

МИНИСТЕРСТВО ОБРАЗОВАНИЯ И НАУКИ РОССИЙСКОЙ ФЕДЕРАЦИИ
Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования
«КУЗБАССКИЙ ГОСУДАРСТВЕННЫЙ ТЕХНИЧЕСКИЙ УНИВЕРСИТЕТ
имени Т. Ф. ГОРБАЧЕВА»

Кафедра физики

ТЕПЛОТЕХНИКА

Методические указания к контрольной работе
для студентов направления подготовки 21.05.04 «Горное дело»
заочной формы обучения

Составители В. В. Дырдин
А. А. Мальшин
В. Г. Смирнов

Утверждены на заседании кафедры
Протокол № 7 от 09.02.2016
Рекомендованы к печати
учебно-методической комиссией
направления 21.05.04
Протокол №13 от 15.02.2016
Электронная копия находится
в библиотеке КузГТУ

Кемерово 2016

ОГЛАВЛЕНИЕ

ОБЩИЕ УКАЗАНИЯ	2
СОДЕРЖАНИЕ КУРСА ТЕПЛОТЕХНИКА	5
ВОПРОСЫ ДЛЯ ПОДГОТОВКИ К ЭКЗАМЕНУ	7
СПИСОК РЕКОМЕНДУЕМОЙ ЛИТЕРАТУРЫ	9
КОНТРОЛЬНАЯ РАБОТА	10
Основные свойства и параметры состояния термодинамических систем и законы преобразования энергии	10
Термодинамические процессы и основы их анализа.....	11
Влажный воздух.....	14
Термодинамика газовых потоков.....	16
Термодинамические циклы	18
ПРИЛОЖЕНИЕ	22

ОБЩИЕ УКАЗАНИЯ

Основной целью изучения дисциплины «Теплотехника» студентами, обучающимися по направлению подготовки специалистов «Горное дело» является формирование у студентов представлений об основных законах распространения тепла, законах, определяющих возможность преобразования теплоты в работу, а также о принципах функционирования технических устройств, основанных на данных законах.

Курс теплотехники включает в себя изучение тепловых свойств веществ, а именно способность различных веществ (термодинамических тел) проводить, поглощать, выделять и содержать в себе теплоту, а также изменять свое состояние при изменении температуры либо внешнего давления. В курсе рассматриваются теплоэнергетические параметры открытых систем – газовых потоков, определяются условия совершения ими технической работы, принципы ускорения потока в соплах, повышения давления в диффузорах, смешения потоков.

В результате освоения дисциплины «Теплотехника» студент должен:

– **знать:** основные свойства и параметры состояния термодинамических систем и законы преобразования энергии; законы термодинамики; термодинамические процессы и основы их анализа; термодинамика потока; элементы химической термодинамики; основные закономерности теплообмена и массообмена при стационарном и нестационарном режимах; способы управления параметрами теплообмена;

– **уметь:** оценивать параметры состояния термодинамических систем и эффективность термодинамических процессов; рассчитывать показатели, параметры теплообмена; анализировать термодинамические процессы в теплотехнических устройствах, применяющихся в горном деле;

– **владеть:** методами анализа эффективности термодинамических процессов горного производства и управления интенсивностью обмена энергией в них.

Основной формой обучения студента-заочника является самостоятельная работа по учебникам и учебным пособиям. Выпол-

нение контрольной работы способствует систематизации и закреплению полученных теоретических знаний.

Для организации самостоятельной работы студентов-заочников по теплотехнике преподавателями кафедры физики ФГБОУ ВО «КузГТУ имени Т. Ф. Горбачёва» читаются лекции, проводятся лабораторные занятия.

В контрольной работе студент должен решить ШЕСТЬ ЗАДАЧ того варианта, номер которого совпадает с ПОСЛЕДНЕЙ ЦИФРОЙ шифра зачетной книжки. В нумерации задач сначала указан номер задачи, затем, через точку, номер варианта. Десятый вариант соответствует последней цифре в зачетке – «ноль».

На титульном листе контрольной работы указывают название дисциплины («Теплотехника»), номер контрольной работы, фамилию и инициалы студента, шифр и домашний адрес. В конце работы следует поместить список использованной литературы, т. е. реквизиты учебников и учебных пособий, которые использовались при решении задач, включая методичку с контрольными заданиями.

Условия задач контрольной работы ПЕРЕПИСЫВАЮТСЯ ПОЛНОСТЬЮ. В «Дано» помещаются все численные данные, выбранные из условий задачи, а также из необходимых справочников. Решения задач сопровождаются исчерпывающими пояснениями с обязательным построением необходимых рисунков и схем.

Решение каждой задачи необходимо начинать с формулировок законов и определений, используемых при решении. Необходимо расшифровывать все введенные обозначения величин, указывать их размерность. Законы и определения сначала формулируются в общем виде, затем обсуждается их применимость к решению конкретной задачи, а входящие в закон величины сопоставляются с данными из условий задачи. Задачи решаются в общем виде с проверкой размерности полученного результата. Значения величин при подстановке в расчётную формулу должны быть выражены в СИ (SI). Графики процессов должны быть построены с соблюдением пропорций и указанием на осях масштабов величин. Допускается построение графиков на листах миллиметровой бумаги, вкладываемой в контрольную работу. После решения задачи записывается ответ, в котором указываются численные значения искомых величин, а также приводится краткий анализ полученных результатов.

Контрольные работы на проверку необходимо присылать не позднее, чем ЗА 15 ДНЕЙ ДО НАЧАЛА СЕССИИ. Если контрольная работа при рецензировании не зачтена, студент обязан представить её на повторную рецензию. В этом случае в конце работы после слов «работа над ошибками» приводится полное верное решение задач (включая условия, дано, рисунки), решения которых оказались неверными при первой проверке. Работа над ошибками не зачтённой контрольной работы производится В ТОЙ ЖЕ ТЕТРАДИ. Зачтённые работы «ЗАЩИЩАЮТСЯ» лично, в процессе устной беседы с преподавателем во время практических занятий или экзамена, при этом студентом даются пояснения по существу решения задач, входящих в контрольные работы.

К экзамену допускаются студенты, защитившие контрольные работы и успешно выполнившие работы лабораторного практикума. Задачи подобраны таким образом, чтобы при их решении студент-заочник проработал основную часть обязательного программного материала, используя учебную литературу из списка, приведенного в конце настоящих методических указаний, а также лекционный материал. Самостоятельное решение задач поможет студенту освоить курс теплотехники и успешно сдать экзамен.

СОДЕРЖАНИЕ КУРСА «ТЕПЛОТЕХНИКА»

1. Основные свойства и параметры состояния термодинамических систем

1.1. Постулаты и понятия термодинамики. Термические и калорические уравнения.

1.2. Уравнения состояния идеального и реального газов. Критическое состояние вещества. Расчет параметров.

2. Законы термодинамики и методы анализа термодинамических процессов

2.1. Первое начало термодинамики. Теплота, работа, внутренняя энергия. Зависимость внутренней энергии идеального газа от параметров системы.

2.2. Теплоемкость. Процессы с идеальным газом: изобарный, изохорный, изотермический, адиабатный и политропный. Графическое изображение изотермы, адиабаты и политропы. Уравнения состояния реальных газов: Ван дер Ваальса, Бертлоо, Дитеречи и др. Расчет критических параметров вещества.

2.3. Второе начало термодинамики. Энтропия и термодинамическая шкала температур. Математическая запись второго начала в дифференциальной и интегральной форме. Расчет изменения энтропии в термодинамических процессах.

2.4. Основное уравнение термодинамики равновесных процессов. Физический смысл и вычисления энтропии. Парадокс Гиббса.

2.5. Уравнение дифференциальной связи термического и калорического уравнений. Его применение к расчету внутренней энергии идеального и реального газов, разности теплоемкостей при постоянном давлении и объеме

2.6 Второе начало термодинамики для неравновесных процессов.

2.7. Смеси идеальных газов. Расчет теплоемкости, молярной массы, концентрации.

2.8. Третье начало термодинамики и следствия: недостижимость 0 К и вырождение идеального газа.

2.9. Методы термодинамики: круговых процессов и термодинамических потенциалов. Определение термических и калорических параметров.

2.10. Термодинамика опыта Джоуля – Томсона. Методы сжижения газов.

3. Термодинамические циклы

3.1. Цикл Карно в координатах p - V , S - T . Прямой и обратный. КПД цикла. Теоремы Карно.

3.2. Циклы Отто и Дизеля.

3.3. Циклы газотурбинных и паросиловых установок. Цикл Ренкина. Расчет КПД циклов и способы его повышения.

4. Влажный воздух

4.1. Абсолютная и относительная влажность. Точка росы. Связь давления с температурой насыщенного воздуха. Удельное и молярное влагосодержание. Плотность влажного воздуха.

4.2. Удельная энтальпия влажного, насыщенного и пересыщенного воздуха.

4.3. Процессы с влажным воздухом.

4.4. Процессы образования пара. Паровые котлы.

4.5. Диаграмма S - h -состояния.

4.6. Термодинамические процессы с водяным паром.

5. Термодинамика газовых потоков

5.1. Термодинамика газовых потоков. Заторможенные параметры потока. Первый закон термодинамики для газового потока.

5.2. Параметры газового потока. Число Маха. Критические параметры.

5.3. Формы каналов сопел и диффузоров. Сопло Лавалья. Расчет скорости истечения газа из сопла Лавалья.

5.4. Истечение водяного пара.

5.5. Дросселирование газов и паров. Эжектирование.

6. Распространение тепла в горных породах

6.1. Тепловые свойства твердых тел и горных пород. Моделирование тепловых процессов.

6.2. Основной закон (Фурье) распространения тепла в горных породах.

6.3. Дифференциальное уравнение теплопроводности. Уравнение теплоемкости массива с вентиляционной струей в шахтной выработке

6.4. Граничные и начальные условия. Краевые задачи.

6.5. Критерии подобия в термодинамике.

6.6. Методы расчета параметров нагрева горных пород. Термическое разрушение скальных пород. Термодинамическое разрушение талых и связанных горных пород.

7. Элементы химической термодинамики и условия устойчивости термодинамических систем

- 7.1. Тепловой эффект при химических реакциях.
- 7.2. Закон Гесса. Следствия. Уравнение Кирхгофа.
- 7.3. Равновесие в химических реакциях.
- 7.4. Условия равновесия и устойчивости термодинамических систем. Принцип Ле Шателье – Брауна.
- 7.5. Термодинамика фазовых переходов в горных породах.

8. Компрессоры

- 8.1. Поршневые компрессоры.
- 8.2. Лопаточные компрессоры.
- 8.3. Расчет центробежных компрессоров.

ВОПРОСЫ ДЛЯ ПОДГОТОВКИ К ЭКЗАМЕНУ

1. Термодинамическая система: изолированная, замкнутая, открытая, адиабатная. Параметры системы: интенсивные и экстенсивные.
2. Уравнения состояния идеального и реального газа.
3. Теплоемкость идеальных газов и их смесей.
4. Термодинамические процессы: изотермический, изобарный, адиабатный, политропный.
5. Законы термодинамики.
6. Пар насыщенный и перегретый, его производство. Диаграмма $S-h$ -состояния для водяного пара.
7. Необратимые термодинамические процессы. Опыт Джоуля – Томсона.
8. Уравнение первого закона термодинамики для газового потока.
9. Термодинамические циклы ДВС, газотурбинных и паросиловых установок.
10. Скорость и массовый расход газа в соплах и диффузорах.
11. Истечение газа через суживающееся сопло, сопло Лавая.
12. Дросселирование газов и паров. Эжектирование.

13. Равновесие в химических однородных и сложных системах.
14. Понятие о фазовых переходах.
15. Химические реакции. Тепловые эффекты. Закон Гесса.
16. Константы равновесия.
17. Виды теплообмена. Теплопроводность газов и жидкостей.
18. Дифференциальное уравнение переноса теплоты.
19. Перенос вещества. Диффузия. Термодиффузия. Дифференциальное уравнение диффузии.
20. Конвективный перенос. Движение вязкой жидкости. Уравнения Навье – Стокса.
21. Уравнение неразрывности.
22. Элементы теории подобия для расчетов процессов переноса теплоты и вещества.
23. Теплообмен излучением.
24. Типы теплообменных аппаратов и их расчет.
25. Сгорание топлива и токсичность продуктов сгорания.
26. Влияние теплового режима на процессы ведения горных работ.
27. Теплообмен при проветривании подземных выработок.
28. Источники тепла в подземных выработках.
29. Технологические основы замораживания пород.
30. Физико-технические основы подземной газификации.
31. Распределение температуры по длине потока газификации.

СПИСОК РЕКОМЕНДУЕМОЙ ЛИТЕРАТУРЫ

1. Луканин, В. Н. Теплотехника / В. Н. Луканин, М. Г. Шатров, Г. М. Камфер [и др.]. – 5-е изд. – М. : Высш. шк., 2005. – 671 с.

2. Термодинамика [Электронный ресурс] : учеб. пособие для студентов, обучающихся по направлению подготовки «Горное дело» / В. В. Дырдин [и др.]. – 2-е изд., перераб. и доп. – Кемерово : КузГТУ, 2009. – 176 с.

<http://library.kuzstu.ru/meto.php?n=90911&type=utchposob:common>

3. Сборник задач по теплотехнике : учеб. пособие для студ. учреждений высш. проф. образования / М. Г. Шатров, И. Е. Иванов, С. А. Пришвин [и др.] ; под ред. М. Г. Шатрова. – М. : Издательский центр «Академия», 2012. – 272 с.

4. Цветков, Ф. Ф. Задачник по тепломассообмену : учеб. пособие / Ф. Ф. Цветков, Р. В. Керимов, В. И. Величко. – 3-е изд., стереотип. – М. : Издательский дом МЭИ, 2010. – 196 с.

5. Кудинов, В. А. Теплотехника [Электронный ресурс] / В. А. Кудинов, Э. М. Карташов, Е. В. Стефанюк. – М. : Абрис, 2012. – 426 с.

<http://www.biblioclub.ru/book/117645/>

6. Гончаров, С. А. Термодинамика / С. А. Гончаров. – М. : Изд-во МГГУ, 2001. – 441 с.

7. Теплотехника : учебник для инж.-техн. специальностей вузов / под ред. А. П. Баскакова. – 3-е изд., перераб. – М. : БАСТЕТ, 2010. – 328 с.

8. Техническая термодинамика и теплотехника : учеб. пособие для студентов вузов / Л. Т. Бахшиева [и др.] ; под ред. А. А. Захаровой. – М. : Академия, 2006. – 272 с.

9. Термодинамика равновесных процессов [Электронный ресурс] : учеб. пособие для организации самостоятельной работы студентов направления подготовки дипломированного специалиста 130400 «Горное дело» и специальности 280102 «Безопасность технологических процессов и производств (в угольной промышленности)» / Т. Л. Ким [и др.]. – Кемерово : КузГТУ, 2010. – 176 с.

<http://library.kuzstu.ru/meto.php?n=90465&type=utchposob:common>

10. Краткий справочник физико-химических величин. – 11-е издание, исп. и дополн. / под ред. А. А. Равделя и А. М. Пономаревой – М : ООО ТИД «Аз-book», 2009. – 240 с.

КОНТРОЛЬНАЯ РАБОТА

Основные свойства и параметры состояния термодинамических систем и законы преобразования энергии

1.1–1.10. В емкости содержится смесь двух газов при температуре T и давлении P . Ее плотность составляет ρ . Определить концентрацию молекул каждого газа (табл. 1), молярные и массовые доли каждого компонента. Рассчитайте кажущуюся молярную массу, а также теплоемкость данной смеси в модели идеального газа.

Таблица 1

Данные для решения задач

№ п/п	Газы		Давление	Температура	Плотность
			P МПа	T К	ρ кг/м ³
1.1	O ₂ N ₂	Кислород Азот	0,2	285	2,5
1.2	N ₂ H ₂	Азот Водород	0,3	290	1,6
1.3	H ₂ Ar	Водород Аргон	0,2	300	0,28
1.4	He N ₂	Гелий Азот	0,25	305	1,2
1.5	Ne O ₂	Неон Кислород	0,15	280	1,5
1.6	O ₂ Ar	Кислород Аргон	0,28	308	3,8
1.7	N ₂ Kr	Азот Криптон	0,21	300	3,0
1.8	H ₂ Xe	Водород Ксенон	0,35	320	2,0
1.9	Ar H ₂	Аргон Водород	0,15	305	1,2
1.10	He Kr	Гелий Криптон	0,18	310	2,2

Термодинамические процессы и основы их анализа

2.1. Дымовые газы содержат углекислый газ CO_2 и азот N_2 , объемные доли которых 25 и 75 %, соответственно. Двумя способами, на основании данных из прил. 1 и 2 найдите среднюю удельную теплоемкость получившейся газовой смеси в диапазоне температур от 500 до 1000 К и показатель адиабаты. Рассчитайте, сколько теплоты выделится при охлаждении каждого килограмма дымовых газов от 1500 до 300 Кельвин. На основании данных, приведенных в прил. 2, постройте графики зависимости теплоемкости и показателя адиабаты смеси от температуры в диапазоне температур от 300 до 1500 Кельвин.

2.2. В компрессоре воздух нагревается до 500 К и помещается в сосуд с постоянным объемом. Определите количество теплоты, которое необходимо отвести от каждого килограмма воздуха для того, чтобы охладить его до 320 К. Рассчитайте удельную и молярную теплоемкость воздуха для изохорного и изобарного процесса в диапазоне температур от 300 до 700 К.

2.3. При неполном сгорании углеводородного топлива в выхлопных газах содержатся углекислый газ CO_2 , угарный газ CO , азот N_2 и пары воды H_2O , объемные доли которых равны 17, 6, 75 и 2 % соответственно. Сколько теплоты выделиться при изобарном охлаждении каждого килограмма получившейся газовой смеси от 1350 до 340 К? Найдите среднюю удельную изохорную и изобарную теплоемкость данной смеси для диапазона температур от 500 до 1000 К.

2.4. В смеси метана и этана объемная доля этана составляет 10 процентов. Постройте графики зависимости удельной изобарной и изохорной теплоемкости данной смеси в диапазоне температур от 300 до 1200 К. Рассчитайте показатель адиабаты смеси при 300 и при 1200 К.

2.5. Рассчитайте среднюю удельную (изохорную и изобарную) теплоемкость сероводорода в диапазоне температур от 500 до 1000 К. Постройте график температурной зависимости истинной удельной изохорной теплоемкости в данном диапазоне. Чему равен показатель адиабаты сероводорода при температуре 700 К.

2.6. Определить среднюю молярную и удельную изобарную теплоемкость водяного пара в интервале температур от 500

до 1200 К, постройте график зависимости истинной теплоемкости водяного пара от температуры. Исходя из рассчитанных теплоемкостей, определите показатель адиабаты для начальной и конечной точки указанного диапазона.

2.7. В сосуде находится газ массой 2 кг, состоящий по объему из 20 % азота, 30 % диоксида углерода (CO_2) и 50 % монооксида углерода (CO). Газ охлаждается от температуры 1500 К до температуры 700 К при постоянном давлении. Определить количество тепла выделившегося в окружающую среду.

2.8. Зависимость истинной молярной теплоемкости воздуха от температуры имеет вид: $C_{MP} = 28,5 + 4,1 \cdot 10^{-3} \cdot T - 0,8 \cdot 10^{-5} \cdot T^{-2}$. Какое количество теплоты необходимо сообщить 1,5 кг воздуха для повышения его температуры от 300 до 750 К при постоянном давлении. Молярная масса воздуха $M = 29 \cdot 10^{-3}$ кг/моль.

2.9. В сосуде объемом $V = 3$ л находится азот, который нагревается от 27 до 150 °С. Начальное давление в сосуде $P_1 = 0,1$ МПа. Определить количество подведенного тепла и конечное давление в сосуде. Какое количество тепла необходимо подвести к такому же количеству азота для нагревания его от 227 до 350 °С? Найдите среднюю теплоемкость для каждого из температурных интервалов.

2.10. При подземной газификации угля получают синтез-газ, в котором содержится CO , H_2 , CH_4 , CO_2 . Для случая, когда объемные доли компонент синтез-газа равны 15, 35, 10, 40 %, рассчитайте кажущуюся молярную массу данной смеси, среднюю теплоемкость в интервале температур от 300 до 1500 К. Постройте температурную зависимость теплоемкости смеси. Определите показатель адиабаты для начальной и конечной точки температурного интервала.

При решении задач 3.1.–3.10. необходимо построить схему распределения теплоэнергетических составляющих для всех процессов, указать долю подводимой теплоты, превращаемую во внутреннюю энергию и в совершаемую работу.

3.1. Изобразить схему перераспределения энергетических составляющих в политропных процессах идеального двухатомного газа с показателем $n = -1$ и рассчитать долю теплоты, расхо-

дуемой на совершение работы и изменение внутренней энергии при его расширении и сжатии.

3.2. Идеальный газ (кислород) находится при температуре 350 К. Данный газ изохорно нагревается до температуры 600 К. При какой температуре изотермического процесса, протекающего в том же интервале изменения давления, подводимая теплота будет равна теплоте, подводимой в изохорном процессе. Изобразить процессы в координатах PV и TS .

3.3. Идеальный газ (азот) находится при температуре 385 К. Данный газ изохорно нагревается до температуры 750 К. При какой температуре изотермического процесса, протекающего в том же интервале изменения давления, подводимая теплота будет равна теплоте, подводимой в изохорном процессе. Изобразить процессы в координатах PV и TS .

3.4. Идеальный газ (неон) находится при температуре 400 К. Данный газ изохорно нагревается до температуры 850 К. При какой температуре изотермического процесса, протекающего в том же интервале изменения давления, подводимая теплота будет равна теплоте, подводимой в изохорном процессе. Изобразить процессы в координатах PV и TS .

3.5. Идеальный газ (углекислый газ) находится при температуре 450 К. Данный газ изохорно нагревается до температуры 900 К. При какой температуре изотермического процесса, протекающего в том же интервале изменения давления, подводимая теплота будет равна теплоте, подводимой в изохорном процессе. Изобразить процессы в координатах PV и TS .

3.6. Двухатомный идеальный газ в результате политропного расширения переходит из состояния 1 в состояние 2. При этом его давление уменьшается в два раза. Далее газ адиабатно переводят в состояние 3, при этом объем газа принимает такое же значение, как и в состоянии 1, а давление превышает исходное давление в состоянии 1 в 2 раза. Изобразить процессы в координатах PV и TS , определить показатель политропы n и пояснить теплоэнергетические преобразования в процессах.

3.7. Одноатомный идеальный газ в результате политропного расширения переходит из состояния 1 в состояние 2. При этом его давление уменьшается в два раза. Далее газ адиабатно переводят в состояние 3, при этом объем газа принимает такое же

значение, как и в состоянии 1, а давление превышает исходное давление в состоянии 1 в два раза. Схематично изобразив процессы в координатах TS , определить показатель политропы n и пояснить теплоэнергетические преобразования в процессах.

3.8. Двухатомный идеальный газ в результате политропного процесса расширяется от состояния 1 до состояния 2. Далее газ изохорно нагревают, при этом подводят количество теплоты, равное $\frac{1}{3}$ работы расширения в процессе 1–2. Температура после изохорного нагревания станет равной исходной температуре T_1 . Схематично изобразить процессы в координатах PV и TS и определить показатель политропы. Привести схему теплоэнергетических преобразований.

3.9. Трехатомный идеальный газ в результате политропного процесса расширяется от состояния 1 до состояния 2. Далее газ изохорно нагревают, при этом подводят количество теплоты, равное половине работы расширения в процессе 1–2. Температура после изохорного нагревания станет равной исходной температуре T_1 . Схематично изобразить процессы в координатах PV и TS и определить показатель политропы. Привести схему теплоэнергетических преобразований.

3.10. Одноатомный идеальный газ в результате политропного процесса расширяется от состояния 1 до состояния 2. Далее газ изохорно нагревают, при этом подводят количество теплоты, равное $\frac{2}{3}$ работы расширения в процессе 1–2. Температура после изохорного нагревания станет равной исходной температуре T_1 . Схематично изобразить процессы в координатах PV и TS и определить показатель политропы. Привести схему теплоэнергетических преобразований.

Влажный воздух

При решении задач 4.1–4.10 использовать диаграмму S - h -состояний (прил. 3). Также можно воспользоваться Интернет-ресурсом: <http://energoworld.ru/library/is-diagramma-sostoyaniya-vody-i-vodyanogo-para/>.

4.1. 3 кг пара с начальными параметрами $P_1 = 30$ бар и $t_1 = 250$ °С расширяется адиабатно с понижением давления

до $P_2 = 8$ бар. Определить температуру t_2 , степень сухости расширенного пара, а также изменение внутренней энергии пара и совершенную работу в этом процессе. Рассчитать данные величины для модели идеального газа и сравнить полученные результаты. Молярную массу идеального газа принять $M = 27 \cdot 10^{-3}$ кг/моль.

4.2. 4 кг пара с начальными параметрами $P_1 = 40$ бар и $t_1 = 270$ °С расширяется адиабатно с понижением давления до $P_2 = 7$ бар. Определить конечную температуру t_2 , степень сухости расширенного пара, изменение внутренней энергии пара и совершенную работу. Рассчитать данные величины для модели идеального газа и сравнить полученные результаты. Молярную массу идеального газа принять $M = 27 \cdot 10^{-3}$ кг/моль.

4.3. 0,6 кг пара с начальными параметрами $P_1 = 0,2$ бар, $t_1 = 50$ °С и степенью сухости $x_1 = 0,96$ адиабатно сжимается с повышением давления до величины $P_2 = 1,0$ бар. Определить температуру t_2 , изменение внутренней энергии пара и совершенную работу. Рассчитать данные величины для модели идеального газа и сравнить полученные результаты. Молярную массу идеального газа принять $M = 27 \cdot 10^{-3}$ кг/моль.

4.4. 1,6 кг пара со степенью сухости 0,95 при давлении $P_1 = 0,2$ бар изотермически расширяется до давления $P_2 = 0,5$ бар. Определить количество теплоты, подводимой к системе, изменение внутренней энергии и работу расширения. Считая пар идеальным газом с $M = 27 \cdot 10^{-3}$ кг/моль, повторить расчет для идеального газа и сравнить полученные результаты.

4.5. 3,5 кг пара со степенью сухости 0,9 при давлении $P_1 = 4,0$ бар изотермически расширяется до давления $P_2 = 1,6$ бар. Определить количество теплоты, подведенной к системе, изменение внутренней энергии и работу расширения. Произвести аналогичный расчет для идеального газа с $M = 28 \cdot 10^{-3}$ кг/моль.

4.6. 1,6 кг пара со степенью сухости 0,91 и при давлении $P_1 = 6,0$ бар изобарно нагревается до температуры $t_2 = 190$ °С. Определить количество подведенной теплоты, изменение внутренней энергии и работу, совершенную за процесс, изменение энтропии и энтальпии системы.

4.7. 1,9 кг пара со степенью сухости 0,94 и при давлении $P_1 = 20$ бар изобарно нагревается до температуры $t_2 = 260$ °С.

Определить количество подведенной теплоты, изменение внутренней энергии, совершенную работу, изменение температуры, энтропии и энтальпии системы.

4.8. 6,5 кг пара со степенью сухости 0,95 и при давлении $P_1 = 19$ бар изохорно нагревается до температуры $t_2 = 250$ °С. Определить количество подведенной теплоты, изменение внутренней энергии, изменение давления, энтропии и энтальпии системы.

4.9. 7,3 кг пара со степенью сухости 0,92 и при давлении $P_1 = 1,6$ бар изохорно нагревается до температуры $t_2 = 165$ °С. Определить количество подведенной теплоты, изменение внутренней энергии в этом процессе, изменение энтропии и энтальпии системы.

4.10. 1,8 кг пара, степень сухости которого 0,93 и давление $P_1 = 9$ бар в результате изохорного процесса переходит в состояние с температурой $t_2 = 200$ °С. Определить подведенную теплоту и изменение внутренней энергии в этом процессе. Какое количество воды перешло в газовую фазу в результате данного процесса?

Термодинамика газовых потоков

Решение задач 5.1.–5.10. необходимо начинать с формулирования основного закона термодинамики для потока. Проверить условие запираания потока (критическое сечение).

5.1. Азот из компрессора поступает в канал с изменяющимся сечением. Параметры азота на входе канала $P_1 = 0,2$ МПа, $T_1 = 320$ К и скорость $w_1 = 280$ м/с. Давление на выходе канала $P_2 = 0,12$ МПа, а площадь выходного сечения $A = 11 \cdot 10^{-4}$ м². Показатель адиабаты рассчитать как для идеального газа. Удельная газовая постоянная $R = 0,296$ кДж/(кг·К), удельная теплоемкость при постоянном давлении равна $C_p = 1,035$ кДж/(кг·К). Определить скорость на выходе канала, объемный и массовый расход газа.

5.2. Азот из компрессора поступает в канал с диффузором. Параметры поступающего потока азота: $P_1 = 0,3$ МПа, $T_1 = 320$ К и скорость потока $w_1 = 230$ м/с. Давление на выходе канала $P_2 = 0,18$ МПа, площадь выходного сечения $A = 11 \cdot 10^{-4}$ м². Показатель адиабаты $k = 1,4$. Удельная газовая постоянная $R_m = 0,296$ кДж/(кг·К), удельная теплоемкость при постоянном

давлении $C_p = 1,035$ кДж/(кг·К). Определить скорость на выходе канала и расход газа.

5.3. Азот из компрессора поступает в канал с диффузором. Параметры поступающего потока азота: $P_1 = 0,2$ МПа, $T_1 = 320$ К и скорость потока $w_1 = 130$ м/с. Давление на выходе канала $P_2 = 0,156$ МПа, площадь выходного сечения $A = 11 \cdot 10^{-4}$ м². Показатель адиабаты $k = 1,4$. Удельная газовая постоянная $R_m = 0,296$ кДж/(кг·К), удельная теплоемкость при постоянном давлении $C_p = 1,035$ кДж/(кг·К). Определить скорость на выходе канала и расход газа.

5.4. Отработанные газы выпускаются из цилиндра при давлении в цилиндре $P_1 = 0,55$ МПа и температуре $t_1 = 1250$ °С. Давление за выпускным каналом $P_0 = 0,11$ МПа, а площадь сечения канала $A_2 = 12,5 \cdot 10^{-6}$ м². Принять, что коэффициент скорости $\varphi_c = 0,86$, а коэффициент расхода $\mu = 0,82$. Удельная газовая постоянная $R_m = 0,287$ кДж/(кг·К), показатель адиабаты $k = 1,33$. Определить скорость истечения, массовый расход выпускных газов, их температуру и плотность на выходе из цилиндра.

5.5. Из сопла Лавалья вытекает газ. Диаметр узкого (критического) сечения сопла равен $d_{кр} = 5 \cdot 10^{-3}$ м. Скорость на входе сопла $w_1 = 150$ м/с, на выходе $w_2 = 1300$ м/с. Параметры воздуха на входе $P_1 = 14$ МПа; $t_1 = 850$ °С. Удельная теплоемкость при постоянном давлении $C_p = 1,003$ кДж/(кг·К), показатель адиабаты $k = 1,33$, удельная газовая постоянная $R_m = 287$ кДж/(кг·К). Определить давление P_2 , площадь критического сечения сопла, а также параметры – температуру, плотность и расход воздуха на выходе сопла.

5.6. В центробежном компрессоре происходит адиабатное сжатие воздуха. Показатель адиабаты $k = 1,4$. Удельная работа сжатия составляет 66 кДж/кг. Температура на входе в рабочее колесо компрессора $t_1 = 17$ °С, давление равно 1,1 МПа, а скорость 125 м/с. На выходе температура 42 °С. Изобарная теплоемкость составляет 1,003 кДж/(кг·К). Определить скорость воздуха на выходе из центробежного компрессора. Какое давление установится в резервуаре при адиабатном торможении этого потока?

5.7. В процессе впуска в цилиндр дизеля засасывается атмосферный воздух, имеющий параметры $P_1^* = 0,1$ МПа и $t_1 = 27$ °С.

Определить давление, которое установится в цилиндре после адиабатного торможения потока, если скорость воздуха на входе в цилиндр 110 м/с, а коэффициент скорости во впускном канале $\varphi_c = 0,83$

5.8. Кислород из компрессора поступает в канал с диффузором. Параметры поступающего потока кислорода: $P_1 = 0,25$ МПа, $T_1 = 315$ К и скорость потока 330 м/с. Давление на выходе канала $P_2 = 0,16$ МПа, площадь выходного сечения $A = 10 \cdot 10^{-4}$ м². Показатель адиабаты $k = 1,4$. Удельная газовая постоянная $R_m = 0,268$ кДж/(кг·К), удельная теплоемкость при постоянном давлении $C_p = 1,032$ кДж/(кг·К). Определить скорость потока на выходе канала и массовый расход кислорода.

5.9. В центробежном компрессоре происходит адиабатное сжатие азота. Удельная работа сжатия составляет 66,2 кДж/кг. Температура на входе в рабочее колесо компрессора $T_1 = 290$ К, давление равно 0,8 МПа, а скорость 120 м/с. На выходе температура 310 К. Изобарная теплоемкость составляет 1,004 кДж/(кг·К). Определить скорость азота на выходе из центробежного компрессора. Какое давление установится в резервуаре при адиабатном торможении этого потока?

5.10. В центробежном компрессоре происходит адиабатное сжатие кислорода. Удельная работа сжатия составляет 65,7 кДж/кг. Температура на входе в рабочее колесо компрессора $t_1 = 20$ °С, давление равно 0,6 МПа, а скорость 130 м/с. На выходе температура 44 °С. Изобарная теплоемкость составляет 1,002 кДж/(кг·К). Определить скорость кислорода на выходе из центробежного компрессора. Какое давление установится в резервуаре при адиабатном торможении этого потока?

Термодинамические циклы

6.1. Тепловая машина работает по циклу Карно. Температура T_1 в режиме изотермического расширения равна 1300 К, а в режиме изотермического сжатия – 420 К. Давление в начале изотермического сжатия составляет 0,05 МПа. При изотермическом расширении рабочему телу сообщается теплота $q_1 = 37$ кДж/кг. В качестве рабочего тела использован азот

с показателем адиабаты $k = 1,4$, газовая постоянная $R_m = 0,297$ кДж/(кг·К). Определить параметры цикла в характерных точках, степень сжатия и степень повышения давления, работу за цикл и КПД. Построить цикл в координатах PV и TS .

6.2. Тепловая машина работает по циклу Карно. Температура T_1 в режиме изотермического расширения равна 1200 К, а в режиме изотермического сжатия – 395 К. Давление в начале изотермического сжатия составляет 0,07 МПа. При изотермическом расширении рабочему телу сообщается теплота $q_1 = 48$ кДж/кг. В качестве рабочего тела использован азот с показателем адиабаты $k = 1,4$, газовая постоянная $R_m = 0,297$ кДж/(кг·К). Определить параметры цикла в характерных точках, степень сжатия и степень повышения давления, работу за цикл и КПД. Построить цикл в координатах PV и TS .

6.3. Тепловая машина работает по циклу Карно. Температура T_1 в режиме изотермического расширения равна 1190 К, а в режиме изотермического сжатия – 380 К. Давление в начале изотермического сжатия составляет 0,08 МПа. При изотермическом расширении рабочему телу сообщается теплота $q_1 = 38$ кДж/кг. В качестве рабочего тела использован азот с показателем адиабаты $k = 1,4$, газовая постоянная $R_m = 0,297$ кДж/(кг·К). Определить параметры цикла в характерных точках, степень сжатия и степень повышения давления, работу за цикл и КПД. Построить цикл в координатах PV и TS .

6.4. Тепловая машина работает по циклу со смешанным подводом тепла (цикл Тринклера) при следующих начальных параметрах: давление в начале адиабатного сжатия $P_1 = 0,1$ МПа, а температура в этой точке $T_1 = 290$ К. Рабочее тело воздух – показатель адиабаты $k = 1,4$, газовая постоянная $R = 0,287$ кДж/кг·К рабочему телу подводится тепло в изохорном процессе $q_V = 350$ кДж/кг, а в изобарном процессе $q_p = 500$ кДж/кг. Степень сжатия $\varepsilon = 15$. Определить параметры цикла Тринклера в характерных точках, построить цикл в координатах PV и TS и рассчитать КПД. Сравните КПД этого цикла с КПД цикла Карно, при том же перепаде температур.

6.5. Тепловая машина работает по циклу Тринклера при следующих начальных параметрах: давление в начале адиабатно-

го сжатия $P_1 = 0,095$ МПа, температура в этой точке $T_1 = 280$ К. Рабочее тело – воздух (показатель адиабаты $k = 1,4$, газовая постоянная $R = 0,287$ кДж/кг), к нему подводится тепло в изохорном процессе $q_V = 450$ кДж/кг, а в изобарном процессе $q_p = 600$ кДж/кг. Степень сжатия $\varepsilon = 18$. Определить параметры цикла Тринклера в характерных точках, построить цикл в координатах PV и TS и рассчитать его КПД. Сравните КПД этого цикла с КПД цикла Карно, при том же перепаде температур.

6.6. Тепловая машина работает по циклу Тринклера при следующих начальных параметрах: давление в начале адиабатного сжатия $P_1 = 0,09$ МПа, а температура в этой точке равна $T_1 = 282$ К. Рабочее тело – воздух (показатель адиабаты $k = 1,4$, газовая постоянная $R = 0,287$ кДж/кг). В изохорном процессе подводится тепло $q_V = 350$ кДж/кг, а в изобарном процессе $q_p = 550$ кДж/кг. Степень сжатия $\varepsilon = 19$. Определить параметры цикла Тринклера в характерных точках, построить цикл в координатах PV и TS и рассчитать его КПД. Сравните КПД этого цикла с КПД цикла Карно, при том же перепаде температур.

6.7. Тепловая машина работает по циклу Отто. Давление и температура в начале адиабатного сжатия равны соответственно $P_1 = 0,11$ МПа, $T_1 = 290$ К. Степень сжатия $\varepsilon = 10$. В качестве рабочего тела использован воздух. Определить работу за цикл, подведенную теплоту, термодинамические параметры в характерных точках, КПД цикла и построить цикл в координатах PV и TS . Учесть, что удельная теплоемкость равна $C_V = 0,719$ кДж/(кг·К), а степень повышения давления $\lambda = 2,5$.

6.8. Тепловая машина работает по циклу Отто. Давление и температура в начале адиабатного сжатия равны соответственно $P_1 = 0,12$ МПа, $T_1 = 295$ К. Степень сжатия $\varepsilon = 11$. В качестве рабочего тела использован воздух. Определить работу за цикл, подведенную теплоту, термодинамические параметры в характерных точках, КПД цикла и построить цикл в координатах PV и TS . Учесть, что удельная теплоемкость равна $C_V = 0,72$ кДж/(кг·К), а степень повышения давления $\lambda = 2,3$.

6.9. Тепловая машина работает по циклу Дизеля. Давление и температура в начале адиабатного сжатия равны соответственно $P_1 = 0,11$ МПа, $T_1 = 290$ К. Степень сжатия $\varepsilon = 18$. В качестве

рабочего тела использован воздух. Определить работу за цикл, подведенную теплоту, термодинамические параметры в характерных точках, КПД цикла и построить цикл в координатах PV и TS . Учесть, что удельная теплоемкость равна $C_p = 1,007$ кДж/(кг·К), а степень предварительного расширения $\rho = 2,5$.

6.10. Тепловая машина работает по циклу Дизеля. Давление и температура в начале адиабатного сжатия равны соответственно $P_1 = 0,09$ МПа, $T_1 = 285$ К. Степень сжатия $\varepsilon = 19,5$. В качестве рабочего тела использован воздух. Определить работу за цикл, подведенную теплоту, термодинамические параметры в характерных точках, КПД цикла и построить цикл в координатах PV и TS . Учесть, что удельная теплоемкость равна $C_p = 1,007$ кДж/(кг·К), а степень предварительного расширения $\rho = 3$.

ПРИЛОЖЕНИЕ

1. Средняя теплоемкость газов для различных температур

Газ	Температура, К					
	500	600	700	800	900	1000
Водород Н ₂	28,92	29,02	29,15	29,28	29,42	29,57
Азот N ₂	29,58	29,80	30,01	30,22	30,44	30,65
Кислород O ₂	30,28	30,87	31,34	31,74	32,09	32,39
Угарный газ CO	29,74	29,99	30,24	30,47	30,69	30,92
Углекислый газ CO ₂	42,02	43,43	44,56	45,52	46,37	47,15
Пары воды H ₂ O	34,49	34,99	35,5	36,02	36,54	37,06
Сероводород H ₂ S	35,51	36,28	37,05	37,82	38,59	39,36
Оксид азота NO ₂	43,40	44,79	45,90	46,84	47,67	48,42
Метан CH ₄	41,16	44,06	46,85	49,52	52,08	54,52
Этан C ₂ H ₆	66,21	72,27	77,94	83,24	88,14	92,66

Средние изобарные молярные теплоёмкости C_p , кДж/(моль·К) приведены для температурного интервала от 298 К до указанной в таблице температуры [10].

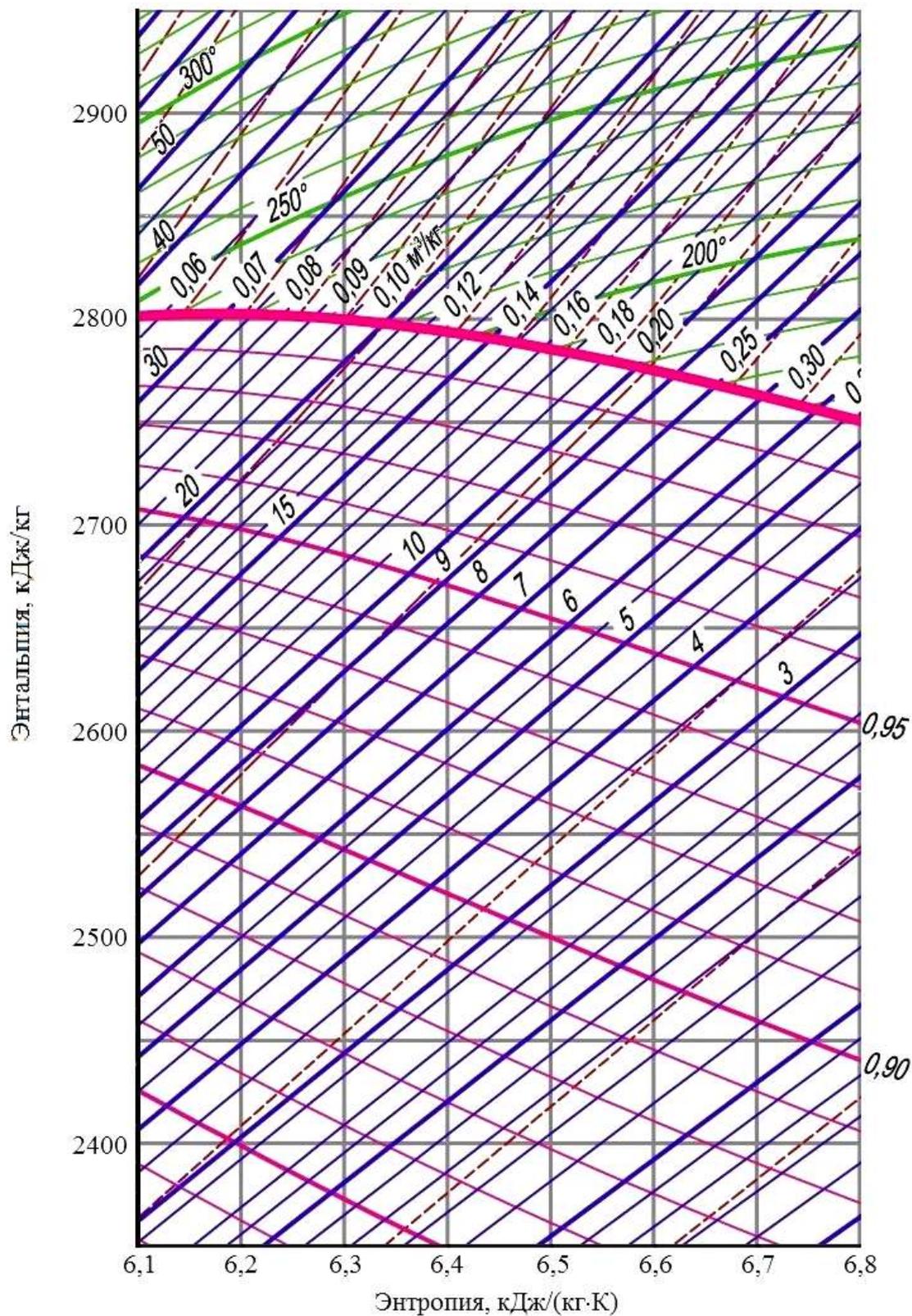
2. Истинная теплоемкость простых веществ и соединений

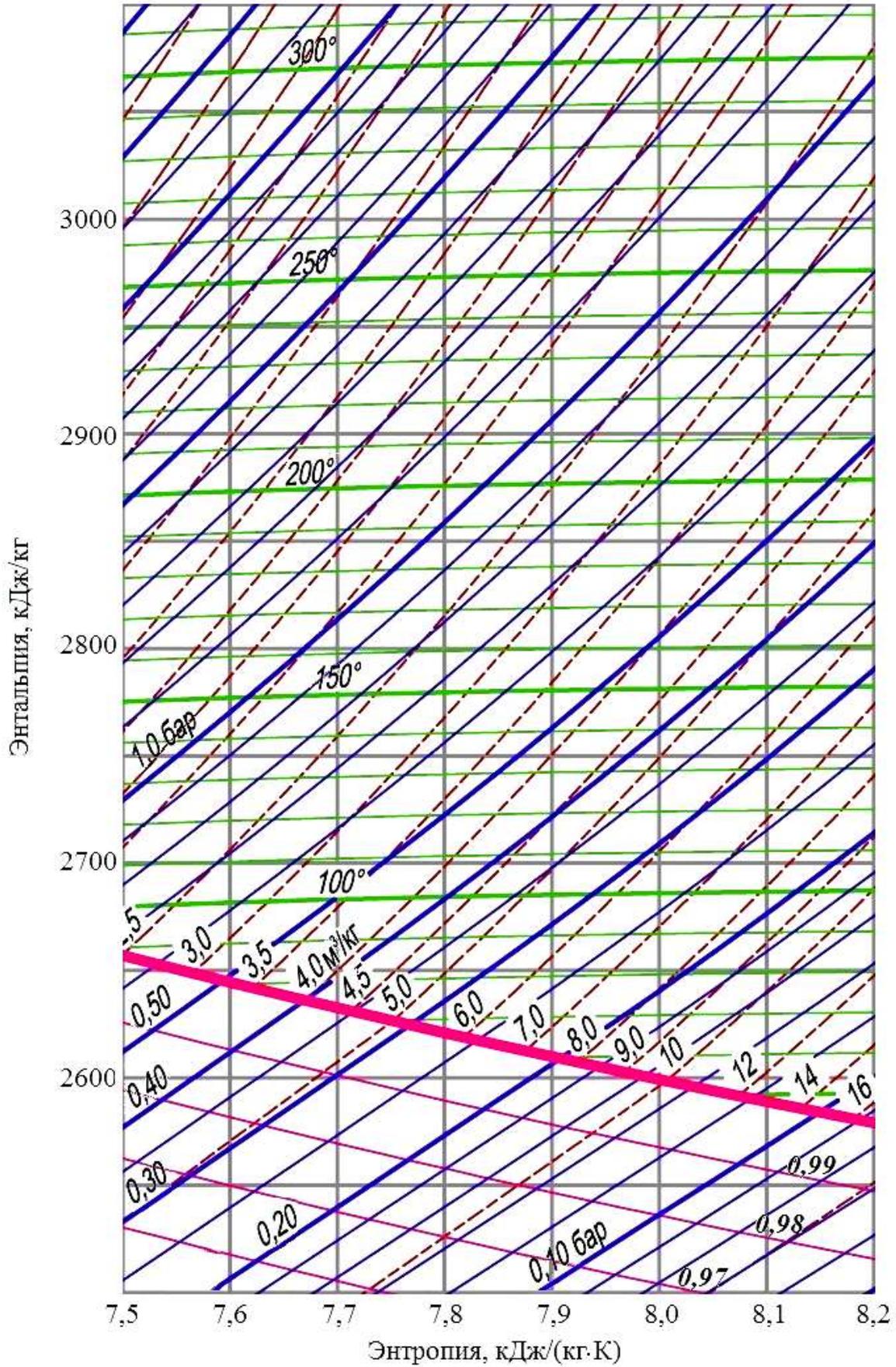
Газы	$C_{p,298}$, кДж/(моль·К)	Коэффициенты уравнения				Темпер. интервал, К
		a	$b \cdot 10^3$	$c' \cdot 10^{-5}$	$c \cdot 10^6$	
Водород Н ₂	28,83	27,28	3,26	0,50	–	298–3000
Азот N ₂	29,12	27,88	4,27	–	–	298–2500
Кислород O ₂	29,37	31,46	3,39	– 3,77	–	298–3000
Угарный газ СО	29,14	28,41	4,1	– 0,46	–	298–2500
Углекислый газ СО ₂	37,11	44,14	9,04	– 8,54	–	298–2500
Пары воды Н ₂ О	33,61	30,00	10,71	0,33	–	298–2500
Сероводород Н ₂ S	33,44	29,37	15,4	–	–	298–1800
Оксид азота NO ₂	36,66	41,16	11,33	– 7,02	–	298–2000
Метан СН ₄	35,71	14,32	74,66	–	– 17,43	298–1500
Этан С ₂ Н ₆	52,64	5,75	175,1	–	– 57,85	298–1500

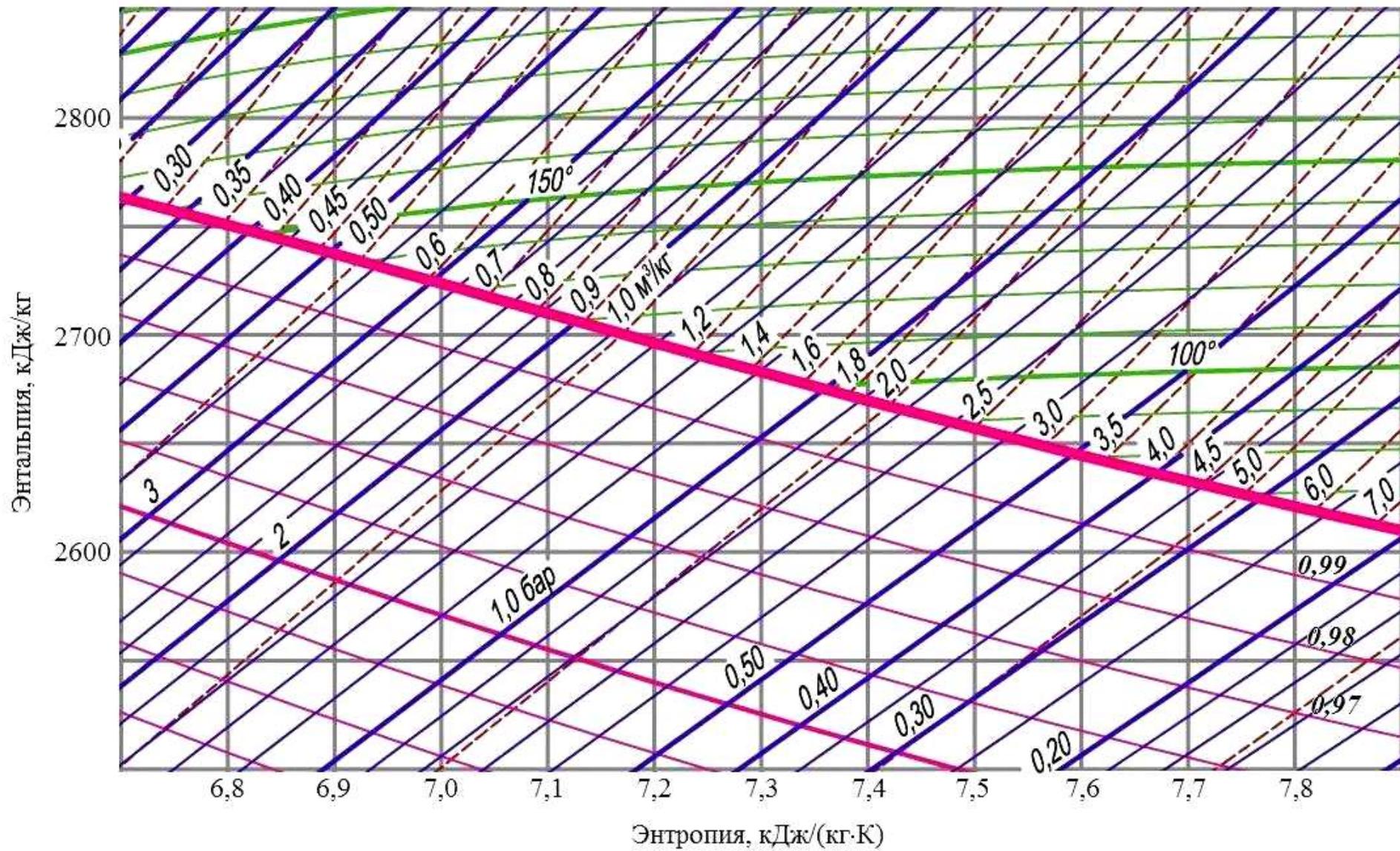
Теплоемкость аппроксимируется уравнениями:
 $C_p = a + bT + c'/T^2$ (для простых и неорганических веществ) или
 $C_p = a + bT + cT^2$ (для органических веществ). Указана истинная теплоемкость при 298 К [10].

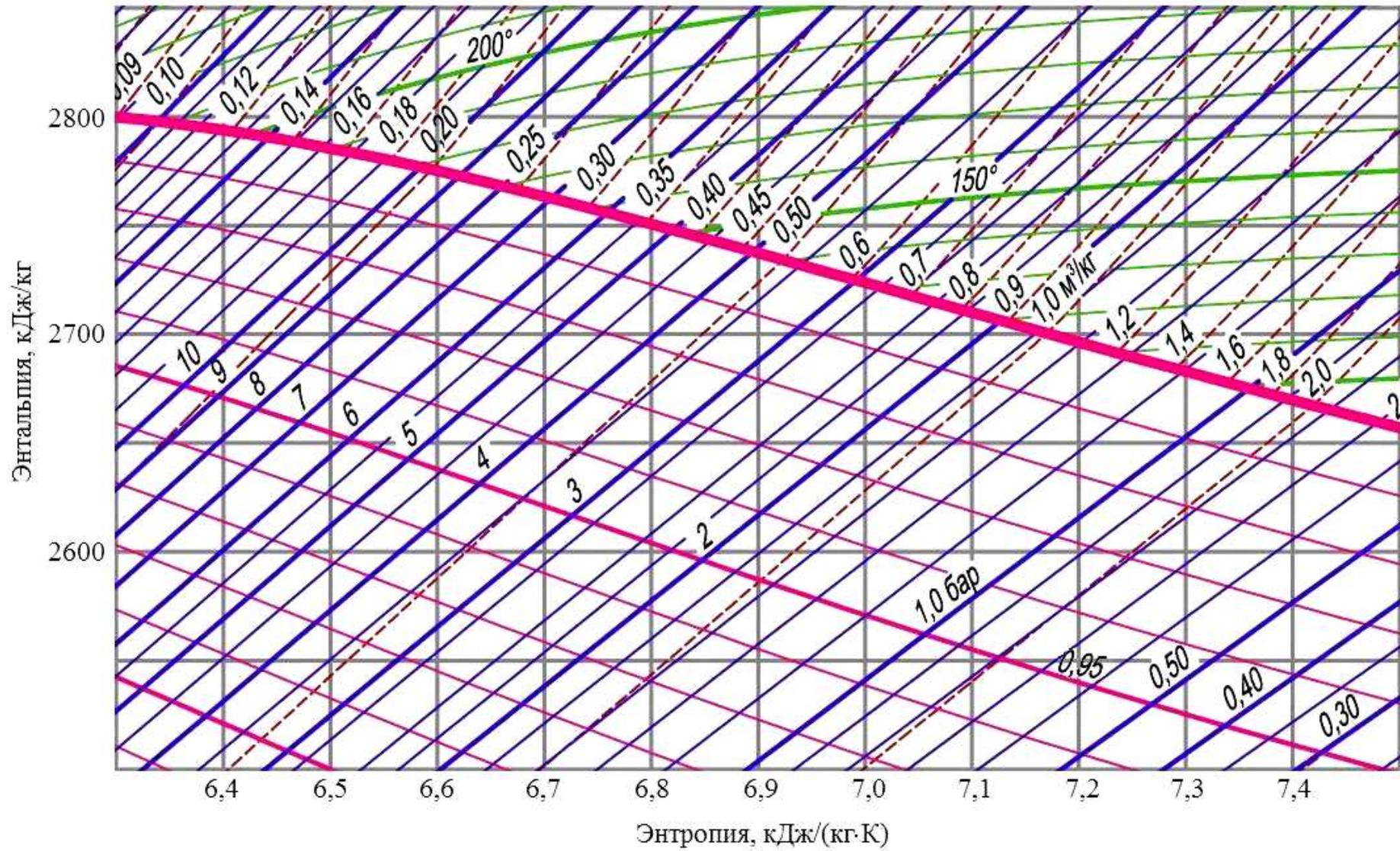
3. $S-h$ диаграмма водяного пара

Ниже приведены разные участки диаграммы, необходимые для решения задач 4.1–4.10.









4. Теплопроводность некоторых веществ [10]

Вещество	Теплопроводность, Вт/(м·К)
Серебро	407
Свинец	35
Медь	384
Сталь	47
Накипь	3,0
Лед	2,2
Бетон	1,2
Песчаник	2,0

Составители
Валерий Васильевич Дырдин
Анатолий Александрович Мальшин
Вячеслав Геннадьевич Смирнов

ТЕПЛОТЕХНИКА

Методические указания к контрольной работе
для студентов направления подготовки 21.05.04 «Горное дело»
заочной формы обучения

Печатается в авторской редакции

Подписано в печать 18.04.2016. Формат 60×84/16.

Бумага офсетная. Отпечатано на ризографе.

Уч.-изд. л. 1,5. Тираж 56 экз. Заказ.

КузГТУ. 650000, Кемерово, ул. Весенняя, 28.

Издательский центр КузГТУ. 650000, Кемерово, ул. Д. Бедного, 4А.