 7$). Сжатие воздуха в компрессоре и его расширение в детандере следует считать изэнтропными процессами. Изобразите цикл в координатах p , v и T , s .

18. Какие требования предъявляются к свойствам хладагентов парокомпрессионных холодильных установок с термодинамической точки зрения? Проиллюстрируйте каждое из этих требований изображением циклов в соответствующей системе координат.

19. Какие преимущества и недостатки имеет парокомпрессионная холодильная установка с дроссельным вентилем по сравнению со своим аналогом, работающим по циклу с адиабатным расширением? Какая из них обычно исполь-

зуется в технике? Изобразите циклы этих установок в координатах T , s и h , s (сжатие пара в компрессоре следует считать изэнтропным).

20. Сопоставьте идеальные циклы парокомпрессионной и воздушной холодильных установок. Какие преимущества и недостатки имеет каждая из них? Приведите конкретные примеры значений холодильного коэффициента этих установок в сопоставимых условиях. Изобразите их циклы в координатах T , s .

ЛАБОРАТОРНЫЕ РАБОТЫ

1. Определение изобарной теплоемкости воздуха при атмосферном давлении.
2. Исследование изотермического сжатия диоксида углерода.
3. Изохорное нагревание воды и водяного пара.
4. Адиабатное дросселирование водяного пара.
5. Определение степени сухости водяного пара.
6. Определение параметров влажного воздуха.
7. Исследование процесса адиабатного истечения воздуха через сужающееся сопло.
8. Влияние начального и конечного давлений на характеристики цикла Ренкина с насыщенным паром (с использованием ЭВМ).
9. Исследование циклов ГТУ (с использованием ЭВМ).
10. Исследование цикла парокомпрессионной теплонасосной установки (с использованием ЭВМ).
11. Исследование работы полупроводникового холодильника.

ЗАДАНИЯ ДЛЯ ПРОГРАММИРОВАННОГО КОНТРОЛЯ

Представленные ниже вопросы и задачи являются типовыми при проведении программированного контроля знаний студентов-заочников в период экзаменационной сессии. При этом число вопросов в контрольных карточках и число правильных ответов, необходимых для получения зачета, варьируются в зависимости от того, какими пособиями разрешается пользоваться.

Значительная часть вопросов посвящена применению математического аппарата термодинамики и некоторым другим темам, которые обычно излагаются на первых обзорных лекциях. В связи с этим целесообразно проведение рубежного контроля, который позволяет контролировать степень усвоения теоретической части курса.

Задания для программированного контроля содержат не только теоретические вопросы, но и небольшие задачи, не требующие громоздких вычислений, но для решения которых необходима определенная глубина усвоения теоретического материала. Каждый контрольный вопрос сопровождается четырьмя ответами, из которых необходимо выбрать наиболее приемлемый.

Вопросы и задачи могут использоваться студентами для самоконтроля.

ВОПРОСЫ И ЗАДАЧИ

1. По изменению какой из приведенных ниже величин можно судить о том, подводится теплота к рабочему телу или отводится от него?

- | | |
|----------------|--------------------|
| 1. Энтальпия. | 3. Энтропия. |
| 2. Температура | 4. Удельный объем. |

2. Какая термодинамическая система называется изолированной?

1. Система не обменивается с окружающей средой механической работой.
2. Система не обменивается с окружающей средой любыми видами энергии.
3. Система не обменивается с окружающей средой теплотой и механической работой.
4. Система не обменивается с окружающей средой химической энергией и теплотой.

3. По изменению какой из приведенных ниже величин можно определить знак работы?

- | | |
|------------------------|--------------------|
| 1. Внутренняя энергия. | 3. Температура. |
| 2. Энтропия. | 4. Удельный объем. |

4. Какие из приведенных ниже выражений для dz являются полными дифференциалами?

- | | |
|------------------|--------------------------|
| 1. $dz = T ds.$ | 3. $dz = c_v dT - p dv.$ |
| 2. $dz = -p dv.$ | 4. $dz = T ds - p dv.$ |
5. При каком из приведенных ниже соотношений между внешним $p_{\text{внеш}}$ и внутренним $p_{\text{внут}}$ давлениями механическое взаимодействие системы с окружающей средой будет равновесным?

- | | |
|---|---|
| 1. $ p_{\text{внеш}} - p_{\text{внут}} /p_{\text{внут}} \approx 1.$ | 3. $ p_{\text{внеш}} - p_{\text{внут}} /p_{\text{внут}} \ll 1.$ |
| 2. $ p_{\text{внеш}} - p_{\text{внут}} /p_{\text{внут}} > 1.$ | 4. $ p_{\text{внеш}} - p_{\text{внут}} /p_{\text{внут}} \gg 1.$ |

6. Какое из приведенных ниже соотношений определяет содержание второго начала термодинамики?

- | | |
|-----------------|--------------------|
| 1. $ds = dq/T.$ | 3. $ds \geq dq/T.$ |
| 2. $ds < dq/T.$ | 4. $ds \leq dq/T.$ |

7. Какими из приведенных ниже соотношений определяется абсолютное давление? (B_0 — барометрическое давление; $p_{\text{изб}}$ — избыточное давление; H_0 — разрежение.)

- | | |
|---------------------------|----------------------------|
| 1. $B_0 + p_{\text{изб}}$ | 3. $B_0 - p_{\text{изб}}$ |
| 2. $H_0 + p_{\text{изб}}$ | 4. $p_{\text{изб}} - B_0.$ |

8. В каком из процессов теплота равна изменению энтальпии?

- | | |
|----------------|--------------------|
| 1. Изохорный. | 3. Изотермический. |
| 2. Адиабатный. | 4. Изобарный. |

9. Масса идеального газа при неизменных температуре и плотности увеличивается вдвое. Что при этом произойдет с давлением?

- | | |
|-------------------------|----------------------------------|
| 1. Увеличится в 2 раза. | 3. Уменьшится в $\sqrt{2}$ раза. |
| 2. Уменьшится в 2 раза. | 4. Н изменится. |

10. Выберите наиболее полное определение понятия «идеальный газ».

1. Состояние реального вещества, в котором можно пренебречь размерами молекул.

2. Состояние реального вещества, в котором можно пренебречь силами взаимодействия между молекулами.

3. Состояние реального вещества, в котором не существенно влияние вращательного, колебательного и поступательного движения молекул.

4. Состояние реального вещества, в котором можно пренебречь размерами молекул и силами взаимодействия между ними.

11. Какое из приведенных ниже соотношений отвечает закону Бойля — Мариотта?

- | | |
|-------------------------|-------------------------|
| 1. $p_1/p_2 = T_1/T_2.$ | 3. $p_1/p_2 = v_2/v_1.$ |
| 2. $p_1/p_2 = v_1/v_2.$ | 4. $v_1/v_2 = T_1/T_2.$ |

12. Вычислите значение производной $(\partial T/\partial s)_p$ ($\text{с}^2 \cdot \text{К}^2/\text{м}^2$) для идеального газа, если известно, что $(\partial T/\partial s)_v = 0,5 \text{ с}^2 \cdot \text{К}^2/\text{м}^2$, $\mu_{Cp} = 28 \text{ кДж}/(\text{кмоль} \cdot \text{К})$.

- | | | | |
|-----------|----------|-----------|---------|
| 1. 0,211. | 2. 0,352 | 3. 0,711. | 4. 0,5. |
|-----------|----------|-----------|---------|

13. Найдите расстояние по горизонтали Δs между изохорами $v_1 = \text{const}$ и $v_2 = \text{const}$ в Ts -диаграмме идеального газа.

- | | |
|--------------------------------------|--------------------------------------|
| 1. $\Delta s = R \ln(v_2/v_1).$ | 3. $\Delta s = c_{vm} \ln(v_2/v_1).$ |
| 2. $\Delta s = c_{vm} \ln(v_1/v_2).$ | 4. $\Delta s = c_{pm} \ln(v_1/v_2).$ |

14. При каком давлении (МПа) произойдет самовоспламенение смеси воздуха и бензина при адиабатном сжатии, если в начальный момент давление и температура соответственно равны $p_1 = 0,1 \text{ МПа}$, $t_1 = 135^\circ\text{С}$. Температура воспламенения смеси $t_2 = 550^\circ\text{С}$. Показатель адиабаты принять равным 1,385.

- | | | | |
|----------|----------|---------|----------|
| 1. 15,7. | 2. 1,25. | 3. 0,7. | 4. 0,637 |
|----------|----------|---------|----------|

15. Идеальный газ, занимающий объем $0,05 \text{ м}^3$, при давлении $0,1 \text{ МПа}$ сжимается изотермически до половины объема. Определите количество теплоты (кДж) процесса.

1. 3,47 2. — 3,47. 3. — 34,7. 4. — 1,73.

16. В закрытом сосуде находится идеальный газ при избыточном давлении $p_1 = 0,02 \text{ МПа}$ и температуре 400°C . До какой температуры ($^\circ\text{C}$) нужно его охладить, чтобы в сосуде установилось разрежение $p_2 = 0,03 \text{ МПа}$. Барометрическое давление $0,1 \text{ МПа}$.

1. 233. 2. 176. 3. 120. 4. 267.

17. Воздух с начальной температурой 40°C , находящийся в цилиндре диаметром $0,4 \text{ м}$ и занимающий объем $0,1 \text{ м}^3$, нагревается до температуры 120°C . Определить перемещение (м) поршня, считая нагрузку на него постоянной.

1. 1,59. 2. 0,21. 3. 0,11. 4. 0,85.

18. В каком из процессов с идеальным газом теплоемкость бесконечно велика?

1. Адиабатный процесс. 3. Политропный процесс, $n > k$.
2. Изотермический процесс. 4. Политропный процесс, $n < k$.

19. Нагревается или охлаждается идеальный газ в процессе расширения по закону $v \sim p^{-0,5}$? Положительна или отрицательна теплоемкость c в этом процессе?

1. Нагревается, $c > 0$. 3. Нагревается, $c < 0$.
2. Охлаждается, $c < 0$. 4. Охлаждается, $c > 0$.

20. К идеальному газу в политропном процессе с показателем $n = 2,2$ подводится теплота. Найти правильную комбинацию неравенств (l — работа процесса; Δu — изменение внутренней энергии).

1. $l > 0$; $\Delta u < 0$. 3. $l < 0$; $\Delta u < 0$.
2. $l > 0$; $\Delta u > 0$ 4. $l < 0$; $\Delta u > 0$.

21. Идеальный газ расширяется по политропе с показателем $n = 0,7$. Найти правильную комбинацию неравенств (q — теплота процесса; Δu — изменение внутренней энергии).

1. $q > 0$; $\Delta u > 0$. 3. $q > 0$; $\Delta u < 0$.
2. $q < 0$; $\Delta u < 0$. 4. $q < 0$; $\Delta u > 0$.

22. Как будет изменяться показатель адиабаты идеального газа с ростом температуры (теплоемкости c_p и c_v зависят от температуры)?

1. Не изменяется. 3. Возрастает.
2. Убывает. 4. Однозначный ответ невозможен.

23. Начальные и конечные температуры идеального газа в изобарном и адиабатном (изоэнтропном) процессах одинаковы. Чему равна абсолютная величина отношения работ в этих процессах $|l_p/l_s|$?

1. $|l_p/l_s| = k$. 3. $|l_p/l_s| = k - 1$.
2. $|l_p/l_s| = 1/k$. 4. $|l_p/l_s| = 1/(k - 1)$.

24. Какое из представленных неравенств справедливо для идеального газа?

1. $0 < c_p < c_v$. 3. $c_v < 0 < c_p$.
2. $c_p > c_v > 0$. 4. $c_p < c_v < 0$.

25. Объемная доля кислорода в воздухе 21% . Найти массовую долю (%) в нем азота.

1. 79. 2. 77. 3. 81. 4. 76.

26. Каким законом устанавливается связь между парциальными давлениями компонентов смеси идеальных газов и ее общим давлением?

1. Авогадро. 3. Дальтона.
2. Шарля. 4. Лей-Люссака.

27. Газовая постоянная смеси водорода H_2 и азота N_2 равна $900 \text{ Дж}/(\text{кг} \cdot \text{К})$. Определить массовую долю водорода в смеси.

1. 0,844. 2. 0,233. 3. 0,156. 4. 0,767.

28. Какое из приведенных ниже соотношений является правильным (u — внутренняя энергия; f — свободная энергия)?

1. $c_v = T \left(\frac{\partial^2 u}{\partial T^2} \right)_v$. 3. $c_v = T \left(\frac{\partial^2 f}{\partial T^2} \right)_v$.
2. $c_v = -T \left(\frac{\partial^2 u}{\partial T^2} \right)_v$. 4. $c_v = -T \left(\frac{\partial^2 f}{\partial T^2} \right)_v$.

29. Необходимо экспериментально определить зависимость энтропии от объема в изотермическом процессе. Каким образом это можно осуществить, если непосредственно измерение энтропии (или ее приращения) невозможно?

1. Измерять изменение давления с температурой в изохорном процессе.
2. Измерять изменение давления с температурой в адиабатном процессе.
3. Измерять изменение объема с давлением в изотермическом процессе.
4. Измерять изменение объема с температурой в изобарном процессе.

30. Какие из приведенных ниже частных производных равны между собой (u — внутренняя энергия; h — энтальпия)?

1. $\left(\frac{\partial u}{\partial s} \right)_v$ и $\left(\frac{\partial h}{\partial T} \right)_v$. 3. $\left(\frac{\partial u}{\partial s} \right)_v$ и $\left(\frac{\partial h}{\partial s} \right)_p$.
2. $\left(\frac{\partial u}{\partial T} \right)_v$ и $\left(\frac{\partial h}{\partial p} \right)_T$. 4. $\left(\frac{\partial u}{\partial s} \right)_p$ и $\left(\frac{\partial h}{\partial s} \right)_v$.

31. Вычислите адиабатную сжимаемость $(\partial v / \partial p)_T$, $[\text{м}^5/(\text{кг} \cdot \text{Н})]$ идеального газа, если в рассматриваемом состоянии его изотермическая сжимаемость $(\partial v / \partial p)_T = -8 \cdot 10^{-6} \text{ м}^5/(\text{кг} \cdot \text{Н})$, а молярная изобарная теплоемкость $\mu c_p = 28 \text{ кДж}/(\text{кмоль} \cdot \text{К})$.

1. $-1,14 \cdot 10^{-5}$. 3. $5,63 \cdot 10^{-6}$.
2. $1,14 \cdot 10^{-5}$. 4. $-5,63 \cdot 10^{-6}$.

32. При каких условиях сопряжения системы с окружающей средой свободная энергия будет характеристической функцией?

1. $s = \text{const}$; $p = \text{const}$. 3. $T = \text{const}$; $v = \text{const}$.
2. $s = \text{const}$; $v = \text{const}$. 4. $T = \text{const}$; $p = \text{const}$.

33. Вещество подчиняется уравнению состояния $p(v - b) = RT$ ($b = \text{const}$). Укажите правильные соотношения для внутренней энергии (u) и энтальпии (h) такого вещества.

1. $\left(\frac{\partial u}{\partial v} \right)_T = 0$; $\left(\frac{\partial h}{\partial p} \right)_T = 0$. 3. $\left(\frac{\partial u}{\partial v} \right)_T \neq 0$; $\left(\frac{\partial h}{\partial p} \right)_T \neq 0$.
2. $\left(\frac{\partial u}{\partial v} \right)_T \neq 0$; $\left(\frac{\partial h}{\partial p} \right)_T = 0$. 4. $\left(\frac{\partial u}{\partial v} \right)_T = 0$; $\left(\frac{\partial h}{\partial p} \right)_T \neq 0$.

34. Найдите производную $(\partial u / \partial v)_T$ для вещества, которое подчиняется уравнению Ван-дер-Ваальса $(p + a/v^2)(v - b) = RT$.

$$1. \left(\frac{\partial u}{\partial v} \right)_T = \frac{a}{v^2}.$$

$$2. \left(\frac{\partial u}{\partial v} \right)_T = \frac{RT}{v-b}.$$

$$3. \left(\frac{\partial u}{\partial v} \right)_T = 0.$$

$$4. \left(\frac{\partial u}{\partial v} \right)_T = -\frac{a}{v^2}.$$

35. Зависит ли от объема и давления изохорная теплоемкость вещества, которое подчиняется уравнению состояния Ван-дер-Ваальса?

1. Зависит от объема, не зависит от давления.
2. Не зависит от объема и давления.
3. Зависит от объема и давления.
4. Не зависит от объема, зависит от давления.

36. Укажите правильные соотношения для изохорной (c_v) и изобарной (c_p) теплоемкостей идеального газа.

$$1. \left(\frac{\partial c_v}{\partial T} \right)_v = 0; \left(\frac{\partial c_p}{\partial T} \right)_p \neq 0.$$

$$3. \left(\frac{\partial c_v}{\partial v} \right)_T \neq 0; \left(\frac{\partial c_p}{\partial p} \right)_T \neq 0.$$

$$2. \left(\frac{\partial c_v}{\partial v} \right)_T = 0; \left(\frac{\partial c_p}{\partial p} \right)_T = 0.$$

$$4. \left(\frac{\partial c_v}{\partial v} \right)_T = 0; \left(\frac{\partial c_p}{\partial v} \right)_T \neq 0.$$

37. Какое из приведенных ниже соотношений справедливо для энтальпии идеального газа?

$$1. \left(\frac{\partial h}{\partial p} \right)_T \neq 0.$$

$$3. \left(\frac{\partial h}{\partial T} \right)_p = 0.$$

$$2. \left(\frac{\partial h}{\partial v} \right)_p = 0.$$

$$4. \left(\frac{\partial h}{\partial T} \right)_v = 0.$$

38. Какими свойствами обладает внутренняя энергия идеального газа?

1. Зависит от давления, не зависит от объема.
2. Зависит от объема и температуры.
3. Не зависит от давления и температуры.
4. Не зависит от давления и объема.

39. Определите разность $c_p - c_v$ изобарной и изохорной теплоемкостей для вещества, которое подчиняется уравнению состояния $p(v-b) = RT$ ($b = \text{const}$).

$$1. pv/T. \quad 2. R. \quad 3. pb/T. \quad 4. bR/v.$$

40. Какая из приведенных ниже комбинаций неравенств будет правильной?

$$1. \left(\frac{\partial T}{\partial s} \right)_v > 0; \left(\frac{\partial p}{\partial v} \right)_s < 0.$$

$$3. \left(\frac{\partial T}{\partial s} \right)_v < 0; \left(\frac{\partial p}{\partial v} \right)_s > 0.$$

$$2. \left(\frac{\partial T}{\partial s} \right)_v > 0; \left(\frac{\partial p}{\partial v} \right)_s > 0.$$

$$4. \left(\frac{\partial T}{\partial s} \right)_v < 0; \left(\frac{\partial p}{\partial v} \right)_s < 0.$$

41. Вычислите значение мольной энтропии вещества $[\text{кДж}/(\text{кмоль} \cdot \text{К})]$, которое подчиняется уравнению состояния $p(v-b) = RT$ ($b = \text{const}$), в точке $p_1 = 10 \text{ МПа}$, $t_1 = 0^\circ \text{C}$. За начало отсчета принять значение энтропии в точке $p_0 = 0,1 \text{ МПа}$, $t_0 = 0^\circ \text{C}$.

$$1. 38,3. \quad 2. -38,3. \quad 3. -4,61. \quad 4. 4,61.$$

42. Определите термическую упругость $(\partial p / \partial T)_v$ вещества, которое подчиняется уравнению состояния $p(v-b) = RT$ ($b = \text{const}$).

$$1. R/v. \quad 2. R/(v-b). \quad 3. R/b. \quad 4. pv/(bT).$$

43. Где расположена критическая точка в фазовой h - s -диаграмме?

1. На пограничной кривой в точке максимума энтальпии.
2. На левой ветви пограничной кривой.
3. На правой ветви пограничной кривой.

4. На пограничной кривой в точке минимума энтальпии.

44. Как изменяется температура при дросселировании газа, подчиняющегося уравнению состояния $p(v-b) = RT$ (b — положительная константа).

1. В некоторых случаях возрастает, в некоторых — убывает.
2. Всегда возрастает.
3. Всегда убывает.
4. Не изменяется в любом случае.

45. Сухой насыщенный водяной пар с давлением 1 МПа вытекает через сужающееся сопло в среду с давлением 0,1 МПа. Как изменится скорость истечения и массовый расход пара, если сужающееся сопло заменить соплом Лаваля? Площади выходного сечения сужающегося сопла и минимального сечения сопла Лаваля одинаковы.

1. Скорость истечения увеличится, расход пара уменьшится.
2. Скорость истечения и расход пара не изменятся.
3. Скорость истечения и расход пара увеличатся.
4. Скорость истечения увеличится, расход пара не изменится.

46. Как изменяются удельный объем и энтропия идеального газа при дросселировании?

1. Удельный объем увеличивается, энтропия не изменяется.
2. Удельный объем уменьшается, энтропия увеличивается.
3. Удельный объем и энтропия увеличиваются.
4. Удельный объем и энтропия уменьшаются.

47. При каком процессе сжатия работа, затрачиваемая на привод компрессора, будет иметь наименьшее значение?

1. При адиабатном сжатии.
2. При сжатии по политропе, $k > n > 1$.
3. При сжатии по политропе, $n > k$.
4. При изотермическом сжатии.

48. Как изменяется работа, затрачиваемая на привод многоступенчатого поршневого компрессора, с увеличением (при прочих равных условиях) числа ступеней сжатия?

1. Увеличивается.
2. Уменьшается.
3. Однозначный ответ невозможен.
4. Не изменяется.

49. Выберите определение понятия «прямой цикл».

1. Цикл, в котором линия расширения расположена выше линии сжатия.
2. Цикл, в котором линия расширения расположена ниже линии сжатия.
3. Цикл, в котором линии расширения и сжатия совпадают.
4. Цикл, в котором линия подвода теплоты расположена ниже линии отвода теплоты.

50. Какое влияние оказывает термическая неравновесность на процесс преобразования теплоты в работу в цикле теплового двигателя?

1. Термический к. п. д. цикла уменьшается; суммарная энтропия системы, состоящей из рабочего тела, источника и приемника теплоты, возрастает.
2. Термический к. п. д. уменьшается, суммарная энтропия системы убывает.
3. Термический к. п. д. и суммарная энтропия системы убывают.
4. Термический к. п. д. и суммарная энтропия системы возрастают.

51. Какие из приведенных значений термического коэффициента полезного действия η_T (1. 0,36; 2. 0,38; 3. 0,42; 4. 0,46) могут быть реализованы в цикле теплового двигателя, работающего в интервале температур 20...220 °С?

1. 1, 2, 3, 4.
2. 1, 2, 3.
3. 1, 2.
4. 1.

52. Графическим способом сравнить термические к. п. д. циклов ДВС с изохорным (η_T^v) и изобарным (η_T^p) подводом теплоты, если степени сжатия и максимальные температуры в циклах одинаковы.

1. $\eta_T^v > \eta_T^p$.
2. $\eta_T^v < \eta_T^p$.
3. $\eta_T^v = \eta_T^p$.
4. Однозначный ответ невозможен.

53. Графическим способом сравнить термические к. п. д. циклов ДВС со смешанным ($\eta_T^{v,p}$), изохорным (η_T^v) и изобарным (η_T^p) подводом теплоты, если степени сжатия и отведенные количества теплоты во всех циклах одинаковы.

1. $\eta_T^v > \eta_T^{v,p} > \eta_T^p$.
2. $\eta_T^p > \eta_T^{v,p} > \eta_T^v$.
3. $\eta_T^v > \eta_T^p > \eta_T^{v,p}$.
4. $\eta_T^p > \eta_T^v > \eta_T^{v,p}$.

54. Как зависит термический к. п. д. цикла ДВС со смешанным подводом теплоты от степени сжатия?

1. Увеличивается.
2. Уменьшается.
3. Не изменяется.
4. Однозначный ответ невозможен.

55. Ртутно-водяной бинарный цикл осуществляется для обоих рабочих тел в области их влажного пара. Как изменится термический к. п. д. этого цикла, если часть теплоты подводить в котле непосредственно к воде, минуя ртутную надстройку?

1. Не изменится.
2. Увеличится.
3. Уменьшится.
4. Однозначный ответ невозможен.

56. Как изменяются термический к. п. д. цикла Ренкина и влажность пара на выходе их турбины с ростом давления пара перед турбиной (при прочих равных условиях)?

1. К. п. д. цикла увеличивается, влажность пара уменьшается.
2. К. п. д. цикла и влажность пара увеличиваются.
3. К. п. д. цикла и влажность пара уменьшаются.
4. К. п. д. цикла уменьшается, влажность пара увеличивается.

57. Какие из приведенных ниже соотношений будут правильными (η_T^{nn} — термический к. п. д. цикла ПТУ с предельной регенерацией, осуществляемого с применением перегретого пара; η_T^n — то же, с применением влажного насыщенного пара; η_T^k — термический к. п. д. цикла Карно в том же интервале температур)?

1. $\eta_T^{nn} = \eta_T^k$; $\eta_T^n = \eta_T^k$.
2. $\eta_T^{nn} < \eta_T^k$; $\eta_T^n = \eta_T^k$.
3. $\eta_T^{nn} < \eta_T^k$; $\eta_T^n < \eta_T^k$.
4. $\eta_T^{nn} = \eta_T^k$; $\eta_T^n < \eta_T^k$.

58. Может ли холодильный коэффициент обратного цикла Карно быть бесконечно большим? Если да, то будет ли холодильная машина, работающая по этому циклу, выполнять свое назначение?

1. Не может.
2. Может; машина не будет выполнять свое назначение.
3. Может; машина будет выполнять свое назначение.
4. Однозначный ответ невозможен.

59. Как влияет переохлаждение хладагента после конденсатора на коэффициент трансформации теплоты (отопительный коэффициент) идеальной парокомпрессионной теплонасосной установки?

1. Коэффициент трансформации уменьшается.
2. Коэффициент трансформации увеличивается.
3. Однозначный ответ невозможен.
4. Коэффициент трансформации не изменяется.

60. Как зависит холодильный коэффициент идеальной воздушной холодильной установки от степени повышения давления в компрессоре p_2/p_1 ?

1. Монотонно убывает с ростом p_2/p_1 .
2. Монотонно возрастает.
3. Не изменяется.
4. Сначала возрастает, достигает максимума, а затем убывает.

ПРИЛОЖЕНИЕ

Таблица 1. Мольные теплоемкости идеальных газов без учета их зависимости от температуры, кДж/(кмоль·К)

Газы	μ_{c_v}	μ_{c_p}
Одноатомные	12,5	20,8
Двухатомные	20,8	29,1
Трех- и многоатомные	29,1	37,4

Таблица 2. Средние молярные теплоемкости идеальных газов μ_{Cp} , кДж/(кмоль·К)

$t, ^\circ\text{C}$	Воздух		Кислород		Азот		Водород		Водяной пар		Оксид углерода		Диоксид углерода	
	μ_{Cp}	μ_{Cp}	μ_{Cp}	μ_{Cp}	μ_{Cp}	μ_{Cp}	μ_{Cp}	μ_{Cp}	μ_{Cp}	μ_{Cp}	μ_{Cp}	μ_{Cp}	μ_{Cp}	μ_{Cp}
0	29,07	20,76	29,27	20,96	29,12	20,81	28,62	20,31	33,50	25,19	29,12	20,81	35,86	27,55
100	29,15	20,84	29,54	21,23	29,16	20,85	28,94	20,63	33,74	25,43	29,18	20,87	38,11	29,80
200	29,30	20,99	29,93	21,62	29,25	20,94	29,07	20,76	34,12	25,81	29,30	20,99	40,06	31,75
300	29,52	21,21	30,40	22,09	29,38	21,07	29,12	20,81	34,58	26,27	29,52	21,21	41,76	33,45
400	29,79	21,48	30,88	22,57	29,60	21,29	29,19	20,88	35,09	26,78	29,79	21,48	43,25	34,94
500	30,09	21,78	31,33	23,02	29,86	21,55	29,25	20,94	35,63	27,32	30,10	21,79	44,57	36,26
600	30,40	22,09	31,76	23,45	30,15	21,84	29,32	21,01	36,20	27,89	30,43	22,12	45,75	37,44
700	30,72	22,41	32,15	23,84	30,45	22,14	29,41	21,09	36,79	28,47	30,75	22,44	46,81	38,50
800	31,03	22,72	32,50	24,19	30,75	22,44	29,52	21,20	37,39	29,08	31,07	22,76	47,76	39,45
900	31,32	23,01	32,82	24,51	31,04	22,73	29,65	21,33	38,01	29,69	31,38	23,06	48,62	40,30
1000	31,60	23,29	33,12	24,81	31,31	23,00	29,79	21,47	38,62	30,30	31,67	23,35	49,39	41,08
1200	32,11	23,80	33,63	25,32	31,83	23,52	30,11	21,79	39,83	31,51	32,19	23,88	50,74	42,43
1400	32,56	24,25	34,08	25,77	32,29	23,98	30,47	22,15	40,98	32,66	32,66	24,34	51,86	43,54
1600	32,97	24,66	34,48	26,17	32,70	24,39	30,83	22,52	42,06	33,74	33,05	24,74	52,80	44,49
1800	33,32	25,01	34,83	26,52	33,06	24,75	31,19	22,88	43,07	34,76	33,40	25,09	53,50	45,29

Таблица 3. Термодинамические свойства хладона R12 на линии насыщения

$t, ^\circ\text{C}$	p , МПа	v'	v''	h'	h''	r	s'	s''
		м/кг		кДж/кг		кДж/кг	кДж/(кг·К)	
-70	0,0123	0,000625	1,129	337,41	519,52	182,11	3,7368	4,6332
-65	0,0168	0,000630	0,8423	341,63	521,85	180,22	3,7574	4,6232
-60	0,0226	0,000635	0,6386	345,90	524,19	178,29	3,7776	4,6140
-55	0,0300	0,000641	0,4914	350,21	526,54	176,33	3,7975	4,6059
-50	0,0392	0,000647	0,3834	354,55	528,90	174,35	3,8172	4,5985
-45	0,0505	0,000653	0,3029	358,93	531,25	172,32	3,8366	4,5919
-40	0,0643	0,000659	0,2421	363,34	533,60	170,26	3,8557	4,5859
-35	0,0809	0,000665	0,1956	367,80	535,95	168,16	3,8745	4,5806
-30	0,1006	0,000672	0,1595	372,29	538,30	166,01	3,8932	4,5759
-25	0,1240	0,000678	0,1314	376,81	540,63	163,82	3,9115	4,5716
-20	0,1513	0,000685	0,1091	381,38	542,96	161,58	3,9296	4,5679
-15	0,1830	0,000693	0,09125	385,98	545,26	159,28	3,9476	4,5648
-10	0,2196	0,000700	0,07689	390,63	547,55	156,92	3,9653	4,5616
-5	0,2614	0,000708	0,06522	395,30	549,82	154,52	3,9828	4,5590
0	0,3091	0,000716	0,05566	400,00	552,06	152,06	4,0000	4,5567
5	0,3629	0,000725	0,04776	404,75	554,28	149,53	4,0171	4,5547
10	0,4235	0,000734	0,04119	409,54	556,45	146,91	4,0340	4,5528
15	0,4913	0,000743	0,03569	414,36	558,59	144,23	4,0507	4,5512
20	0,5669	0,000753	0,03105	419,22	560,69	141,47	4,0672	4,5498
25	0,6508	0,000764	0,02712	424,13	562,73	138,60	4,0836	4,5485
30	0,7435	0,000775	0,02376	429,08	564,72	135,64	4,0998	4,5473
35	0,8456	0,000786	0,02088	434,09	566,65	132,55	4,1160	4,5461
40	0,9577	0,000799	0,01840	439,16	568,48	129,32	4,1320	4,5450
45	1,080	0,000812	0,01625	444,28	570,24	125,95	4,1479	4,5438
50	1,214	0,000826	0,01437	449,49	571,89	122,40	4,1638	4,5426
55	1,360	0,000842	0,01273	454,78	573,43	118,65	4,1797	4,5413
60	1,519	0,000859	0,01128	460,18	574,83	114,65	4,1956	4,5398

Таблица 4. Термодинамические свойства аммиака на линии насыщения

$t, ^\circ\text{C}$	p , МПа	v'	v''	h'	h''	r	s'	s''
		м ³ /кг		кДж/кг		кДж/кг	кДж/(кг·К)	
-50	0,0409	0,00142	2,6288	275,1	1692,0	1416,9	1,0938	7,4430
-45	0,0545	0,00144	2,0072	297,2	1700,2	1403,0	1,1915	7,3411
-40	0,0717	0,00145	1,5530	319,4	1708,3	1388,9	1,2874	7,2446
-35	0,0931	0,00146	1,2162	341,6	1716,0	1374,4	1,3816	7,1529
-30	0,1195	0,00147	0,9634	363,9	1723,5	1359,6	1,4742	7,0658
-25	0,1515	0,00149	0,7710	386,3	1730,3	1344,4	1,5653	6,9828
-20	0,1901	0,00150	0,6230	408,8	1737,5	1328,7	1,6548	6,9035
-15	0,2363	0,00152	0,5081	431,4	1744,1	1312,6	1,7431	6,8277
-10	0,2908	0,00153	0,4179	454,2	1750,2	1296,1	1,8299	6,7552
-5	0,3549	0,00155	0,3463	477,0	1756,1	1279,1	1,9136	6,6955
0	0,4296	0,00157	0,2890	500,0	1761,5	1261,5	2,0000	6,6185
5	0,5160	0,00158	0,2428	523,1	1766,6	1243,5	2,0834	6,5539
10	0,6153	0,00160	0,2052	546,4	1771,2	1224,8	2,1658	6,4915
15	0,7288	0,00162	0,1745	569,8	1775,4	1205,6	2,2472	6,4312
20	0,8578	0,00164	0,1491	593,5	1779,2	1185,8	2,3278	6,3727

Продолжение табл. 4

$t, ^\circ\text{C}$	$p, \text{МПа}$	v'	v''	h'	h''	g	s'	s''
		$\text{М}^3/\text{кг}$		кДж/кг		кДж/кг	$\text{кДж/(кг}\cdot\text{К)}$	
25	1,004	0,00166	0,1280	617,3	1782,5	1165,2	2,4075	6,3157
30	1,167	0,00168	0,1104	641,3	1785,3	1144,0	2,4866	6,2602
35	1,351	0,00170	0,09569	665,6	1787,6	1122,0	2,5650	6,2059
40	1,556	0,00173	0,08331	690,2	1789,2	1099,0	2,6429	6,1526
45	1,783	0,00175	0,07250	715,0	1790,3	1075,3	2,7204	6,1002
50	2,034	0,00178	0,06341	740,2	1790,7	1050,5	2,7975	6,0483
55	2,311	0,00180	0,05560	765,7	1790,4	1024,7	2,8743	5,9969
60	2,615	0,00183	0,04888	791,6	1789,2	997,6	2,9510	5,9455

Таблица 5. Термодинамические свойства диоксида углерода на линии насыщения

$t, ^\circ\text{C}$	$p, \text{МПа}$	v'	v''	h'	h''	g	s'	s''
		$\text{м}^3/\text{кг}$		кДж/кг		кДж/кг	$\text{кДж/(кг}\cdot\text{К)}$	
-50	0,684	0,000867	0,0554	314,0	651,5	337,5	3,777	5,288
-45	0,833	0,000881	0,0458	323,6	652,7	329,1	3,819	5,261
-40	1,005	0,000897	0,0382	333,3	654,0	320,7	3,859	5,235
-35	1,202	0,000913	0,0320	342,9	654,8	311,9	3,900	5,210
-30	1,427	0,000931	0,0270	352,5	655,7	303,2	3,939	5,185
-25	1,681	0,000950	0,0229	362,2	656,1	293,9	3,978	5,162
-20	1,967	0,000971	0,0195	362,2	656,1	283,9	4,017	5,138
-15	2,289	0,000994	0,0166	382,7	656,1	273,4	4,057	5,115
-10	2,647	0,001019	0,0142	394,0	655,7	261,7	4,098	5,092
-5	3,045	0,001048	0,0121	405,7	654,8	249,1	4,141	5,070
0	3,485	0,001081	0,0104	418,7	653,6	234,9	4,187	5,047
5	3,972	0,001120	0,0088	431,7	651,1	219,4	4,230	5,018
10	4,506	0,001166	0,0075	445,9	647,3	201,4	4,278	4,989
15	5,091	0,001223	0,0063	461,0	641,4	180,4	4,329	4,955
20	5,732	0,001298	0,0053	477,3	632,6	155,3	4,383	4,913

Таблица 6. Термодинамические свойства перегретого пара хладона R12

$t, ^\circ\text{C}$	$v, \text{м}^3/\text{кг}$	$h, \text{кДж/кг}$	$s, \text{кДж/(кг}\cdot\text{К)}$	$t, ^\circ\text{C}$	$v, \text{м}^3/\text{кг}$	$h, \text{кДж/кг}$	$s, \text{кДж/(кг}\cdot\text{К)}$
$t_H = -30^\circ\text{C}; p_H = 0,1006 \text{ МПа}$				$t_H = -10^\circ\text{C}; p_H = 0,2196 \text{ МПа}$			
-30	0,1595	538,30	4,5759	-10	0,07690	547,55	4,5616
-25	0,1633	541,18	4,5876				
-20	0,1671	544,08	4,5992	-5	0,07874	550,65	4,5733
-15	0,1708	547,00	4,6106	0	0,08056	553,76	4,5847
	0,1745	549,93	4,6219	5	0,08236	556,86	4,5960
-10	0,1782	552,89	4,6330	10	0,08414	559,98	4,6071
-5				15	0,08591	563,11	4,6181
0	0,1818	555,86	4,6439	20	0,08766	566,25	4,6289
5	0,1854	558,84	4,6548	25	0,08940	569,40	4,6395

Продолжение табл. 6

$t, ^\circ\text{C}$	$v, \text{м}^3/\text{кг}$	$h, \text{кДж/кг}$	$s, \text{кДж/(кг}\cdot\text{К)}$	$t, ^\circ\text{C}$	$v, \text{м}^3/\text{кг}$	$h, \text{кДж/кг}$	$s, \text{кДж/(кг}\cdot\text{К)}$
$t_H = 5^\circ\text{C}; p_H = 0,3629 \text{ МПа}$				$t_H = 20^\circ\text{C}; p_H = 0,5660 \text{ МПа}$			
5	0,04776	554,28	4,5547	20	0,03105	560,69	4,5498
10	0,04895	557,55	4,5663	25	0,03188	564,16	4,5616
15	0,05012	560,82	4,5778	30	0,03268	567,62	4,5731
20	0,05127	564,09	4,5890	35	0,03347	571,06	4,5843
25	0,05240	567,36	4,6001	40	0,03424	574,49	4,5954
30	0,05352	570,62	4,6109	45	0,03500	577,91	4,6062
35	0,05463	573,90	4,6216	50	0,03575	581,33	4,6169
40	0,05573	577,17	4,6322	55	0,03649	584,74	4,6273
$t_H = 40^\circ\text{C}; p_H = 0,9577 \text{ МПа}$				$t_H = 60^\circ\text{C}; p_H = 60^\circ\text{C}; p_H = 1,519 \text{ МПа}$			
40	0,01840	568,48	4,5450	60	0,01128	574,83	4,5398
45	0,01896	572,29	4,5570	65	0,01171	579,13	4,5526
50	0,01950	576,04	4,5687	70	0,01212	583,31	4,5649
55	0,02003	579,76	4,5802	75	0,01251	587,41	4,5767
60	0,02054	583,44	4,5913	80	0,01289	591,43	4,5882
65	0,02104	587,10	4,6022	85	0,01325	595,39	4,5993
70	0,02153	590,74	4,6129	90	0,01360	599,30	4,6102
75	0,02201	594,36	4,6234	95	0,01394	603,18	4,6208

Таблица 7. Термодинамические свойства перегретого пара аммиака

$t, ^\circ\text{C}$	$v, \text{м}^3/\text{кг}$	$h, \text{кДж/кг}$	$s, \text{кДж/(кг}\cdot\text{К)}$	$t, ^\circ\text{C}$	$v, \text{м}^3/\text{кг}$	$h, \text{кДж/кг}$	$s, \text{кДж/(кг}\cdot\text{К)}$
$t_H = -30^\circ\text{C}; p_H = 0,1194 \text{ МПа}$				$t_H = -10^\circ\text{C}; p_H = 0,2908 \text{ МПа}$			
-30	0,9634	1723,5	7,066	-10	0,418	1750,2	6,755
-25	0,9860	1734,8	7,112	0	0,438	1774,8	6,847
-15	1,030	1757,2	7,200	10	0,457	1798,7	6,933
-5	1,074	1779,3	7,284	20	0,476	1822,2	7,014
0	1,096	1790,3	7,325	30	0,494	1845,5	7,092
10	1,139	1812,2	7,404	40	0,512	1868,5	7,167
20	1,182	1834,1	7,480	50	0,530	1891,4	7,239
30	1,224	1855,9	7,553	60	0,548	1914,2	7,309
40	1,267	1877,8	7,624	70	0,566	1937,0	7,376
50	1,309	1899,7	7,693	80	0,583	1959,8	7,442
60	1,351	1921,7	7,760	90	0,601	1982,6	7,505
70	1,392	1943,7	7,825	100	0,618	2005,5	7,567
$t_H = 10^\circ\text{C}; p_H = 0,6153 \text{ МПа}$				$t_H = 20^\circ\text{C}; p_H = 0,8578 \text{ МПа}$			
10	0,205	1771,2	6,492	20	0,149	1779,2	6,373
20	0,215	1798,5	6,586	30	0,157	1808,1	6,470
30	0,225	1824,7	6,674	40	0,164	1835,7	6,559
40	0,235	1850,2	6,757	50	0,171	1862,4	6,643
50	0,244	1875,1	6,835	60	0,178	1888,3	6,722
60	0,253	1899,7	6,910	70	0,185	1913,7	6,797
70	0,262	1923,9	6,982	80	0,191	1938,8	6,869
80	0,271	1947,9	7,051	90	0,198	1963,5	6,938
90	0,279	1971,8	7,117	100	0,204	1988,1	7,005
100	0,288	1995,6	7,182	110	0,210	2012,5	7,069
110	0,296	2019,4	7,245	120	0,217	2036,8	7,132
120	0,305	2043,2	7,306	135	0,226	2073,2	7,223

Продолжение табл.

$t, ^\circ\text{C}$	$v, \text{м}^3/\text{кг}$	$h, \text{кДж/кг}$	$s, \text{кДж}/(\text{кг}\cdot\text{K})$	$t, ^\circ\text{C}$	$v, \text{м}^3/\text{кг}$	$h, \text{кДж/кг}$	$s, \text{кДж}/(\text{кг}\cdot\text{K})$
$t_n=30^\circ\text{C}; p_n=1,168 \text{ МПа}$				$t_n=50^\circ\text{C}; p_n=2,034 \text{ МПа}$			
30	0,110	1785,3	6,260	50	0,0634	1790,7	6,048
40	0,116	1816,1	6,360	60	0,0674	1826,2	6,157
50	0,122	1845,2	6,452	70	0,0710	1859,2	6,254
60	0,128	1873,2	6,537	80	0,0745	1890,3	6,344
70	0,133	1900,3	6,617	90	0,0778	1920,1	6,427
80	0,138	1926,7	6,693	100	0,0810	1948,8	6,505
90	0,143	1952,6	6,765	110	0,0840	1976,8	6,579
100	0,148	1978,1	6,835	120	0,0870	2004,1	6,649
110	0,152	2003,4	6,902	135	0,0914	2044,3	6,750
120	0,157	2028,4	6,966	150	0,0956	2083,8	6,845

Таблица 8. Стандартные теплоты образования веществ

Вещество	$Q_p^{25}, \text{кДж/кмоль}$
$\text{O}_2(\text{г})$ — кислород	0
$\text{C}(\text{г})$ — углерод (графит)	0
$\text{H}_2(\text{г})$ — водород	0
$\text{Cl}_2(\text{г})$ — хлор	0
$\text{CO}(\text{г})$ — оксид углерода	-110 600
$\text{CO}_2(\text{г})$ — диоксид углерода	-393 780
$\text{H}_2\text{O}(\text{ж})$ — вода	-286 030
$\text{H}_2\text{O}(\text{г})$ — вода	-241 990
$\text{NH}_3(\text{г})$ — аммиак	-46 220
$\text{HCl}(\text{г})$ — хлороводород	-92 370
$\text{NH}_4\text{Cl}(\text{т})$ — хлорид аммония	-315 600
$\text{CH}_4(\text{г})$ — метан	-74 900
$\text{C}_3\text{H}_8(\text{г})$ — пропан	-103 920
$\text{OH}(\text{г})$ — гидроксильная группа	+42 119

Таблица 9. Константы равновесия химических реакций*

T, K	K_{p1}	K_{p2}	K_{p3}	K_{p4}	K_{p5}
	$\frac{p_{\text{CO}} p_{\text{H}_2\text{O}}}{p_{\text{CO}_2} p_{\text{H}_2}}$	$\frac{p_{\text{H}_2\text{O}}^2}{p_{\text{OH}}^2 p_{\text{H}_2}}$	$\frac{p_{\text{H}_2\text{O}}^2}{p_{\text{H}_2}^2 p_{\text{O}_2}}$	$\frac{p_{\text{H}_2} p_{\text{O}_2}}{p_{\text{OH}}^2}$	$\frac{p_{\text{CO}_2}^2}{p_{\text{CO}}^2 p_{\text{O}_2}}$
500	$7,539 \cdot 10^{-3}$	$8,080 \cdot 10^{47}$	$5,899 \cdot 10^{40}$	$3,865 \cdot 10^{17}$	$1,23 \cdot 10^{45}$
1000	0,7254	$7,649 \cdot 10^{17}$	$1,313 \cdot 10^{15}$	$1,369 \cdot 10^8$	$2,495 \cdot 10^{16}$
1500	2,699	$6,200 \cdot 10^6$	$2,814 \cdot 10^6$	$9,625 \cdot 10^4$	$3,864 \cdot 10^9$
2000	4,741	$5,266 \cdot 10^2$	$1,196 \cdot 10^2$	$2,547 \cdot 10^3$	5,320
2500	6,311	$4,675 \cdot 10^{-1}$	$2,744 \cdot 10^{-1}$	$2,949 \cdot 10^2$	$6,889 \cdot 10^{-1}$
3000	7,382	$4,367 \cdot 10^{-3}$	$4,669 \cdot 10^{-3}$	$67,43 \cdot 10^1$	$8,600 \cdot 10^{-1}$

* Константы K_{p2}, K_{p3}, K_{p5} выражаются в Па^{-1} .
Константы K_{p1}, K_{p4} — величины безразмерные.

$t, ^\circ\text{C}$	$v, \text{м}^3/\text{кг}$	$h, \text{кДж/кг}$	$s, \text{кДж/(кг}\cdot\text{K)}$	$t, ^\circ\text{C}$	$v, \text{м}^3/\text{кг}$	$h, \text{кДж/кг}$	$s, \text{кДж/(кг}\cdot\text{K)}$
$t_n=30^\circ\text{C}; p_n=1,168 \text{ МПа}$				$t_n=50^\circ\text{C}; p_n=2,034 \text{ МПа}$			
30	0,110	1785,3	6,260	50	0,0634	1790,7	6,048
40	0,116	1816,1	6,360	60	0,0674	1826,2	6,157
50	0,122	1845,2	6,452	70	0,0710	1859,2	6,254
60	0,128	1873,2	6,537	80	0,0745	1890,3	6,344
70	0,133	1900,3	6,617	90	0,0778	1920,1	6,427
80	0,138	1926,7	6,693	100	0,0810	1948,8	6,505
90	0,143	1952,6	6,765	110	0,0840	1976,8	6,579
100	0,148	1978,1	6,835	120	0,0870	2004,1	6,649
110	0,152	2003,4	6,902	135	0,0914	2044,3	6,750
120	0,157	2028,4	6,966	150	0,0956	2083,8	6,845

Таблица 8. Стандартные теплоты образования веществ

Вещество	$Q_p^{25}, \text{кДж/кмоль}$
$\text{O}_2(\text{г})$ — кислород	0
$\text{C}(\text{г})$ — углерод (графит)	0
$\text{H}_2(\text{г})$ — водород	0
$\text{Cl}_2(\text{г})$ — хлор	0
$\text{CO}(\text{г})$ — оксид углерода	-110 600
$\text{CO}_2(\text{г})$ — диоксид углерода	-393 780
$\text{H}_2\text{O}(\text{ж})$ — вода	-286 030
$\text{H}_2\text{O}(\text{г})$ — вода	-241 990
$\text{NH}_3(\text{г})$ — аммиак	-46 220
$\text{HCl}(\text{г})$ — хлороводород	-92 370
$\text{NH}_4\text{Cl}(\text{г})$ — хлорид аммония	-315 600
$\text{CH}_4(\text{г})$ — метан	-74 900
$\text{C}_3\text{H}_8(\text{г})$ — пропан	-103 920
$\text{OH}(\text{г})$ — гидроксильная группа	+42 119

Таблица 9. Константы равновесия химических реакций*

T, K	K_{p1}	K_{p2}	K_{p3}	K_{p4}	K_{p5}
	$\frac{p_{\text{CO}} p_{\text{H}_2\text{O}}}{p_{\text{CO}_2} p_{\text{H}_2}}$	$\frac{p_{\text{H}_2\text{O}}^2}{p_{\text{OH}}^2 p_{\text{H}_2}}$	$\frac{p_{\text{H}_2\text{O}}^2}{p_{\text{H}_2}^2 p_{\text{O}_2}}$	$\frac{p_{\text{H}_2} p_{\text{O}_2}}{p_{\text{OH}}^2}$	$\frac{p_{\text{CO}_2}^2}{p_{\text{CO}}^2 p_{\text{O}_2}}$
500	$7,539 \cdot 10^{-3}$	$8,080 \cdot 10^{47}$	$5,899 \cdot 10^{40}$	$3,865 \cdot 10^{17}$	$1,23 \cdot 10^{45}$
1000	0,7254	$7,649 \cdot 10^{17}$	$1,313 \cdot 10^{15}$	$1,369 \cdot 10^8$	$2,495 \cdot 10^{12}$
1500	2,699	$6,200 \cdot 10^6$	$2,814 \cdot 10^6$	$9,625 \cdot 10^4$	$3,864 \cdot 10^5$
2000	4,741	$5,266 \cdot 10^2$	$1,196 \cdot 10^2$	$2,547 \cdot 10^3$	5,320
2500	6,311	$4,675 \cdot 10^{-1}$	$2,744 \cdot 10^{-1}$	$2,949 \cdot 10^2$	$6,889 \cdot 10^{-1}$
3000	7,382	$4,367 \cdot 10^{-3}$	$4,669 \cdot 10^{-3}$	$67,43 \cdot 10^1$	$8,600 \cdot 10^{-1}$

* Константы K_{p2}, K_{p3}, K_{p5} выражаются в Па^{-1} .
Константы K_{p1}, K_{p4} — величины безразмерные.

Утверждено
Главным учебно-методическим управлением
высшего образования

ТЕХНИЧЕСКАЯ ТЕРМОДИНАМИКА

МЕТОДИЧЕСКИЕ УКАЗАНИЯ
И КОНТРОЛЬНЫЕ ЗАДАНИЯ

для студентов-заочников
теплоэнергетических специальностей
высших учебных заведений

Издание второе



МОСКВА «ВЫСШАЯ ШКОЛА» 1990

$t, ^\circ\text{C}$	$v, \text{м}^3/\text{кг}$	$h, \text{кДж/кг}$	$s, \text{кДж}/(\text{кг}\cdot\text{K})$	$t, ^\circ\text{C}$	$v, \text{м}^3/\text{кг}$	$h, \text{кДж/кг}$	$s, \text{кДж}/(\text{кг}\cdot\text{K})$
$t_{\text{н}}=30^\circ\text{C}; p_{\text{н}}=1,168\text{ МПа}$				$t_{\text{н}}=50^\circ\text{C}; p_{\text{н}}=2,034\text{ МПа}$			
30	0,110	1785,3	6,260	50	0,0634	1790,7	6,048
40	0,116	1816,1	6,360	60	0,0674	1826,2	6,157
50	0,122	1845,2	6,452	70	0,0710	1859,2	6,254
60	0,128	1873,2	6,537	80	0,0745	1890,3	6,344
70	0,133	1900,3	6,617	90	0,0778	1920,1	6,427
80	0,138	1926,7	6,693	100	0,0810	1948,8	6,505
90	0,143	1952,6	6,765	110	0,0840	1976,8	6,579
100	0,148	1978,1	6,835	120	0,0870	2004,1	6,649
110	0,152	2003,4	6,902	135	0,0914	2044,3	6,750
120	0,157	2028,4	6,966	150	0,0956	2083,8	6,845

Таблица 8. Стандартные теплоты образования веществ

Вещество	$Q_p^{25}, \text{кДж/кмоль}$
$\text{O}_2(\text{г})$ — кислород	0
$\text{C}(\text{г})$ — углерод (графит)	0
$\text{H}_2(\text{г})$ — водород	0
$\text{Cl}_2(\text{г})$ — хлор	0
$\text{CO}(\text{г})$ — оксид углерода	-110 600
$\text{CO}_2(\text{г})$ — диоксид углерода	-393 780
$\text{H}_2\text{O}(\text{ж})$ — вода	-286 030
$\text{H}_2\text{O}(\text{г})$ — вода	-241 990
$\text{NH}_3(\text{г})$ — аммиак	-46 220
$\text{HCl}(\text{г})$ — хлороводород	-92 370
$\text{NH}_4\text{Cl}(\text{т})$ — хлорид аммония	-315 600
$\text{CH}_4(\text{г})$ — метан	-74 900
$\text{C}_3\text{H}_8(\text{г})$ — пропан	-103 920
$\text{OH}(\text{г})$ — гидроксильная группа	+42 119

Таблица 9. Константы равновесия химических реакций*

T, K	K_{p1}	K_{p2}	K_{p3}	K_{p4}	K_{p5}
	$\frac{p_{\text{CO}} p_{\text{H}_2\text{O}}}{p_{\text{CO}_2} p_{\text{H}_2}}$	$\frac{p_{\text{H}_2\text{O}}^2}{p_{\text{OH}}^2 p_{\text{H}_2}}$	$\frac{p_{\text{H}_2\text{O}}^2}{p_{\text{H}_2}^2 p_{\text{O}_2}}$	$\frac{p_{\text{H}_2} p_{\text{O}_2}}{p_{\text{OH}}^2}$	$\frac{p_{\text{CO}_2}^2}{p_{\text{CO}}^2 p_{\text{O}_2}}$
500	$7,539 \cdot 10^{-3}$	$8,080 \cdot 10^{17}$	$5,899 \cdot 10^{40}$	$3,865 \cdot 10^{17}$	$1,23 \cdot 10^{45}$
1000	0,7254	$7,649 \cdot 10^{17}$	$1,313 \cdot 10^{15}$	$1,369 \cdot 10^8$	$2,495 \cdot 10^{15}$
1500	2,699	$6,200 \cdot 10^6$	$2,814 \cdot 10^6$	$9,625 \cdot 10^4$	$3,864 \cdot 10^9$
2000	4,741	$5,266 \cdot 10^2$	$1,196 \cdot 10^2$	$2,547 \cdot 10^3$	5,320
2500	6,311	$4,675 \cdot 10^{-1}$	$2,744 \cdot 10^{-1}$	$2,949 \cdot 10^2$	$6,889 \cdot 10^{-3}$
3000	7,382	$4,367 \cdot 10^{-3}$	$4,669 \cdot 10^{-3}$	$67,43 \cdot 10^1$	$8,600 \cdot 10^{-5}$

* Константы K_{p2}, K_{p3}, K_{p5} выражаются в Па^{-1} .
 Константы K_{p1}, K_{p4} — величины безразмерные.

Продолжение табл.

$t, ^\circ\text{C}$	$v, \text{м}^3/\text{кг}$	$h, \text{кДж/кг}$	$s, \text{кДж}/(\text{кг}\cdot\text{K})$	$t, ^\circ\text{C}$	$v, \text{м}^3/\text{кг}$	$h, \text{кДж/кг}$	$s, \text{кДж}/(\text{кг}\cdot\text{K})$
$t_{\text{н}}=30^\circ\text{C}; p_{\text{н}}=1,168 \text{ МПа}$				$t_{\text{н}}=50^\circ\text{C}; p_{\text{н}}=2,034 \text{ МПа}$			
30	0,110	1785,3	6,260	50	0,0634	1790,7	6,048
40	0,116	1816,1	6,360	60	0,0674	1826,2	6,157
50	0,122	1845,2	6,452	70	0,0710	1859,2	6,254
60	0,128	1873,2	6,537	80	0,0745	1890,3	6,344
70	0,133	1900,3	6,617	90	0,0778	1920,1	6,427
80	0,138	1926,7	6,693	100	0,0810	1948,8	6,505
90	0,143	1952,6	6,765	110	0,0840	1976,8	6,579
100	0,148	1978,1	6,835	120	0,0870	2004,1	6,649
110	0,152	2003,4	6,902	135	0,0914	2044,3	6,750
120	0,157	2028,4	6,966	150	0,0956	2083,8	6,845

Таблица 8. Стандартные теплоты образования веществ

Вещество	$Q_{\text{р}}^{25}, \text{кДж/кмоль}$
$\text{O}_2(\text{г})$ — кислород	0
$\text{C}(\text{г})$ — углерод (графит)	0
$\text{H}_2(\text{г})$ — водород	0
$\text{Cl}_2(\text{г})$ — хлор	0
$\text{CO}(\text{г})$ — оксид углерода	—110 600
$\text{CO}_2(\text{г})$ — диоксид углерода	—393 780
$\text{H}_2\text{O}(\text{ж})$ — вода	—286 030
$\text{H}_2\text{O}(\text{г})$ — вода	—241 990
$\text{NH}_3(\text{г})$ — аммиак	—46 220
$\text{HCl}(\text{г})$ — хлороводород	—92 370
$\text{NH}_4\text{Cl}(\text{т})$ — хлорид аммония	—315 600
$\text{CH}_4(\text{г})$ — метан	—74 900
$\text{C}_3\text{H}_8(\text{г})$ — пропан	—103 920
$\text{OH}(\text{г})$ — гидроксильная группа	+42 119

Таблица 9. Константы равновесия химических реакций*

T, K	$K_{\text{р1}}$	$K_{\text{р2}}$	$K_{\text{р3}}$	$K_{\text{р4}}$	$K_{\text{р5}}$
	$\frac{p_{\text{CO}} p_{\text{H}_2\text{O}}}{p_{\text{CO}_2} p_{\text{H}_2}}$	$\frac{p_{\text{H}_2\text{O}}^2}{p_{\text{OH}}^2 p_{\text{H}_2}}$	$\frac{p_{\text{H}_2\text{O}}^2}{p_{\text{H}_2}^2 p_{\text{O}_2}}$	$\frac{p_{\text{H}_2} p_{\text{O}_2}}{p_{\text{OH}}^2}$	$\frac{p_{\text{CO}_2}^2}{p_{\text{CO}}^2 p_{\text{O}_2}}$
500	$7,539 \cdot 10^{-3}$	$8,080 \cdot 10^{47}$	$5,899 \cdot 10^{40}$	$3,865 \cdot 10^{17}$	$1,23 \cdot 10^{45}$
1000	0,7254	$7,649 \cdot 10^{17}$	$1,313 \cdot 10^{15}$	$1,369 \cdot 10^8$	$2,495 \cdot 10^{15}$
1500	2,699	$6,200 \cdot 10^6$	$2,814 \cdot 10^6$	$9,625 \cdot 10^4$	$3,864 \cdot 10^5$
2000	4,741	$5,266 \cdot 10^2$	$1,196 \cdot 10^2$	$2,547 \cdot 10^3$	5,320
2500	6,311	$4,675 \cdot 10^{-1}$	$2,744 \cdot 10^{-1}$	$2,949 \cdot 10^2$	$6,889 \cdot 10^{-3}$
3000	7,382	$4,367 \cdot 10^{-3}$	$4,669 \cdot 10^{-3}$	$67,43 \cdot 10^1$	$8,600 \cdot 10^{-5}$

* Константы $K_{\text{р2}}, K_{\text{р3}}, K_{\text{р5}}$ выражаются в Па^{-1} .
Константы $K_{\text{р1}}, K_{\text{р4}}$ — величины безразмерные.