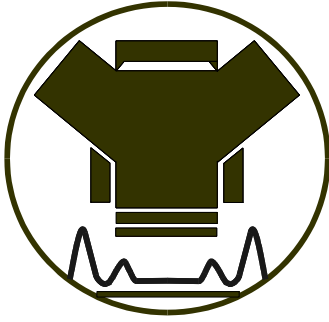


**МИНИСТЕРСТВО ОБРАЗОВАНИЯ И НАУКИ
УКРАИНЫ**



**Совместный факультет ВУЗ “ХТИ” и
ХНАДУ**

Кафедра “Двигателей внутреннего сгорания”

**РАБОЧАЯ ПРОГРАММА
И МЕТОДИЧЕСКИЕ УКАЗАНИЯ**

**к контрольной работе по дисциплинам
“Теоретические основы теплотехники” и “Термодинамика и
теплотехника” для студентов ФЗО специальностей
7.090288, 7.090214, 7.092501**

Харьков, 2002

МИНИСТЕРСТВО ОБРАЗОВАНИЯ И НАУКИ УКРАИНЫ

Совместный факультет ВУЗ “ХТИ” и ХНАДУ

Кафедра “Двигателей внутреннего сгорания”

**РАБОЧАЯ ПРОГРАММА
И МЕТОДИЧЕСКИЕ УКАЗАНИЯ
к контрольной работе по дисциплинам
“Теоретические основы теплотехники” и “Термодинамика и
теплотехника” для студентов ФЗО специальностей
7.090288, 7.090214, 7.092501**

Харьков, ХНАДУ, 2002

**МИНИСТЕРСТВО ОБРАЗОВАНИЯ И НАУКИ
УКРАИНЫ**

Совместный факультет ВУЗ “ХТИ” и ХНАДУ

Кафедра “Двигателей внутреннего сгорания”

**РАБОЧАЯ ПРОГРАММА
И МЕТОДИЧЕСКИЕ УКАЗАНИЯ
к контрольной работе по дисципли-
нам**

**“Теоретические основы теплотехники” и “Термодинамика и
теплотехника” для студентов ФЗО специальностей
7.090288, 7.090214, 7.092501**

**Утверждено на методическом
совете университета
Протокол № 1 от 19.10.2001**

Харьков, ХНАДУ, 2002

Составители: Талда Геннадий Борисович
Ефремов Андрей Александрович

Кафедра двигателей внутреннего сгорания

Общие указания

Теплотехника – наука о применении теплоты в технике. Она состоит из теоретических основ теплотехники и прикладной теплотехники. Теоретические основы теплотехники изучают явления, процессы, законы и расчетные зависимости, связанные с преобразованием, передачей и получением теплоты. В прикладной теплотехнике рассматриваются вопросы теории, устройства, работы и эксплуатации различных тепловых установок. Теоретические основы теплотехники состоят из технической термодинамики, теории тепло- и массообмена и теории процессов горения. Прикладная теплотехника включает топки и котельные установки, паровые и газовые турбины, двигатели внутреннего сгорания и др.

Для специальностей 7.090214 и 7.090228 программой предусмотрено только изучение технической термодинамики и теплопередачи. По специальности 7.092501 дополнительно изучаются циклы паросиловых установок, топлива, котельные установки.

Во время установочной сессии студент-заочник знакомится с основными положениями курса, получает общие методические указания к изучению дисциплины и сведения о рекомендуемой литературе. Поэтому программный материал должен изучаться путем самостоятельной работы студента над учебной литературой.

Цель настоящих методических указаний – оказать студенту помощь в организации такой работы. Методические указания содержат программные вопросы курса по разделам и темам, конкретные указания к их изучению, а также вопросы для самоконтроля знаний.

При изучении каждого раздела курса рекомендуется составлять краткий конспект и решать задачи для закрепления теоретического материала. Параллельно следует решать соответствующие задачи контрольной работы, руководствуясь рекомендациями, приведенными в настоящих методических указаниях.

С учетом программы курса для специальностей 7.090214 и 7.090228 в контрольной работе должны быть представлены решения задач 1-5, а для специальности 7.092501 – всех шести задач.

Контрольные работы должны быть выполнены и оформлены в полном соответствии с требованиями настоящих методических указаний.

Программа курса и указания к его изучению

ВВЕДЕНИЕ

Энергетика и ее значение в народном хозяйстве страны. Тепловые установки и их роль в энергетике страны. Топливные ресурсы и топливный баланс. Энергетическое и технологическое использование теплоты.

История развития теплоэнергетики и теплотехники. Роль отечественных ученых в развитии теплотехники.

Проблемы эффективного использования топливно-энергетических ресурсов и защиты окружающей среды от “теплого” загрязнения и загрязнения продуктами сгорания топлива.

У к а з а н и я. Изучив материалы, связанные с этой темой, необходимо твердо усвоить значение и место энергетики в народном хозяйстве страны, знать историю развития теплотехники и теплоэнергетики.

Л и т е р а т у р а: [2 с. 4-5].

Вопросы для самопроверки

1. Каково значение теплоэнергетики в народном хозяйстве нашей страны?
2. Каковы преимущества тепловых электростанций перед другими видами станций?
3. Каковы перспективы дальнейшего развития энергетики нашей страны?
4. Назовите примеры использования тепла в различных отраслях народного хозяйства.
5. Расскажите о вкладе отечественных ученых в теплотехнику и энергетику.

Р а з д е л 1. ТЕХНИЧЕСКАЯ ТЕРМОДИНАМИКА

Т е м а 1. Термодинамическая система и термодинамическое состояние. Смеси газов.

Предмет и метод технической термодинамики. Термодинамическая система. Рабочее тело. Основные параметры термодинамического состояния. Равновесное и неравновесное состояние. Уравнение состояния идеального газа. Универсальная и характеристическая газовые постоянные. Закон Авагадро.

Термодинамический процесс. Равновесные и неравновесные процессы. Обратимые и необратимые процессы. Изображение термодинамического состояния и термодинамического процесса в pV - и Ts -координатах. Смеси рабочих тел. Способы задания состава смеси, соотношение между массовыми и объемными долями. Определение параметров состояния смеси, определение кажущейся молекулярной массы и газовой постоянной смеси. Определение парциального давления компонентов смеси.

У к а з а н и я. Материалы этой темы представляют собой необходимый комплекс определений и понятий, на базе которых излагаются последующие темы. Особое внимание уделите четкому усвоению этих понятий и определений.

Л и т е р а т у р а: [1, с.7-17; 3; с.6-18].

Вопросы для самопроверки

1. Что понимается под термодинамической системой?
2. Какой газ называется идеальным?
3. Можно ли азот, кислород и воздух считать идеальными газами при достаточно низких температурах и при больших давлениях?
4. Можно ли водяной пар считать идеальным газом при достаточно больших температурах и малых давлениях?
5. Каким числом независимых параметров характеризуется состояние рабочего тела?
6. В чем состоит закон Авагадро?
7. Что такое киломоль вещества? Какой объем занимает киломоль любого газа при нормальных условиях?
8. Какова разница между характеристической и универсальной газовыми постоянными? Напишите уравнение состояния идеального газа и приведите единицы измерения входящих в него величин.
9. Что такое абсолютное, избыточное (манометрическое) и барометрическое давление и какова связь между ними? Что такое нормальные условия?
10. Что называется термодинамическим процессом?
11. Какие процессы называются равновесными и какие неравновесными?
12. Какие процессы называются обратимыми и какие необратимыми?
13. Каковы условия обратимости процессов?
14. Как формулируется закон Дальтона для смеси идеальных газов?
15. Какими способами можно задать смесь? Что такое приведенный (парциальный) объем компонента смеси?
16. В каких пределах может меняться газовая постоянная смеси, состоящей из азота и водорода?

Т е м а 2. Первый закон термодинамики

Теплота как форма передачи энергии. Теплоемкость газа. Массовая, объемная и молярная теплоемкости, связь между ними. Зависимость теплоемкости от характера процесса изменения состояния. Теплоемкость при постоянном давлении и теплоемкость при постоянном объеме. Уравнение Майера, показатель адиабаты. Зависимость теплоемкости от температуры. Средняя и истинная теплоемкости. Определение количества теплоты при линейной и криволинейной зависимости теплоемкости от температуры. Теплота как функция процесса. Теплоемкость смеси идеальных газов.

Внутренняя энергия рабочего тела как функция его состояния. Изменение внутренней энергии в процессе изменения состояния газа.

Работа как форма передачи энергии. Определение работы в процессе изменения состояния газа в pV - диаграмме.

Сущность первого закона термодинамики, формулировки первого закона термодинамики, его аналитическое выражение.

Энтальпия газа как функция его состояния. Изменение энтальпии в процессе изменения состояния газа. Вторая форма записи первого закона термодинамики.

Энтропия газа как функция его состояния. Изменение энтропии в процессе изменения состояния газа. Определение теплоты, участвующей в процессе изменения состояния газа, в Ts -диаграмме. Термодинамическое тождество.

У к а з а н и я. При изучении этой темы особое внимание уделите следующим вопросам. Понятие теплоты и теплоемкости газа. Классификация теплоемкостей. Факторы, влияющие на теплоемкость (природа газа, характер термодинамического процесса, температура). Обратите внимание на принципиальное различие между удельной внутренней энергией как функций состояния газа и теплотой и работой как функциями процесса. Надо усвоить, что внутренняя энергия имеет вполне определенное значение для каждого состояния газа, тогда как теплота и работа появляются лишь в процессе изменения состояния газа и, следовательно, зависят от характера процесса.

Л и т е р а т у р а: [1, с.17-32; 2, с. 8-18] .

Вопросы для самопроверки

1. Как классифицируется теплоемкость? Приведите примеры обозначений различных видов теплоемкостей.

2. В чем отличие понятий “истинная теплоемкость” и “средняя теплоемкость”?

3. Почему внутренняя энергия и энтальпия идеального газа зависят только от одного параметра - температуры?

4. Дайте формулировку и аналитическое выражение первого закона термодинамики.

5. Когда теплота, работа и изменение внутренней энергии считаются положительными и когда отрицательными?

6. Как изображается работа в pV - диаграмме?

7. Как изображается теплота в Ts -диаграмме ?

Т е м а 3. Термодинамические процессы

Изохорный, изобарный, изотермический и адиабатный процессы. Соотношения между параметрами рабочего тела в начале и в конце процесса. Определение теплоты, работы, изменения внутренней энергии и изменения энтропии в процессе. Изображение процессов в pV - и Ts -координатах. Политропный процесс. Уравнение политропного процесса в pV - и Ts - координатах. Теплоемкость политропного процесса.

У к а з а н и я. Изучая эту тему обратите внимание на обобщающий характер политропного процесса. Научитесь рассчитывать различные термодинамические процессы и изображать их в pV - Ts - диаграммах.

Л и т е р а т у р а : [1, с. 44-57; 3, с.11-15].

Вопросы для самопроверки

1. Как называется процесс, в котором вся подведенная теплота идет на увеличение внутренней энергии?
2. Как называется процесс, в котором вся подведенная теплота идет на совершение работы?
3. Как называется процесс, в котором работа совершается лишь за счет уменьшения внутренней энергии?
4. Как называется процесс, в котором подведенная к рабочему телу теплота численно равна изменению энтальпии? Какая доля подведенной теплоты в этом случае идет на совершение работы?
5. Какой процесс называется политропным?
6. Покажите в Ts - диаграмме площадь, эквивалентную работе газа в адиабатном процессе.
7. При каких значениях показателя политропы n можно получить уравнения основных термодинамических процессов. В чем состоит обобщающее значение политропного процесса?
8. Изобразите схематично в Ts - диаграмме процесс сжатия $pv^{1.2}=const$ и покажите, какими площадями будут изображаться q , Δu и Δh .
9. Почему в Ts - диаграмме изохора идет круче, чем изобара, а в pv - диаграмме адиабата идет круче изотермы?
10. Как в Ts - диаграмме по заданной кривой процесса определить знак q , Δu ?

Т е м а 4. Второй закон термодинамики

Круговые термодинамические процессы или циклы. Прямые и обратные циклы. Обратимые и необратимые циклы. Оценки эффективности прямого и обратного циклов. Прямой обратимый цикл Карно и его термический КПД. Обратный цикл Карно и его холодильный коэффициент. Теорема Карно. Среднеинтегральные температуры процесса подвода или отвода теплоты. Обобщенный (регенеративный) цикл Карно. Сущность второго закона термодинамики и основные его формулировки. Аналитическое выражение второго закона термодинамики. Изменение энтропии и работоспособности изолированной термодинамической системы при обратимых и необратимых процессах.

Понятие об эксергии. Абсолютная температура. Статическое толкование второго закона термодинамики. Критика теории Клаузиуса о “тепловой смерти” Вселенной.

У к а з а н и я. При изучении этой темы необходимо усвоить следующие вопросы.

1. Так как КПД (η_t) цикла Карно всегда меньше единицы, не зависит от рода рабочего тела и имеет наибольшее значение по сравнению с η_t любых других циклов, ограниченных тем же интервалом температур, то: а) никакими новыми конструкциями тепловых двигателей или применением новых рабочих тел нельзя в цикле все подведенное тепло превратиться в полезную работу; б) для увеличения η_t нужно стремиться к таким процессам, образующим цикл, чтобы средняя температура подвода теплоты была как можно больше, а средняя температура отвода теплоты как можно меньше.

2. Нельзя смешивать понятия “энтропия тела” и “энтропия системы” Между этими понятиями существует принципиальная разница. Энтропия как функция состояния определенного тела (например газа или пара) обладает вполне определенным свойством - ее изменение при протекании какого-либо процесса не зависит от характера процесса, а зависит лишь от параметров тела в начальном и конечном его состояниях. Поэтому ее изменение

$$\Delta s = s_2 - s_1 = \int_1^2 dq/T$$
 может быть положительным, отрицательным или равным

нулю в зависимости от того, подводится или отводится теплота от тела или процесс происходит без теплообмена. Энтропия не является функцией состояния системы, состоящей из нескольких тел (рабочее тело, холодильники и источники теплоты), каждое из которых характеризуется своими параметрами. Поэтому на изменение энтропии системы влияет характер процесса теплообмена между рабочим телом и источниками теплоты. При протекании обратимых процессов энтропия системы остается постоянной, при необратимых процессах - растет.

3. Теория Клаузиуса “тепловой смерти” Вселенной несостоятельна. Для подтверждения этого можно привести следующие доводы:

а) дифференциальные соотношения термодинамики несправедливы для микромира, в котором расстояния между частицами материи сравнимы с дифференциалом исследуемого объема; б) решения дифференциальных уравнений в значительной мере зависят от конкретных условий на границе исследуемой области, на границе бесконечной Вселенной эти условия неизвестны; в) в изложении Больцмана второй закон имеет статистическое толкование, т.е. не является абсолютным законом природы; г) экспериментальные данные (броуновское движение, новые данные астрономии, космических полетов и др.) также не согласуются с теорией Клаузиуса.

Л и т е р а т у р а: [1, с. 33-44, 103-109; 3, с.20-30].

Вопросы для самопроверки

1. Какой цикл называется прямым и какой необратимым?
2. Чем оценивается эффективность прямого и обратного циклов?
3. Для чего служат тепловые машины, работающие по прямому и обратному циклам?

4. Как связано изменение энтропии с теплотой и абсолютной температурой?
5. В чем сущность второго закона термодинамики? Приведите его основные формулировки.
6. Покажите при помощи Ts -диаграммы, что при заданных T_{\max} и T_{\min} η_t цикла Карно будет наибольшим по сравнению с η_t других циклов.
7. Покажите при помощи Ts -диаграммы, что η_t цикла Карно не может быть равным единице.
8. Как с помощью выражения $ds=dq/T$ показать, что в круговом процессе не вся подведенная теплота превращается в полезную работу, а часть ее отдается холодильнику?
9. Покажите, в чем состоит общность различных формулировок второго закона термодинамики.

Т е м а 5. Циклы двигателей внутреннего сгорания (ДВС) и газотурбинных установок (ГТУ)

Анализ циклов ДВС с изохорным, изобарным и смешанным подводом теплоты. Характеристики этих циклов. Влияние характеристик цикла на его эффективность. Сравнительный анализ циклов ДВС. Пути повышения эффективности циклов ДВС.

Принцип действия ГТУ. Схема и анализ цикла ГТУ с изобарным подводом теплоты. Регенеративный цикл ГТУ. Преимущества ГТУ.

У к а з а н и я. Изучая циклы тепловых двигателей, обратите внимание на влияние характеристик цикла на их термический КПД. Отметьте недостатки поршневых ДВС и преимущества ГТУ.

Л и т е р а т у р а: [1, с.103-117, 3, с. 43-52; 56-60].

Вопросы для самопроверки

1. Какой цикл называется идеальным?
2. Почему процессы сжатия-расширения во всех идеальных циклах тепловых двигателей принимаются адиабатными?
3. Можно ли по характеру процесса подвода теплоты узнать, какой цикл рассматривается (поршневого или газотурбинного двигателя)?
4. Циклы каких двигателей характеризует изохорный отвод теплоты и почему?
5. С ростом какого параметра увеличивается термический КПД любого цикла?
6. Чем ограничивается степень сжатия у различных типов поршневых двигателей?

Тема 6. Термодинамика потока. Истечение газа и пара. Дросселирование

Основные понятия. Уравнение первого закона термодинамики для потока (уравнение энергии газового потока). Работа проталкивания и техническая работа. Уравнение Бернулли. Сопло и диффузор.

Адиабатное течение в сопло. Скорость и расход газа при адиабатном истечении. Истечение идеального газа из сужающегося сопла. Критическая скорость и критические параметры газа при течении его в сопле. Условия перехода через критическую скорость. Сопло Лаваля. Расчет сопла Лаваля для идеального газа. Параметры заторможенного потока.

У к а з а н и я. При изучении этой темы обратите внимание на те допущения, которые кладутся в основу вывода уравнения энергии газового потока. Следует твердо знать условия перехода от дозвуковых скоростей потока к сверхзвуковым, уметь рассчитывать сужающееся сопло и сопло Лаваля. Необходимо знать, как влияет трение на течение газа, и уметь изображать процессы течения с трением в Ts - и hs - диаграммах, объяснить, что такое давление и температура заторможенного потока.

Л и т е р а т у р а: [1, с.83-102; 3, с. 43-48].

Вопросы для самопроверки

1. Напишите уравнение первого закона термодинамики для газового потока и дайте объяснение отдельным членам, входящим в него.
2. Каков физический смысл критической скорости? Почему в закритической области расход газа не зависит от перепада давлений?
3. Что такое сопло и диффузор?
4. Какая величина называется располагаемой работой? Что называется технической работой?
5. Дайте описание сопла Лаваля.

Т е м а 7. Термодинамический анализ процессов в компрессоре

Классификация компрессоров и принцип их действия. Изотермическое, адиабатное и политропное сжатие в компрессоре. Работа на привод компрессора. Индикаторные диаграммы идеального и реального компрессоров. Объемный и действительный коэффициент подачи компрессора. Изотермический и адиабатный КПД компрессора. Многоступенчатое сжатие.

У к а з а н и я. При изучении темы необходимо уяснить два основных положения: 1) необходимость применения многоступенчатых компрессоров; 2) целесообразность применения промежуточного охлаждения между ступенями и охлаждения цилиндров компрессора.

Л и т е р а т у р а: [1, с. 94-103 ; 3, с.43-52; 56-60].

Вопросы для самопроверки

1. Как зависит работа привода компрессора от показателя политропы сжатия? Какова связь между работой привода (технической) и работой процесса сжатия?

2. Можно ли в одноступенчатом поршневом компрессоре получить любое конечное давление и если нельзя, то по каким причинам?

3. Как влияет показатель политропы сжатия на конечную температуру газа в одноступенчатом компрессоре?

4. В каком из поршневых компрессоров (быстроходном или тихоходном) показатель политропы сжатия будет больше?

Т е м а 8. Водяной пар. Циклы паросиловых установок

Процессы парообразования в $p\nu$ - и Ts - диаграммах. Определение параметров воды и водяного пара по таблицам и hs -диаграмме. Термодинамические процессы водяного пара.

Принципиальная схема простейшей паросиловой установки. Цикл Ренкина и его исследование. Влияние начальных и конечных параметров пара на КПД цикла Ренкина. Изображение цикла Ренкина в $p\nu$ - и Ts - диаграммах. Пути повышения экономичности паросиловых установок. Теплофикационный цикл.

У к а з а н и я. Необходимо четко уяснить, что расчетные формулы для идеального газа здесь недействительны. При расчете водяного пара нет простого и точного уравнения состояния как для идеального газа. Поэтому процессы с паром рассчитываются с помощью таблиц и hs - диаграммы.

Рассматривая циклы паросиловых установок, обратите внимание на следующие вопросы: 1) почему для пара не применяется цикл Карно, хотя изотермические процессы с влажным паром осуществляются достаточно просто?; 2) каковы преимущества цикла Ренкина перед циклом Карно?; 3) каковы способы повышения экономичности паросиловой установки?

Л и т е р а т у р а [1, с. 57-74, с. 117-127].

Вопросы для самопроверки

1. Что такое насыщенный и перегретый пар? Какие бывают виды насыщенного пара?

2. Покажите на $p\nu$ и Ts - диаграммах области воды, влажного и перегретого пара.

3. Что такое степень сухости пара?

4. Как на Ts - диаграмме показать удельную энтальпию кипящей жидкости; удельную теплоту парообразования и удельную теплоту перегрева пара?

5. Как влияют начальные и конечные параметры пара на термический КПД цикла Ренкина?

6. Для чего применяется вторичный перегрев пара.

7. В чем сущность регенеративного цикла паросиловых установок? Почему при регенерации повышается термический КПД цикла?

Р а з д е л 2. ОСНОВЫ ТЕПЛОПЕРЕДАЧИ

Тема 1. Теплопроводность, температурное поле и градиент температур. Закон Фурье.

Дифференциальное уравнение теплопроводности. Теплопроводность различных стенок.

У к а з а н и я. Рассматривая теплопроводность элементарных тел (пластинка, труба, шар), необходимо применить закон Фурье для каждого случая, т.е. вывести уравнения, определяющие закон распределения температур по толщине стенки и количество теплоты, передаваемой через стенку. При рассмотрении процесса передачи тепла через стенки научитесь анализировать влияние отдельных термических сопротивлений на общее сопротивление.

Л и т е р а т у р а: [1, с. 148-176; с.69-77].

Вопросы для самопроверки

1. Как передается теплота в процессе теплопроводности?
2. Сформулируйте основной закон теплопроводности.
3. Каков закон распределения температуры по толщине плоской и цилиндрической стенок?
4. При каком условии расчет цилиндрической стенки можно заменить расчетом плоской стенки?

Т е м а 2. Конвективный теплообмен

Основные понятия. Уравнение Ньютона-Рихмана. Коэффициент теплоотдачи. Основы теории подобия. Критерии подобия и их физический смысл. Критериальные уравнения теплоотдачи.

У к а з а н и я. Необходимо знать, что основная задача конвективного теплообмена – определение коэффициента теплоотдачи α . Расчет тепловых потоков (по формуле Ньютона) и температур не представляет больших трудностей. Сам же коэффициент теплоотдачи в подавляющем большинстве случаев определяется экспериментально с привлечением теории подобия. Эксперименты при этом проводятся в каких-то конечных интервалах изменения основных параметров (скоростей, температур, давлений и т.д.).

Л и т е р а т у р а: [1, с.196-205; 3, с.77-89].

Вопросы для самопроверки

1. Сформулируйте основной закон конвективного теплообмена.
2. Какой критерий характеризует вынужденную конвекцию?

Т е м а 3. Теплоперенос излучением

Основные понятия и определения. Законы лучистого теплообмена. Теплообмен излучением тел в прозрачной среде. Излучение газов. Теплообмен излучающих газов со стенкой.

У к а з а н и я. При изучении этой темы прежде всего уясните принципиальное отличие теплообмена излучением от теплообмена теплопроводностью и конвекцией. В отличие от теплопроводности и конвекции в процессе теплообмена излучением осуществления двойное превращение энергии – сначала тепловой энергии в энергию электромагнитного излучения, а затем наоборот. Поскольку тела поглощают лишь часть энергии электромагнитного излучения (частично отражая или пропуская ее через себя), то основной вопрос при исследовании теплообмена излучением - о количественном соотношении между отраженной, поглощенной и пропущенной через тело энергией. Действительно, при защите объектов от лучистой энергии на пути ее распространения нужно ставить экраны, максимально отражающие лучистую энергию. Наоборот, при необходимости получения максимального количества тепловой энергии за счет лучистой телу, воспринимающему лучистую энергию, нужно придать такие свойства, чтобы оно поглощало максимум ее (покрытие поверхности краской, шероховатость поверхности тела). И, наконец, если требуется, чтобы максимум лучистой энергии пропускался через твердую стенку (например свет), то выбирается стенка с соответствующими свойствами. Основные законы излучения и экспериментальные данные свойств отдельных тел позволяют решать конкретные задачи, связанные с лучистым теплообменом.

Так как в практике, как правило, участвуют все виды теплообмена (теплопроводность, конвекция и излучение) совместно, то при решении тех или иных задач необходимо достаточно четко представлять себе: а) все ли виды теплообмена имеются в рассматриваемом случае; б) какой из видов теплообмена преобладающий по сравнению с другими; в) можно ли пренебречь каким-либо видом теплообмена с целью упрощения решения задачи (без больших погрешностей).

Л и т е р а т у р а: [1, с. 229-241; 3, с. 90-97].

Вопросы для самопроверки

1. Какие длины волн ограничивают видимые и какие тепловые лучи?
2. Что происходит с лучистой энергией, падающей на поверхность твердого тела? Что такое абсолютно черное тело, абсолютно белое и диатермичное тела?

3. Дайте определение абсолютно черного и серого тел, поглотительной способности и степени черноты.

4. Докажите, что коэффициент поглощения серого тела равен степени (коэффициенту) его черноты.

5. Что такое “эффективное излучение”? Чем оно отличается от собственного излучения?

6. Для чего нужны экраны и какими свойствами они должны обладать?

7. Как определяется лучистый поток между параллельными плоскими стенками и для тела, находящегося внутри другого полого тела?

8. Каковы особенности излучения газов?

9. Как определяется степень черноты газовой среды?

Т е м а 4. Теплопередача и теплообменные аппараты

Теплообмен между жидкостями, разделенными твердой стенкой. Коэффициент теплопередачи. Теплопередача через плоскую и цилиндрическую стенки. Теплопередача через многослойную стенку. Тепловая изоляция. Критический диаметр тепловой изоляции. Интенсификация теплопередачи. Теплопередача через оребренную стенку. Сложный теплообмен.

Назначение, классификация и схемы теплообменных аппаратов. Рекуперативные теплообменники. Уравнения теплового баланса и теплопередачи. Средний температурный напор. Основы расчета рекуперативных теплообменников.

У к а з а н и я. При изучении этой темы обратите внимание на способы интенсификации теплообмена в теплообменниках. Научитесь анализировать влияние на коэффициент теплопередачи различных факторов и определять решающие из них. Усвойте методику вывода формулы среднего температурного напора для рекуперативных теплообменников, рассмотрите ограничения, допущенные при ее выводе, научитесь рассчитывать теплообменники при различных схемах движения теплоносителей (противоток и прямоток), а также анализировать полученные результаты.

Л и т е р а т у р а: [1, с. 241-254; 3, с. 97-110].

Вопросы для самопроверки

1. Чем отличается теплопередача от теплоотдачи?

2. Как по графику $t=f(R)$, где R – термическое сопротивление, определить температуры стенок?

3. При $\alpha_1 \gg \alpha_2$ какой из коэффициентов теплоотдачи следует увеличить для увеличения коэффициента теплопередачи K ?

4. Какие виды теплообменных аппаратов вы знаете?

5. Где применяются рекуперативные теплообменники?

6. На основе каких исходных уравнений дано определение поверхности рекуперативных теплообменников?

7. При каких предположениях выводятся формулы, определяющие среднелогарифмический температурный напор?

8. Когда среднелогарифмический температурный напор можно заменить среднеарифметическим?

9. Какие преимущества имеет противоточная схема теплообменника перед прямоточной? В каких случаях эти схемы эквивалентны?

Р а з д е л 3. ПРОМЫШЛЕННАЯ ТЕПЛОТЕХНИКА

Виды топлива и их классификация. Элементарный состав топлива. Теплота сгорания топлива. Условное топливо. Коэффициент избытка воздуха при сгорании топлива. Определение теоретически необходимого количества воздуха при загорании топлив.

Котельные установки. Классификация котельных установок. Структурные элементы паровых котлов и их назначение. Основы теплового расчета паровых котлов. Тепловой баланс и КПД котельного агрегата.

У к а з а н и я. При изучении топлив необходимо разобрать основные характеристики топлив, усвоить понятия высшей и низшей теплоты сгорания. Запомните, что коэффициент избытка воздуха представляет собой отношение действительного количества воздуха к теоретически необходимому, изучите влияние коэффициента избытка воздуха на процессы смесеобразования и горения.

Ознакомление с котельной установкой надо начать с принципиальной схемы, с помощью которой необходимо разобраться в назначении различных элементов и их взаимодействии. Разберитесь в тепловом балансе котельной установки, ее КПД и потерях теплоты, изучите способы снижения потерь теплоты. Разберите методику расчета расхода натурального и условного топлив.

Л и т е р а т у р а: [3, с. 130-160; с.161-186; 2, с. 253-316].

Вопросы для самопроверки

1. Каков элементарный состав твердого и жидкого топлива?
2. Назовите основные характеристики твердого топлива.
3. В чем разница между высшей и низшей теплотой сгорания?
4. Что такое условное топливо?
5. Что такое коэффициент избытка воздуха?
6. Из каких основных элементов состоит котельная установка?
7. Приведите уравнение теплового баланса котлоагрегата.
8. От чего зависят составляющие теплового баланса котлоагрегата?
9. Что такое КПД котлоагрегата, от чего он зависит?
10. Как определяется часовой расход натурального и условного топлива в котлоагрегате?

КОНТРОЛЬНАЯ РАБОТА

Цель выполнения контрольной работы - проверка знаний учебного материала, привитие навыков и умений практического применения этих знаний и проведения анализа результатов расчета.

К решению задач контрольной работы следует приступить только после изучения соответствующего раздела курса. Перед выполнением контрольной работы рекомендуется ознакомиться с ходом решения аналогичных задач по учебникам и задачкам, а также с методическими рекомендациями, приведенными ниже.

Исходные данные к условию задач нужно выбирать из соответствующих таблиц по двум последним цифрам зачетной книжки.

Рассматриваются работы, выполненные только по своему варианту.

Контрольная работа должна выполняться в ученической тетради с полями для замечания рецензента. На обложке работы должны быть указаны сведения о студенте, в том числе его шифр.

При выполнении и оформлении контрольной работы необходимо соблюдать следующие требования: условие задачи и исходные данные записывать полностью; решение задач сопровождать разъяснением физического смысла используемых и определяемых величин, соответствующими схемами и графиками; если расчетная формула имеет наименование, указывать его (уравнение состояния, уравнение теплового баланса и т.д.); пояснение символов и численные их значения приводить непосредственно под формулой в последовательности расположения их в формуле; если требуется, выполнять вспомогательные действия по определению необходимых величин; при использовании справочных данных указывать источник; единицы измерения приводить после разъяснения величин; в расчетную формулу числовые значения подставлять в том же порядке, что и символы, их обозначающие, без единиц измерения; единицу измерения ставить после результата (без скобок); все вычисления проводить в единицах СИ; точность вычислений должна определяться задаваемыми величинами, но не превышать четырех значащих цифр; для проведения анализа необходимо составление сводных таблиц расчета или соответствующих графиков; анализ результатов должен быть конкретным и отражать как качественную сторону, так и количественную.

В конце контрольной работы должен быть список использованных источников, дата и подпись студента.

З а д а ч а 1

Газовая смесь, заданная объемными долями, при давлении P_1 и температуре t_1 нагревается при постоянном давлении до температуры t_2 . Определите массовый состав смеси, газовую постоянную, плотность и удельный объем при начальных и нормальных условиях, количество теплоты, потребное для нагре-

ва. Объемный расход смеси V и другие данные примите по табл. 1. Значения теплоемкостей газов приведены в приложении.

При определении теплоты теплоемкость примите: а) без учета зависимости от температуры; б) с учетом линейной зависимости от температуры; в) с учетом нелинейной зависимости от температуры.

При анализе результатов сравните эти методы и объясните причину расхождения количества теплоты.

Таблица 1 - Исходные данные к задаче 1

Последняя цифра шифра	p_1	t_1	t_2	V	Предпоследняя цифра шифра	CO_2	SO_2	N_2	O_2
	МПа	°С	°С	м ³ /с		%	%	%	%
0	0,10	100	1000	10	0	20	–	80	–
1	0,11	100	1100	1,0	1	88	–	–	12
2	0,12	100	1200	2,0	2	–	72	–	28
3	0,13	200	1100	3,0	3	–	15	–	85
4	0,14	200	1000	4,0	4	–	25	75	–
5	0,15	300	900	5,0	5	35	–	65	–
6	0,16	100	600	6,0	6	45	–	55	–
7	0,17	200	700	7,0	7	–	75	25	–
8	0,18	300	800	8,0	8	–	40	–	60
9	0,19	400	900	9,0	9	25	–	–	75

Указания к решению задачи 1

Цель данной задачи - усвоение основных понятий и определений технической термодинамики и их закрепление при выполнении соответствующих расчетов. Решению задачи должно предшествовать изучение основных понятий и определений технической термодинамики по учебникам. Необходимо четко представлять сущность предмета технической термодинамики, понятий: рабочее тело, параметры состояния, газовая постоянная, газовая смесь, теплоемкость и др.

Следует знать, что основное уравнение, позволяющее оценить состояние газа, - уравнение состояния. Обратите внимание на разницу величин и их размерностей в уравнениях состояния для 1 кг и произвольного количества идеального газа. Выясните физический смысл и методику определения газовой постоянной отдельных газов и газовой смеси.

Уравнение состояния для 1 кг идеального газа обычно используется для определения плотности и удельного объема при заданных величинах давления и температуры.

Пример 1. Определите плотность ρ и удельный объем v азота при давлении $p = 0.5 \text{ МПа}$ и температуре $t = 27^\circ\text{C}$.

Из уравнения $p v = R T$ следует $v = R T / p$, а $\rho = 1 / v$.

Переводим заданные единицы измерений параметров в основные:

$$p = 0,5 \text{ МПа} = 0.5 \cdot 10^6 \text{ Па} \text{ и } T = 273 + 27 = 300 \text{ К.}$$

Газовую постоянную можно принять по таблицам учебников или определить из выражения универсальной газовой постоянной $\mu R = 8314$, откуда

$$R = \frac{8314}{\mu_{N_2}} = \frac{8314}{28} = 296.9 \text{ Дж}/(\text{кг} \cdot \text{К}),$$

где μ_{N_2} - молекулярная масса азота, $\mu_{N_2} = 28$. Тогда

$$\rho = \frac{0.5 \cdot 10^6}{296.9 \cdot 300} = 5.615 \text{ кг}/\text{м}^3$$

и

$$v = 1 / \rho = 1 / 5.615 = 0.178 \text{ м}^3 / \text{кг}.$$

Если требуется найти плотность ρ_0 и удельный объем v_0 при нормальных условиях, следует принять $p_0 = 101325 \text{ Па}$ и $T_0 = 273 \text{ К}$.

$$v_0 = \frac{296.9 \cdot 273}{101325} = 0.8 \text{ м}^3 / \text{кг};$$

$$\rho_0 = 1 / v_0 = 1 / 0.8 = 1.25 \text{ кг}/\text{м}^3.$$

Для проверки можно воспользоваться выражением закона Авагадро $\mu v_0 = 22,4 \text{ м}^3 / \text{кмоль}$; $v_0 = 22,4 / 28 = 0,8 \text{ м}^3 / \text{кмоль}$; $\rho_0 = 1,25 \text{ кг}/\text{м}^3$.

Уравнение состояния для произвольного количества газа позволяет оценить массовое или объемное количество газа.

Пример 2. Определите массу газовой смеси объемом $V = 2 \text{ м}^3$ при давлении $p = 0,1 \text{ МПа}$ и температуре $T = 300 \text{ К}$, если смесь задана массовыми долями кислорода $m_{O_2} = 0.2$ и азота $m_{N_2} = 0.8$.

Из уравнения состояния $p V = M R T$ следует $M = \frac{p V}{R T}$.

Для решения этого уравнения необходимо определить газовую постоянную смеси по формуле

$$R_{c.m} = \sum_1^n m_i R_i$$

или

$$\begin{aligned} R_{c.m} &= m_{O_2} R_{O_2} + m_{N_2} R_{N_2} = m_{O_2} \frac{8134}{\mu_{O_2}} + m_{N_2} \frac{8134}{\mu_{N_2}} = \\ &= 0.2 \cdot \frac{8134}{32} + 0.8 \cdot \frac{8134}{28} = 289.5 \text{ Дж}/(\text{кг} \cdot \text{К}). \end{aligned}$$

Тогда

$$M = \frac{0.1 \cdot 10^6 \cdot 2}{289.5 \cdot 300} = 2.3 \text{ кг.}$$

При задании газовой смеси объемными долями газовой постоянной находим из уравнения

$$R_{см} = \frac{8314}{\sum_{i=1}^n r_i \cdot \mu_i}$$

Количество теплоты, кДж, определяем по общей формуле

$$Q = N \cdot C \cdot (t_2 - t_1),$$

где N – количество газа (кг, м³, кмоль);
 C – удельная теплоемкость;
 $(t_2 - t_1)$ – перепад температур.

Конкретное выражение определяется принятым количеством газа, характером процесса и зависимостью теплоемкости от температуры. Так, при массовом задании количества газа, при постоянном давлении и без учета зависимости от температуры

$$Q = M \cdot C_p \cdot (t_2 - t_1),$$

где M – масса газа, кг (или массовый расход, кг/с), см. примеры 1, 2;
 C_p – массовая теплоемкость при постоянном давлении.

При объемном задании количества газа необходимо брать объем при нормальных условиях и объемную теплоемкость C'_p :

$$Q = V_0 \cdot C'_p \cdot (t_2 - t_1).$$

Для приведения заданного объема к нормальным условиям необходимо совместно решить два уравнения состояния для условий: заданных $pV = MRT$ и нормальных $p_0 V_0 = MRT_0$.

Тогда

$$V_0 = \frac{p \cdot V \cdot T_0}{p_0 \cdot T}.$$

Если известна масса газа и плотность при нормальных условиях, то

$$V_0 = \frac{M}{\rho_0}.$$

Теплоемкость без учета зависимости от температуры принимаем по таблицам при 0 °С либо определяем через молярные теплоемкости газа и его атомность.

Пример 3. Определите массовую изобарную теплоемкость кислорода без учета зависимости от температуры.

Для двухатомных газов молярная теплоемкость $\mu C_p = 29,1 \text{ кДж}/(\text{кмоль}\cdot\text{К})$. Тогда

$$C_{P_{O_2}} = \frac{\mu C_{P_{O_2}}}{\mu_{O_2}} = \frac{29,1}{32} = 0,909 \text{ кДж}/(\text{кг}\cdot\text{К})$$

или по таблицам теплоемкостей при $t = 0^\circ\text{C} - C_p = 0,9148 \text{ кДж}/(\text{кг}\cdot\text{К})$.

Теплоемкость по линейной зависимости от температуры определяем с помощью интерполяционных формул средних теплоемкостей вида

$$C_m = a + \frac{b}{2} \cdot (t_1 + t_2).$$

Пример 4. Определите среднюю массовую изобарную теплоемкость для воздуха в интервале температур от $t_1 = 100^\circ\text{C}$ до $t_2 = 900^\circ\text{C}$ с учетом линейной зависимости от температуры.

По таблице выбираем формулу

$$C_{Pm} = 0,9956 + 0,000093 \cdot t,$$

при $t = t_1 + t_2 = 100 + 900 = 1000^\circ\text{C}$

$$C_{Pm} = 0,9956 + 0,000093 \cdot 1000 = 1,0886 \text{ кДж}/(\text{кг}\cdot\text{К}).$$

Теплоемкость по нелинейной зависимости в интервале температур и определяется по формуле

$$C_{Pm} = \frac{C_{Pm}|_0^{t_2} \cdot t_2 - C_{Pm}|_0^{t_1} \cdot t_1}{t_2 - t_1},$$

где $C_{Pm}|_0^{t_2}$ и $C_{Pm}|_0^{t_1}$ – средние теплоемкости в интервале температур от 0°C до t_1 и t_2 (принимается по таблицам теплоемкостей при t_1 и t_2).

Пример 5. Определите среднюю массовую теплоемкость при постоянном давлении азота в интервале температур от $t_1 = 200$ до $t_2 = 800^\circ\text{C}$.

$$C_{Pm}|_{t_1}^{t_2} = \frac{1,0881 \cdot 800 - 1,03446 \cdot 200}{800 - 200} = 1,1059 \text{ кДж}/(\text{кг}\cdot\text{К}).$$

При отсутствии таблиц необходимых теплоемкостей можно выполнять пересчеты из одного вида теплоемкостей в другие по соответствующим формулам. Например, для азота

$\mu C_{Pm}|_0^{1000} = 31,313 \text{ кДж}/(\text{кмоль}\cdot\text{К})$, тогда

$$C_{Pm}|_{1000}^0 = \frac{\mu C_{Pm}|_0^{1000}}{\mu_{N_2}} = \frac{31,313}{28} = 1,118 \text{ кДж}/(\text{кг}\cdot\text{К}).$$

Теплоемкость газовой смеси определяем с учетом вида теплоемкости и способа задания смеси по формулам

$$C_{c.m.} = \sum_{i=1}^n m_i \cdot C_i, \quad C'_{c.m.} = \sum_{i=1}^n r_i \cdot C'_i, \quad \mu C_{c.m.} = \sum_{i=1}^n r_i \cdot \mu C_i.$$

Пример 6. Определите массовую теплоемкость при постоянном давлении без учета зависимости от температуры, если объемный состав смеси $r_{CO_2} = 20\%$ и $r_{N_2} = 80\%$.

Записываем расчетное уравнение

$$C_{Pc.m.} = \sum_{i=1}^n m_i \cdot C_i = m_{CO_2} \cdot C_{P_{CO_2}} + m_{N_2} \cdot C_{P_{N_2}}.$$

Для решения необходимо сделать пересчет объемных долей r_i в массовые m_i по формуле

$$m_i = \frac{r_i \cdot \mu_i}{\sum_{i=1}^n r_i \mu_i}.$$

Тогда

$$m_{CO_2} = \frac{r_{CO_2} \cdot \mu_{CO_2}}{r_{CO_2} \cdot \mu_{CO_2} + r_{N_2} \cdot \mu_{N_2}} = \frac{0.2 \cdot 44}{0.2 \cdot 44 + 0.8 \cdot 28} = 0.282;$$

$$m_{N_2} = \frac{r_{N_2} \cdot \mu_{N_2}}{r_{CO_2} \cdot \mu_{CO_2} + r_{N_2} \cdot \mu_{N_2}} = \frac{0.8 \cdot 28}{0.2 \cdot 44 + 0.8 \cdot 28} = 0.718.$$

Для трехатомных газов $\mu C_p = 37,4$ кДж/(кмоль·К), для двухатомных $\mu C_p = 29,1$ кДж/(кмоль·К). Тогда

$$C_{Pm} = m_{CO_2} \frac{\mu C_{P_{CO_2}}}{\mu_{CO_2}} + m_{N_2} \frac{\mu C_{P_{N_2}}}{\mu_{N_2}} = 0.282 \frac{37.4}{44} + 0.718 \frac{29.1}{28} = 0.9859 \text{ кДж/(ки·К)}.$$

Используя приведенные примеры и рекомендации к их решениям, задачу 1 выполните в соответствии с заданным условием.

Задача 2

Газ массой M с начальными параметрами p_1 и T_1 изменяет свое состояние по политропам с показателями: $n = -1$, $n = 0$, $n = 1$, $n = \kappa$, $n = 2$. Определите в каждом из процессов параметры состояния в конце процесса, теплоту, работу, изменение внутренней энергии и изменение энтропии. Отношение объемов при изменении состояния газа V_1/V_2 и другие данные, необходимые для решения задачи, выберите из табл. 2

Таблица 2 – Исходные данные к задаче 2

Последняя цифра шифра	Газ	p_1	T_1	Пред-последняя цифра шифра	M	V_1/V_2
		МПа	К		кг	
0	CO_2	1,0	300	0	10	2,00
1	CO	1,1	410	1	1	0,51
2	N_2	1,2	520	2	2	2,20
3	Воздух	1,3	330	3	3	0,43
4	H_2	1,4	440	4	4	2,40
5	O_2	1,5	550	5	5	0,36
6	CO_2	1,6	660	6	6	2,60
7	H_2	1,7	770	7	7	0,70
8	O_2	1,8	880	8	8	1,80
9	Воздух	1,9	990	9	9	0,29

При решении задачи объясните сущность каждого процесса. По результатам расчета составьте сводную таблицу и изобразите все процессы в pV - и TS -координатах, и сделайте заключение о влиянии показателя политропы на полученные величины.

Расчеты необходимо вести при постоянном значении теплоемкости не зависимо от температуры.

Указания к решению задачи 2

Цель данной задачи – исследование термодинамических процессов изменения состояния газа для выяснения сущности процессов, установления закономерности изменения параметров и соотношения между теплотой, работой и изменением внутренней энергии. Решению задачи должно предшествовать изучение первого закона термодинамики, выяснение понятий: теплота, работа, изменение внутренней энергии, термодинамический процесс и др., освоение методики исследования термодинамических процессов аналитически и графически с помощью pV - и TS - диаграмм.

Необходимо понимать, что основа для расчета процессов – уравнение состояния газа, общие формулы теплоты, работы и изменения внутренней энергии, уравнение первого закона термодинамики. Для каждого процесса такие формулы конкретизируются в зависимости от его сущности. необходимо также четко уяснить обобщающий характер политропного процесса.

Исследование каждого процесса рекомендуется начинать с выяснения сущности, графического изображения в pV - и TS - координатах, а затем определять требуемые величины по соответствующим формулам.

Пример 7. Определите параметры в конце адиабатного сжатия 1 кг воздуха, работу сжатия и изменение внутренней энергии, если параметры начала сжатия $p_1=0,1$ МПа, $T_1=300$ К, степень сжатия $V_1/V_2=3$.

Адиабатным является процесс, который происходит при неизменной энтропии ($\Delta s=0$). Он характеризуется тем, что осуществляется без теплообмена с внешней средой ($dq=0$); является частным случаем политропного процесса с показателем политропы $n=k$; в реальных условиях неосуществим.

Уравнение адиабаты в pV - координатах $pv^k=const$. Этому уравнению соответствует кривая – неравнобокая гиперболола, которая проходит круче изотермы. Для TS - координат уравнение адиабаты $s=const$. Этому уравнению соответствует в TS - координатах прямая, параллельная оси температур. Удельный объем воздуха в конце сжатия можно определить, исходя из условия задачи $V_1/V_2=3$.

Величину начального удельного объема рассчитываем по уравнению состояния

$$v_1 = \frac{RT_1}{p_1} = \frac{287 \cdot 300}{0.1 \cdot 10^6} = 0.861 \frac{\text{м}^3}{\text{кг}}$$

Тогда

$$v_2 = v_1/3 = 0.861/3 = 0.287 \text{ м}^3/\text{кг}.$$

Давление в конце сжатия

$$p_2 = p_1 \cdot \left(\frac{V_1}{V_2} \right)^k.$$

Величину показателя адиабаты при постоянной теплоемкости принимаем $k=1.4$. Тогда

$$p_2 = 0.1 \cdot 3^{1.4} = 0.466 \text{ МПа}.$$

Температура в конце сжатия

$$T_2 = T_1 \cdot \left(\frac{V_1}{V_2} \right)^{k-1} = 300 \cdot 3^{1.4-1} = 465.6 \text{ К}.$$

Определяем теплоту процесса. Из сущности процесса следует, что $q=0$. Изменение внутренней энергии

$$\Delta u = C_v \cdot (T_2 - T_1).$$

Теплоемкость воздуха при постоянном объеме принимаем по таблицам:

$$C_v = 0.7164 \text{ кДж}/(\text{кг} \cdot \text{К});$$

$$\Delta u = 0.7164 \cdot (465.6 - 300) = 118.6 \text{ кДж}/\text{кг}.$$

Работа сжатия в процессе

$$l = \frac{R}{k-1} \cdot (T_1 - T_2) = \frac{287}{1.4-1} \cdot (300 - 465.6) = -118810 \text{ Дж} = -118.81 \frac{\text{кДж}}{\text{кг}}$$

(газовую постоянную воздуха берем из таблиц: $R=287 \text{ Дж}/(\text{кг} \cdot \text{К})$) или из выражения первого закона термодинамики

$$q = \Delta u + l \text{ при } q=0 \quad l = -\Delta u = -118.81 \text{ кДж/кг.}$$

Работа сжатия в адиабатном процессе вызывает увеличение внутренней энергии.

Энтропия в процессе не изменяется:

$$\Delta s = 0.$$

Аналогично рассчитываются остальные процессы, но с учетом соответствующих формул.

З а д а ч а 3

Для идеального цикла поршневого двигателя внутреннего сгорания с заданным подводом теплоты определите параметры состояния в характерных точках, количество подведенной и отведенной теплоты, термический КПД, полезную работу и среднее давление цикла, если параметры в начале процесса сжатия p_1 и T_1 , степень сжатия ε , степень повышения давления λ и степень предварительного расширения ρ . Рабочим телом считается воздух с показателем адиабаты $k=1,4$.

Определите также термический КПД цикла Карно, совершающегося при тех же предельных температурах, и сделайте заключение о степени совершенства рассчитываемого цикла.

Данные для решения задачи возьмите из табл. 3.

При решении задачи необходимо дать объяснение цикла и его изображение в pV - и TS - координатах.

Расчеты ведите при постоянном значении теплоемкостей независимо от температуры.

Указания к решению задачи 3

Цель данной задачи – усвоение основных положений по термодинамическим циклам ДВС и методики их расчета. Решению задачи должно предшествовать изучение второго закона термодинамики, теории термодинамических циклов и заданного термодинамического цикла ДВС, выяснение понятий: термодинамический цикл, термический КПД, степень сжатия, степень повышения давления, степень предварительного расширения и др.

Необходимо понимать, что основа для расчета цикла – расчетные уравнения процессов в увязке с заданным циклом.

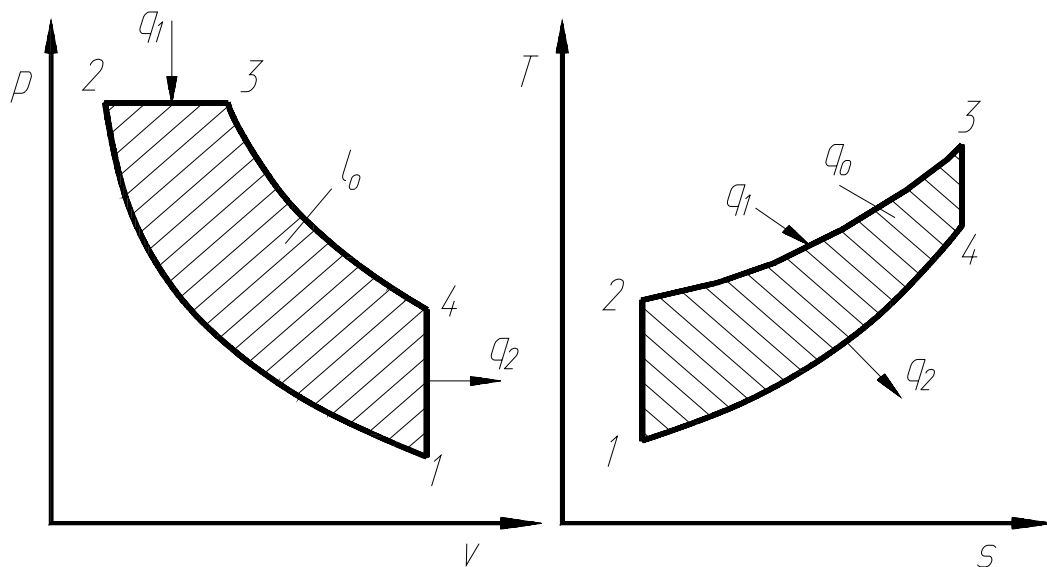
Расчет рекомендуется начинать с описания и изображения цикла в pV - и TS - координатах.

Таблица 3 – Исходные данные к задаче 3

Последняя цифра	p_1	T_1	Пред-последняя цифра	Подвод тепла	ε	λ	ρ
-----------------	-------	-------	----------------------	--------------	---------------	-----------	--------

шифра	МПа	К	шифра				
0	0,10	300	0	$p=const$	20	1,0	1,5
1	0,11	310	1	Смешанный	14	2,0	1,2
2	0,12	320	2	$v=const$	6	4,0	1,0
3	0,13	330	3	$p=const$	12	1,0	1,7
4	0,14	340	4	Смешанный	16	2,2	1,4
5	0,15	350	5	$v=const$	8	4,5	1,0
6	0,16	360	6	Смешанный	18	1,8	1,6
7	0,17	370	7	$p=const$	15	1,0	1,9
8	0,18	380	8	Смешанный	17	1,6	1,8
9	0,09	390	9	$v=const$	10	3,5	1,0

Пример 8. Для цикла с изобарным подводом теплоты определите параметры состояния в характерных точках, количество подведенной и отведенной теплоты, полезную работу и среднее давление цикла, термический КПД, если параметры в начале сжатия $p_1=0,1\text{МПа}$ и $T_1=300\text{К}$, степень сжатия $\varepsilon=10$, степень предварительного расширения $\rho=1,5$. Рабочее тело – 1 кг воздуха.



Цикл с изобарным подводом теплоты

Цикл состоит из двух адиабат (1 – 2) (3 – 4), изобары (2 – 3) и изоchoры (4 – 1).

Основные характеристики цикла:

$\varepsilon = \frac{v_1}{v_2}$ – степень сжатия; $\rho = \frac{v_3}{v_2}$ – степень предварительного расширения.

Начальное состояние рабочего тела задано двумя параметрами: давлением и абсолютной температурой. Для определения третьего параметра – удельного объема v_1 воспользуемся уравнением состояния для 1 кг идеального газа.

$$v_1 = \frac{R \cdot T_1}{p_1} = \frac{287 \cdot 300}{0.1 \cdot 10^6} = 0.861 \frac{\text{м}^3}{\text{кг}},$$

где R – газовая постоянная воздуха. По таблицам $R=287 \text{ Дж}/(\text{кг} \cdot \text{К})$.

Для определения параметров состояния в конце процесса сжатия необходимо учитывать характер процесса и параметр цикла, определяющий этот процесс.

Из сущности параметра цикла следует, что степень сжатия $\varepsilon = v_1/v_2$. Тогда удельный объем в конце сжатия

$$v_2 = \frac{v_1}{\varepsilon} = \frac{0.861}{10} = 0.0861 \frac{\text{м}^3}{\text{кг}}.$$

Так как сжатие происходит по адиабате, определяем давление в конце сжатия p_2 из соотношения параметров $p_1/p_2 = (v_1/v_2)^k$:

$$p_2 = p_1 \cdot \left(\frac{v_1}{v_2} \right)^{1.4} = p_1 \cdot \varepsilon^k,$$

где k – показатель адиабаты. Для воздуха принимаем $k=1,4$.

$$p_2 = 0.1 \cdot 10^{1.4} = 2.5 \text{ МПа}.$$

Температуру в конце сжатия T_2 также определяем из соотношения параметров в адиабатном процессе или по уравнению состояния:

$$T_2 = T_1 \cdot \varepsilon^{k-1} = 300 \cdot 10^{0.4} = 753.9 \text{ К};$$

$$T_2 = \frac{p_2 \cdot v_2}{R} = \frac{2.5 \cdot 10^6 \cdot 0.0861}{287} = 750 \text{ К}.$$

Затем определяем параметры состояния в других характерных точках: в конце изобарного подвода теплоты (v_3, p_3, T_3) и в конце адиабатного процесса расширения (v_4, p_4, T_4):

$$v_3=0.129 \text{ м}^3/\text{кг}; \quad p_3=2.5 \text{ МПа}; \quad T_3=1130 \text{ К};$$

$$v_4=0.861 \text{ м}^3/\text{кг}; \quad p_4=0.171 \text{ МПа}; \quad T_4=529 \text{ К}.$$

Для определения количества подведенной и отведенной теплоты используем формулу теплоты для 1 кг с учетом интервала температуры и характера процесса (для выбора теплоемкости). В нашем случае подводимая теплота

$$q_1 = C_p \cdot (T_3 - T_2),$$

где C_p – изобарная массовая теплоемкость. Для воздуха без учета зависимости от температуры $C_p = 1,0036 \text{ кДж}/(\text{кг} \cdot \text{К})$.

Для полученного значения $T_3 = 1130 \text{ К}$

$$q_1 = 1.0036 (1130 - 753.6) = 378 \text{ кДж}/\text{кг}.$$

Если теплота подводится по двум процессам, то подводимая теплота цикла равна сумме подведенных теплот в обоих процессах.

Отвод теплоты происходит в изохорном процессе 4-1, поэтому

$$q_2 = C_v \cdot (T_4 - T_1),$$

где C_v – изохорная массовая теплоемкость воздуха

$$C_v = C_p - R = 1.0036 - 0.287 = 0.7166 \text{ кДж/(кг} \cdot \text{К)}.$$

$$q_2 = 0,7166(529 - 300) = 164 \text{ кДж/кг}.$$

Полезная работа цикла может быть определена как разность работы расширения цикла и работы сжатия или как разность подведенной и отведенной теплоты.

Работа расширения цикла совершается в двух процессах - изобарном и адиабатном:

$$l_{рас} = l_{изоб.} + l_{адиаб.} = R \cdot (T_3 - T_2) + \frac{R}{k-1} \cdot (T_3 - T_4).$$

Работа сжатия цикла происходит по адиабате:

$$l_{сж} = l_{адиаб.} = \frac{R}{k-1} \cdot (T_1 - T_2).$$

Тогда

$$l_0 = l_{рас} - l_{сж} \text{ или } l_0 = q_0 = q_1 - q_2 = 378 - 164 = 214 \text{ кДж/кг}.$$

Среднее давление цикла

$$p_{cp} = \frac{l_0}{v_1 - v_2} = \frac{214}{0.861 - 0.0861} = 276.2 \text{ кПа}.$$

Термический КПД цикла можно рассчитать либо по общей формуле, либо по формуле термического КПД данного цикла, выраженной через характеристики цикла:

$$\eta_t = \frac{l_0}{q_1} = \frac{214}{378} = 0.566;$$

или

$$\eta_t = 1 - \frac{1}{\varepsilon^{k-1}} \cdot \frac{\rho^{k-1}}{k \cdot (\rho - 1)} = 1 - \frac{1}{10^{1.4-1}} \cdot \frac{1.5^{1.4-1}}{1.4 \cdot (1.5 - 1)} = 0.566.$$

Если требуется оценить термический КПД цикла Карно, осуществляемого в тех же пределах температур, то

$$\eta_{t_K} = 1 - \frac{T_{min}}{T_{max}} = 1 - \frac{T_1}{T_3} = 1 - \frac{300}{1130} = 0.734.$$

Таким образом, термический КПД цикла Карно выше в $\frac{\eta_{t_K}}{\eta_t} = \frac{0.734}{0.566} \approx 1.3$ раза.

Задача 4

Плоская стальная стенка толщиной $\delta=10$ мм омывается с одной стороны дымовыми газами с температурой t_1 , а с другой – водой с температурой t_2 . Определите плотность теплового потока и температуры поверхностей стенки, если коэффициент теплоотдачи от дымовых газов к стенке α_1 и от стенки к воде α_2 .

Как изменится плотность теплового потока и температуры на поверхностях слоев, если в процессе эксплуатации:

со стороны газов появится слой сажи толщиной δ_c с коэффициентом теплопроводности λ_c ;

со стороны воды появится слой накипи толщиной δ_H с коэффициентом теплопроводности λ_H ;

сажа и накипь появляются одновременно?

Данные для решения возьмите из табл. 4.

Решение задачи необходимо сопровождать схемами передачи теплоты, графиками изменения температур и объяснением смысла основных используемых величин.

Указания к решению задачи 4

Цель решения данной задачи – усвоение основных понятий и определений теплопередачи и их закрепление при выполнении соответствующих расчетов. Решению задачи должно предшествовать изучение соответствующего теоретического материала по учебникам. В частности, необходимо четко представлять себе сущность процесса теплопередачи в целом и отдельных его видов, понимать физический смысл коэффициентов теплопроводности, теплоотдачи, теплопередачи, знать их обозначения и единицы измерения.

Расчетное уравнение теплопередачи базируется на расчетных формулах теплопроводности, конвективного теплообмена и теплового излучения. Поэтому решению задачи должно предшествовать ознакомление с примерами 9 и 10.

Таблица 4 – Исходные данные к задаче 4

Последняя	$t_1,$	$t_2,$	$\alpha_1,$	$\alpha_2,$	Пред-последняя	$\delta_c,$	$\lambda_c,$	$\delta_H,$	$\lambda_H,$
-----------	--------	--------	-------------	-------------	----------------	-------------	--------------	-------------	--------------

цифра шифра					цифра шифра				
	°C	°C	$\frac{Вт}{м^2 \cdot К}$	$\frac{Вт}{м^2 \cdot К}$		мм	$\frac{Вт}{м \cdot К}$	мм	$\frac{Вт}{м \cdot К}$
0	1000	100	30	4000	0	10	0,10	10	1,00
1	1100	110	41	5100	1	1	0,11	11	1,11
2	1200	120	52	6200	2	2	0,12	12	1,32
3	1300	130	63	4300	3	3	0,13	13	1,53
4	1400	140	34	5400	4	4	0,14	14	1,74
5	1050	150	45	3500	5	5	0,15	15	2,05
6	1160	160	56	4600	6	6	0,16	16	2,16
7	1270	170	37	5700	7	7	0,17	17	2,37
8	1380	180	48	3800	8	8	0,18	18	2,58
9	1090	190	59	4900	9	9	0,19	19	2,79

Пример 9. Определите потерю теплоты теплопроводностью через кирпичную стенку толщиной $\delta=0.6$ м, площадью $F=5$ м² за время $\tau=1$ ч, если температуры на поверхностях стенки $t_1=600$ и $t_2=20$ °C. Коэффициент теплопроводности кирпича $\lambda=0.6$ Вт/(м·К).

Расчетное уравнение теплопроводности для плоской стенки обычно записывается так:

$$Q = F \cdot \tau \cdot \frac{\lambda \cdot (t_2 - t_1)}{\delta}.$$

Для заданных условий количество теплоты

$$Q = 5 \cdot 3600 \cdot \frac{0.6 \cdot (20 - 600)}{0.6} = -10440000 \text{ Дж} = -10440 \text{ кДж}.$$

Если введено понятие термического сопротивления теплопроводности $R_\lambda = \delta/\lambda$, тогда уравнение теплопроводности записывается для плотности теплового потока

$$q = \frac{t_2 - t_1}{R_\lambda} = \frac{t_2 - t_1}{\delta/\lambda};$$

$$Q = q \cdot F \cdot \tau.$$

Пример 10. Определите количество теплоты, передаваемой теплоотдачей от стенки площадью $F=2$ м² к воде за время $\tau=2$ ч при температуре поверхности $t_1=200$ °C и температуре воды $t_2=100$ °C. Коэффициент теплоотдачи от стенки к воде $\alpha=50$ Вт/(м²·К).

Согласно формуле Ньютона-Рихмана

$$Q = F \cdot \tau \cdot \alpha \cdot (t_2 - t_1) = 2 \cdot 2 \cdot 3600 \cdot 50 \cdot (200 - 100) = 72 \cdot 10^3 \text{ кДж.}$$

Плотность теплового потока при теплоотдаче можно также выразить через термическое сопротивление теплоотдачи $R_\alpha = 1/\alpha$:

$$q = \frac{t_1 - t_2}{R_\alpha} = \frac{t_1 - t_2}{1/\alpha}.$$

Из уравнений теплопроводности и конвективного теплообмена, выражаемых через термическое сопротивление, следует, что для теплопередачи плотность теплового потока пропорциональна перепаду температур и обратно пропорциональна суммарному термическому сопротивлению составляющих видов теплообмена:

$$q = \frac{t_1 - t_2}{\sum_{i=1}^n R_i}.$$

Пример 11. Через стальную стенку, покрытую слоем асбеста, теплота передается от горячих газов воздуху. Определите плотность теплового потока и температуры поверхностей между слоями стенки, если температура газов $t_1 = 800^\circ\text{C}$, температура воздуха $t_2 = 20^\circ\text{C}$, толщина стальной стенки $\delta_1 = 8 \text{ мм}$ и коэффициент теплопроводности $\lambda_1 = 45 \text{ Вт/(м}\cdot\text{К)}$, толщина асбеста $\delta_2 = 10 \text{ мм}$ и коэффициент теплопроводности $\lambda_2 = 0.11 \text{ Вт/(м}\cdot\text{К)}$, коэффициент теплоотдачи от газов к стенке $\alpha_1 = 100 \text{ Вт/(м}^2\cdot\text{К)}$ и коэффициент теплоотдачи от стенки к воздуху $\alpha_2 = 10 \text{ Вт/(м}^2\cdot\text{К)}$.

Применительно к условию задачи составляем расчетное уравнение плотности теплового потока

$$q = \frac{t_1 - t_2}{\sum_{i=1}^n R_i} = \frac{t_1 - t_2}{1/\alpha_1 + \delta_1/\lambda_1 + \delta_2/\lambda_2 + 1/\alpha_2}.$$

Тогда

$$q = \frac{800 - 20}{1/100 + 0.008/45 + 0.010/0.11 + 1/10} = 3879.1 \frac{\text{Вт}}{\text{м}^2}.$$

Для определения температуры на поверхности стенки используем уравнение вида теплообмена на участке. Запишем уравнение конвективного теплообмена для первого участка

$$q = (t_1 - t_{C_1}) \cdot \alpha_1.$$

Из этого уравнения температура на поверхности стенки со стороны газов

$$t_{C_1} = t_1 - \frac{q}{\alpha_1} = 800 - \frac{3879.1}{100} = 761.2 \text{ } ^\circ\text{C}.$$

Для второго участка

$$q = \frac{\lambda_1}{\delta_1} (t_{C_1} - t_{C_2}).$$

Из этого уравнения температура между слоем стали и асбеста

$$t_{C_2} = t_{C_1} - \frac{q \cdot \delta_1}{\lambda_1} = 761.2 - \frac{3879.1 \cdot 0.008}{45} = 760.5 \text{ } ^\circ\text{C}.$$

Температура на поверхности асбеста

$$t_{C_3} = t_{C_2} - \frac{q \cdot \delta_2}{\lambda_2} = 760.5 - \frac{3879.1 \cdot 0.010}{0.11} = 407.8 \text{ } ^\circ\text{C}$$

или

$$t_{C_3} = t_2 + \frac{q}{\alpha_2} = 20 + \frac{3879.1}{10} = 407.9 \text{ } ^\circ\text{C}.$$

Данный пример показывает, что падение температуры на различных участках разное. Это хорошо видно из графика изменения температур по участкам. Зная, что падение температур зависит от термического сопротивления, можно сделать заключение, что наименьшее термическое сопротивление составляет стальная стенка, довольно интенсивно передается теплота от газа к стенке, значительное сопротивление составляет слой асбеста и почти равное ему термическое сопротивление на участке стенка - воздух.

Задача 5

Определите поверхность нагрева рекуперативного газовойдяного теплооб-

менника при прямоточной и противоточной схемах движения теплоносителей, если массовый расход нагреваемой воды M_6 , коэффициент теплопередачи от продуктов сгорания к воде k , начальные и конечные температуры продуктов сгорания и воды соответственно t_2', t_2'', t_6', t_6'' . Данные для решения возьмите из табл. 5. Изобразите графики изменения температур для обоих случаев.

Указания к решению задачи 5

Целью данной задачи - освоение методики расчета теплообменных аппаратов. Перед решением задачи по учебнику уясните назначение и принципы действия теплообменных аппаратов, разберитесь в понятиях: средний температурный напор, водяной эквивалент и др.

Необходимо знать, что основа расчета теплообменных аппаратов – уравнения теплового баланса и теплопередачи.

Таблица 5 – Исходные данные к задаче 5

Последняя цифра шифра	$t'_{1,}$	$t''_{1,}$	$t'_{2,}$	$t''_{2,}$	Пред-последняя цифра шифра	$M_{1,}$	$K,$
	°C	°C	°C	°C		кг/с	$\frac{Вт}{м^2 \cdot К}$
0	400	200	10	100	0	1,0	30
1	510	310	21	110	1	1,1	41
2	620	220	32	120	2	1,2	52
3	730	330	13	130	3	1,3	63
4	840	240	24	140	4	1,4	74
5	950	350	35	150	5	1,5	35
6	560	270	16	160	6	1,6	46
7	670	370	27	170	7	1,7	57
8	780	280	38	180	8	1,8	68
9	890	390	19	190	9	1,9	79

Пример 12. Определите поверхность прямоточного теплообменного аппарата для нагрева 0.3 кг/с воды от $t_6' = 10$ до $t_6'' = 90$ °C горячими газами с $t_2' = 200$ и $t_2'' = 100$ °C, если коэффициент теплопередачи $K = 50 \text{ Вт}/(\text{м}^2 \cdot \text{К})$.

Из уравнения теплового баланса определяем потребное количество теплоты

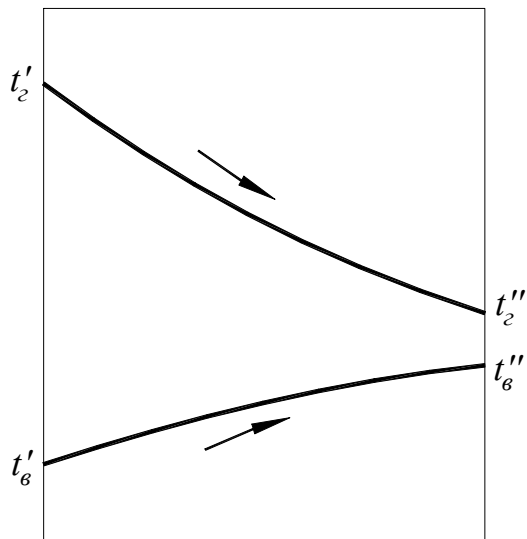
$$Q = M \cdot C_p (t_6' - t_6'') = 0.3 \cdot 4.19 \cdot (90 - 10) = 100.56 \text{ кДж} / \text{с} = 1.0056 \cdot 10^5 \text{ Вт},$$

где C_p – теплоемкость воды при постоянном давлении, $C_p = 4,19 \text{ кДж}/(\text{кг} \cdot \text{К})$.

Поверхность нагрева находим из уравнения теплопередачи

$$F = \frac{Q}{K \cdot \Delta t},$$

Для выбора формулы среднего температурного напора определяем большую Δt_{δ} и меньшую $\Delta t_{\text{м}}$ разности температур между теплоносителями (см. рисунок):



$$\Delta t_{\delta} = 200 - 10 = 190^{\circ}\text{C};$$

$$\Delta t_{\text{м}} = 100 - 90 = 10^{\circ}\text{C}.$$

Так как $\Delta t_{\delta}/\Delta t_{\text{м}} = 190/10 = 19 > 1.7$ то определяем средний логарифмический температурный напор

$$\Delta t_{\text{лог}} = \frac{\Delta t_{\delta} - \Delta t_{\text{м}}}{\ln \frac{\Delta t_{\delta}}{\Delta t_{\text{м}}}} = \frac{190 - 10}{\ln \frac{190}{10}} = 61.1^{\circ}\text{C}.$$

Средний арифметический температурный напор

$$\Delta t_{\text{ср}} = \frac{\Delta t_{\delta} + \Delta t_{\text{м}}}{2} = \frac{190 + 10}{2} = 100^{\circ}\text{C}.$$

Расхождение составляет около 40%. Тогда

$$F = \frac{1.0056 \cdot 10^5}{50 \cdot 61.1} = 32.92 \text{ м}^2.$$

Задача 6

Определить термический КПД (η_t), удельный (d) и часовой (D) расход пара на конденсационную турбину, работающую без регенерации теплоты по заданной электрической мощности $N_{\text{э}}$, давлению p_1 и температуре t_1 перегретого пара перед турбиной, давлению в конденсаторе p_k и относительному внутреннему КПД турбины η_{oi} . Определить также степень сухости пара в конце действительного и теоретического процессов расширения, изобразить эти процессы в $h-s$ диаграмме.

Изобразить схему паросиловой установки и дать ее краткое описание. Объяснить как влияют начальные и конечные параметры пара на КПД цикла

Ренкина и степень сухости пара в конце расширения. Чем ограничивается минимальное значение степени сухости пара.

Таблица 6 – Исходные данные к задаче 6

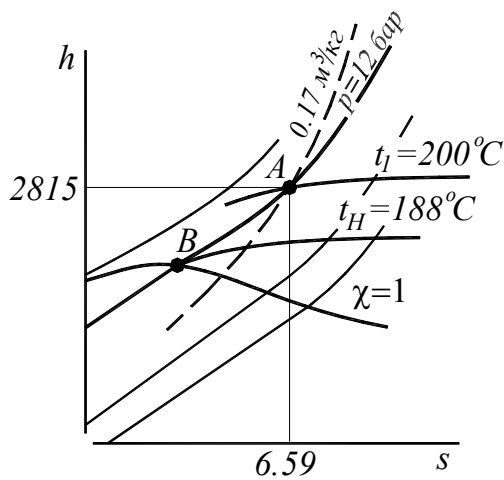
Последняя цифра шифра	$N_э,$	$p_1,$	$t_1,$	Пред-последняя цифра шифра	$\eta_{об}$	$p_{к2}$
	<i>МВт</i>	<i>МПа</i>	$^{\circ}\text{C}$			<i>кПа</i>
0	5	5	420	0	0,76	6
1	6	6	440	1	0,78	5
2	7	7	460	2	0,80	4
3	8	8	480	3	0,82	3
4	9	9	500	4	0,84	5
5	10	10	520	5	0,86	6
6	11	11	540	6	0,79	4
7	12	12	560	7	0,81	4
8	13	13	580	8	0,83	5
9	14	14	600	9	0,85	6

Указания к решению задачи 6

Цель данной задачи – усвоение циклов паросиловых установок и методики их расчета. Решению задачи должно предшествовать изучение процессов парообразования, усвоение понятий: влажный пар, насыщенный пар, перегретый пар, степень сухости пара и др. Необходимо изучить циклы паросиловых установок и способы повышения их экономичности.

Расчет необходимо начинать с изображения схемы паросиловой установки и ее описания, дать изображение в $h-s$ диаграмме теоретического и действительного процессов расширения пара в турбине.

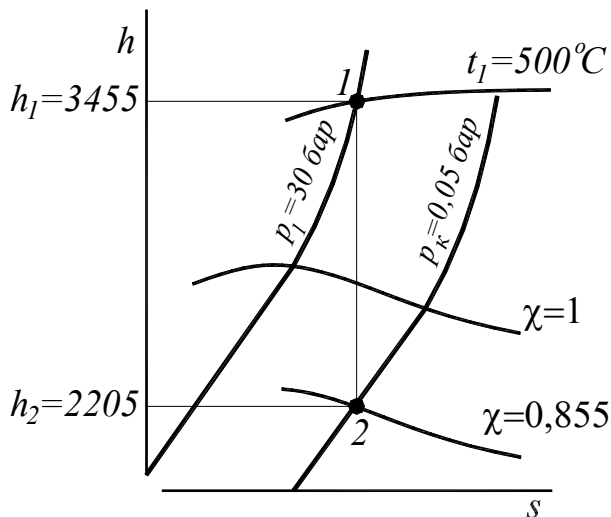
Пример 13. Определить состояние и параметры пара при давлении $p=12$ бар и температуре $t=200$ °С. Определить также температуру насыщения пара при давлении 12 бар.



Состояние пара определяется на $h-s$ диаграмме точкой A , лежащей на пересечении изобары $p=12$ бар и изотермы $t=200$ °C. Через точку A проходят изохора $v=0,17$ м³/кг, изоэнтальпа $h=2815$ кДж/кг и адиабата $s=6,59$ кДж/(кг·К). Так как точка A лежит выше линии сухости $\chi=1$, пар перегретый. Температура насыщения при давлении $p=12$ бар определяется изотермой $t=188$ °C, выходящей из точки B (пересечение изобары $p=$

$=12$ бар с верхней пограничной кривой ($\chi=1$)).

Пример 14. Определить располагаемый теплоперепад и степень сухости при адиабатном расширении в турбине перегретого пара с параметрами $p_1=30$ бар и $t_1=500$ °C, если давление в конденсаторе составляет $p_k=0,05$ бар.



По $h-s$ диаграмме на пересечении изобары p_1 и изотермы t_1 находим начальное состояние пара (точка 1). Энтальпия пара в начальном состоянии: $h=3455$ кДж/кг.

Из точки 1 проводим адиабату $s_1=const$ до пересечения с изобарой p_k (точка 2). Энтальпия пара в конечном состоянии: $h=2205$ кДж/кг. Через точку 2 проходит линия сухости $\chi=0,855$.

Располагаемый теплоперепад

$$h_0 = h_1 - h_2 = 3455 - 2205 = 1250 \frac{\text{кДж}}{\text{кг}}.$$

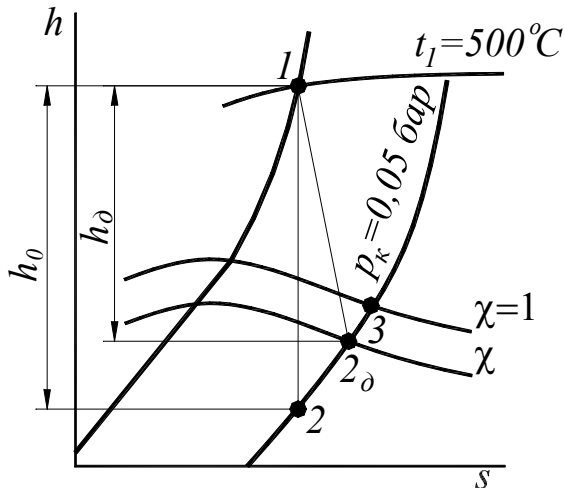
Пример 15. Для условий предыдущего примера определить действительный теплоперепад, термический КПД и удельный расход пара турбиной, если относительный внутренний КПД турбины $\eta_{oi}=0,8$.

Действительный теплоперепад определяем по формуле

$$h_{\partial} = h_0 \cdot \eta_{oi} = 1250 \cdot 0,8 = 1000 \frac{\text{кДж}}{\text{кг}}.$$

Энтальпия пара в конце действительного процесса расширения в турбине

$$h_{2\partial} = h_1 - h_\partial = 3455 - 1000 = 2455 \frac{\text{кДж}}{\text{кг}}.$$



Термический КПД определяем по формуле

$$\eta_t = \frac{h_1 - h_2}{h_1 - h'_2},$$

где h'_2 – энтальпия конденсата, которая определяется по формуле

$$h'_2 = C_{pv} \cdot t_H,$$

здесь $C_{pv} = 4.19 \text{ кДж}/(\text{кг} \cdot \text{К})$ – теплоемкость воды;

t_H – температура насыщения при данном давлении p_k .

Температура насыщения определяется следующим образом. Находим точку пересечения изобары $p_k = 0,05 \text{ бар}$ с верхней пограничной кривой (точка 3). Через точку 3 проходит изотерма $t = 33 \text{ }^\circ\text{C}$. Эта температура и является температурой насыщения при давлении $p = 0,05 \text{ бар}$.

$$h'_2 = 4.19 \cdot 33 = 138 \frac{\text{кДж}}{\text{кг}}.$$

$$\eta_t = \frac{3455 - 2205}{3455 - 138} = 0.377.$$

Удельный расход пара турбиной определяем по формуле

$$d = \frac{3600}{h_1 - h_{2\partial}} = \frac{3600}{3455 - 2455} = 3,6 \frac{\text{кг}}{\text{кВт} \cdot \text{ч}}.$$

ЛИТЕРАТУРА

Основная

1. Алабовский А.Н., Недужий И.А. Техническая термодинамика и теплопередача. – Киев: Выща шк., 1990.
2. Матвеев Г.А. и др. Теплотехника. – М.: Высш. шк., 1981.
3. Баскаков А.П. и др. Теплотехника. – М.: Энергоатомиздат, 1991.
4. Автомобильные двигатели / Под ред. М.С. Ховаха. – М.: Машиностроение, 1977.

Дополнительная

5. Беляев Н.М. Термодинамика. – Киев: Выща шк., 1987.
6. Техническая термодинамика и теплопередача. / В.И. Кушнырев, В.И. Лебедев, В.А. Павленко. – М.: Стройиздат, 1986.
7. Техническая термодинамика / Под ред. В.И. Крутова. – М.: Высш. шк., 1981.
8. Алексеев Г.Н. Общая теплотехника. – М.: Высш. шк., 1980.
9. Нащокин В.В. Техническая термодинамика и теплопередача. – М.: Высш. шк., 1980.
10. Двигатели внутреннего сгорания / Под ред. В.Н. Луканина. – М.: Высш. шк., 1985.
11. Тимченко И.И. Автомобильные двигатели. – Киев: УМКВО, 1990.

ПРИЛОЖЕНИЕ

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

Газы	Теплоемкость в $кДж/(кмоль \cdot K)$	
	μC_v	μC_p
Одноатомные	12.56	20.93
Двухатомные	20.93	29.31
Трех- и многоатомные	29.31	37.68

Молекулярные массы, плотности и объемы киломолей при нормальных условиях и газовые постоянные газов

Газ	Химическое обозначение	Молекулярная масса, $кг/кмоль$	Плотность при нормальных условиях, $кг/м^3$	Газовая постоянная, $Дж/(кг \cdot K)$
Воздух	–	28.96	1.293	287.0
Кислород	O_2	32.00	1.429	259.8
Азот	N_2	28.026	1.251	296.8
Водород	H_2	2.016	0.090	4124.0
Окись углерода	CO	28.01	1.250	296.8
Двуокись углерода	CO_2	44.01	1.977	188.9
Сернистый газ	SO_2	64.06	2.926	129.8

Интерполяционные формулы для истинных и средних молярных теплоемкостей газов

Газ	Молярная теплоемкость при $p=const$ в $кДж/(кмоль \cdot K)$	
	истинная μC_p	средняя μC_{pm}
	В пределах $0 - 1000^\circ C$	
O_2	$29.5802+0.0069706t$	$29.2080+0.0040717t$
N_2	$28.5372+0.0053905t$	$28.7340+0.0023488t$
CO	$28.7395+0.0058862t$	$28.8563+0.0026808t$
Воздух	$28.7558+0.0057208t$	$28.8270+0.0027080t$
SO_2	$42.8728+0.0132043t$	$40.4386+0.0099562t$
	В пределах $0 - 1500^\circ C$	
H_2	$28.3446+0.0031518t$	$28.7210+0.0012008t$
CO_2	$41.3597+0.0144985t$	$38.3955+0.0105838t$

Газ	Мольная теплоемкость при $p=const$ в $\text{кДж}/(\text{кмоль}\cdot\text{К})$	
	истинная μC_p	средняя μC_{pm}
В пределах 1000 - 2700 °С		
O_2	$33.8603+0.21951t$	$31.5731+0.0017572t$
N_2	$32.7466+0.0016517t$	$29.7815+0.0016835t$
CO	$33.6991+0.0013406t$	$30.4242+0.0015579t$
<i>Воздух</i>	$32.9564+0.0017806t$	$30.1533+0.0016973t$
В пределах 1500 - 3000 °С		
H_2	$31.0079+0.0020243t$	$28.6344+0.0014821t$
CO_2	$56.8768+0.0021738t$	$48.4534+0.0030032t$

Средние мольные теплоемкости газов в интервале температур $0 \div t$ °С

Температура $t, \text{°C}$	Мольная теплоемкость при $p=const$ в $\text{кДж}/(\text{кмоль}\cdot\text{К})$			
	CO_2	SO_2	N_2	O_2
0	35.860	38.85	29.115	29.274
100	38.112	40.65	29.144	29.538
200	40.059	42.33	29.228	29.931
300	41.755	43.88	29.383	30.400
400	43.250	45.22	29.601	30.878
500	44.573	46.39	29.864	31.334
600	45.753	47.35	30.149	31.761
700	46.813	48.23	30.451	32.150
800	47.763	48.94	30.748	32.502
900	48.617	49.61	31.037	32.825
1000	49.392	50.16	31.313	33.118
1100	50.099	50.66	31.577	33.386
1200	50.740	51.08	31.828	33.633
1300	51.322		32.067	33.863
1400	51.858		32.293	34.076
1500	52.348		32.502	34.282

Учебное издание

Рабочая программа и методические указания к контрольной работе по дисциплинам “Теоретические основы теплотехники” и “Термодинамика и теплотехника” для студентов ФЗО специальностей 7.090288, 7.090214, 7.092501

Составители: Талда Геннадий Борисович
Ефремов Андрей Александрович

Ответственный за выпуск

Жилин С.С.

Подписано к печати	Формат 60x84 1/16	Бумага офсетная
Отпечатано на ризографе	Усл. печ. листов	Уч.-изд.л
Заказ №	Тираж	Цена договорная

Адрес редакции издателя и полиграф предприятия
ХНАДУ, 61002, Харьков-02, ул. Петровского, 25

Отпечатано в издательстве Харьковского национального автомобильно-
дорожного университета

Министерство образования и науки Украины
Совместный факультет ВУЗ “ХТИ” и ХНАДУ

К печати и в свет разрешаю
Проректор

И.П. Гладкий

Рабочая программа и методические указания

к контрольной работе по дисциплинам “Теоретические основы теплотехники” и
“Термодинамика и теплотехника” для студентов ФЗО специальностей 7.090288,
7.090214, 7.092501

Все цитаты, цифровой, фактический материал и библиографические сведения проверены, написание страниц соответствует стандартам

Утверждено
методическим советом
университета
протокол № 1 от 19.10.2001г.

Составители:

Талда Г.Б.
Ефремов А.А.

Ответственный за выпуск

Жилин С.С.

Харьков, ХНАДУ, 2002