

ФГБОУ ВО
«Удмуртский государственный университет»
Институт нефти и газа им. М.С. Гуцериева

МЕТОДИЧЕСКИЕ УКАЗАНИЯ
к выполнению практических работ
по дисциплине «Термодинамика и теплопередача»
Раздел «Термодинамика»

Ижевск
2020

Составитель: д.т.н., профессор кафедры РЭНГМ С.С. Макаров

Методические указания включают программу курса «Термодинамика», исходные данные по вариантам заданий, вопросы для самоконтроля, необходимый справочный материал, примеры и рекомендации по выполнению практических работ.

Общие указания

При изучении курса «Термодинамика» обучающиеся руководствуясь программой курса, работают с использованием учебников и учебных пособий, выполняют практические работы.

Практические работы должны быть аккуратно оформлены в отдельных тетрадях или на листах формата А4, на обложке обязательно следует указать информацию о студенте и учебном заведении. Решение задач начинается с подробного изложения содержания задачи без сокращений, выделив исходные данные, соответствующие заданному варианту.

При выполнении практических заданий необходимо соблюдать следующие условия: решение задач сопровождать кратким пояснительным текстом, в котором указывать, какая величина определяется, и по какой формуле, какие величины подставляются в формулу и откуда они берутся (из условия задачи, из справочника или были определены выше и т.д.). Вычисления проводить в единицах СИ и показывать ход решения.

Всегда, если это возможно, нужно осуществлять контроль своих действий и оценивать достоверность полученных численных результатов.

Обязательно также ответить на вопросы, предложенные для проверки усвоения материала. Работы, выполненные не по своему варианту, не рассматриваются.

ПРОГРАММА КУРСА « ТЕРМОДИНАМИКА »

Тема 1. Основные понятия и определения

Предмет технической термодинамики и ее метод. Термодинамическая система и ее виды. Рабочее тело и внешняя среда. Теплота и работа как формы энергетического взаимодействия внешней среды и рабочего тела. Основные параметры состояния рабочего тела. Термодинамический процесс. Равновесный и неравновесный процессы. Обратимый и необратимый процессы. Графическое изображение обратимых процессов в термодинамических диаграммах. Понятие о круговом обратимом процессе.

Идеальный газ. Уравнение состояния идеального газа. Смеси идеальных газов. Способы задания газовых смесей. Определение средней молярной массы и удельной газовой постоянной смеси. Парциальные давления и объемы.

Методические указания

Техническая термодинамика — наука, изучающая взаимопревращения теплоты и работы и условия, при которых эти превращения совершаются наиболее эффективно. Она устанавливает взаимосвязь между тепловыми и механическими процессами, которые совершаются в тепловых и холодильных машинах, изучает процессы, происходящие в газах и парах, а также свойства этих тел при различных физических условиях.

Теоретическим фундаментом, на котором базируются все выводы технической термодинамики, являются первый и второй законы термодинамики, представляющие собой обобщение опыта познания человеком природы. Основная особенность метода термодинамики — логически последовательное применение аналитических выражений первого и второго законов термодинамики совместно с уравнением состояния рабочего тела, без использования каких-либо гипотез о внутреннем его строении. Этот метод оказывается эффективным как при теоретических выводах формул, так и при анализе работы различных тепловых и холодильных машин и установок. При изучении темы студент должен внимательно разобрать такие понятия, как термодинамическая система, рабочее тело и внешняя среда, равновесное и неравновесное состояния рабочего тела, термодинамический процесс.

Необходимо усвоить определения и физическую суть таких понятий, как равновесный и неравновесный, обратимый и необратимый термодинамические процессы. Понять, что равновесное состояние рабочего тела, так же как равновесный и обратимый процессы, является научной абстракцией, как некоторые идеализированные модели реальных состояний и процессов. Реальные состояния и процессы приближаются к идеализированным при условии очень малых изменений параметров состояния и когда время между последовательными изменениями состояния

достаточно велико. Однако именно введение этих идеализированных понятий позволило построить стройный математический аппарат термодинамики, позволяющий получать результаты, достаточно близкие к практике.

Для усвоения последующего материала необходимо уяснить, что теплота и работа представляют собой определенные формы передачи энергии — тепловую и механическую, причем работа может переходить в теплоту, а теплота в работу, т.е. они взаимно-превращаемы (тема 2).

Работа всегда полностью превращается в теплоту, в то время как переход теплоты в работу имеет определенные ограничения даже в идеальном процессе (тема 3). Взаимное превращение теплоты и работы в тепловой машине осуществляется с помощью рабочего тела, которое благодаря тепловому и механическому воздействию должно обладать способностью значительно изменять свой объем. Поэтому в качестве рабочего тела в тепловых машинах используется газ или пар. Физическое состояние рабочего тела в термодинамике определяется тремя параметрами: абсолютным давлением p , удельным объемом v и абсолютной температурой T . Эти три параметра называются основными и связаны между собой уравнением состояния $F(p, v, T) = 0$. Независимые, т.е. выбираемые произвольно, — два любых параметра, а третий определяют из уравнения состояния. Например, если p и v — независимые параметры, то $T = \varphi(p, v)$, где $\varphi(p, v)$ — функция, определяемая при решении уравнения состояния относительно зависимого параметра T .

Для понимания физической сути изучаемых закономерностей термодинамики и принципов работы различных теплотехнических устройств нужно овладеть принципом графического изображения любых процессов, включая круговые (циклы) в термодинамических диаграммах. Необходимо уяснить, что графически можно изобразить только равновесные обратимые процессы и циклы, которые совершаются рабочим телом.

Во всех теплотехнических установках, в которых в качестве рабочего тела используют газ, он считается идеальным, т.е. газом, состоящим из молекул — материальных точек, не имеющих размеров и между которыми отсутствуют силы взаимодействия (притяжения и отталкивания), кроме упругих соударений. Как известно из физики, такой газ подчиняется уравнению состояния Клапейрона, которое может быть записано для m кг газа ($pV=mRT$) и для 1 кг газа ($pv=RT$, где $v=V/m$ — удельный объем газа, $м^3/кг$).

Понятие идеального газа является научной абстракцией, моделью реального газа, дающей хорошую сходимость с практикой, когда состояние газа далеко от состояния сжижения. Применение этой модели позволяет построить достаточно простые аналитические зависимости термодинамики, применение которых к тепловым машинам дает, как правило, приемлемую сходимость с практикой.

Для насыщенного пара, т. е. для состояния, близкого к состоянию сжижения, модель идеального газа неприемлема. В этом случае приходится применять очень сложные модели и уравнения реальных газов, в которых учитывают собственные размеры молекул, а также силы взаимодействия между ними. Уясните получение уравнения состояния Клапейрона — Менделеева для *1 моля* идеального газа.

Важно понять различие между удельной газовой постоянной, принимающей определенное значение для каждого газа, и универсальной газовой постоянной, одинаковой для всех газов и равной $R_u = 8,314 \text{ кДж}/(\text{кмоль К})$. Запомните связь между этими газовыми постоянными и уясните физический смысл каждой из них.

При изучении газовой смеси необходимо понять, что основным здесь является умение определять газовую постоянную смеси газов, заданной массовым и объемным составом. Знание газовой постоянной смеси позволяет при исследовании термодинамических процессов пользоваться уравнением Клапейрона так же, как и для отдельного газа. В этой теме раскрывается необходимый комплекс определений и понятий, на основе которых строится все дальнейшее изложение технической термодинамики.

Литература: [1], с. 5—20, 22—26, 28—32, 54—56.

Вопросы для самопроверки

1. Приведите определение термодинамической системы. 2. Что такое рабочее тело? 3. Какое число независимых параметров определяет состояние рабочего тела? Почему? 4. В чем состоит энергетическое воздействие внешней среды на рабочее тело? 5. Какой процесс называют термодинамическим? 6. Какие процессы называют обратимыми, а какие — необратимыми? 7. Какая разница между разомкнутым термодинамическим процессом и круговым (циклом)? 8. Какой газ называют идеальным? 9. Какие известны уравнения состояния идеального газа? 10. Что такое моль газа? Что называют нормальными физическими условиями? 11. Каково соотношение между удельной газовой постоянной и универсальной газовой постоянной и в каких единицах их выражают? 12. Как определяют газовую постоянную смеси идеальных газов, заданную массовыми долями? 13. Как определяют газовую постоянную смеси идеальных газов, заданную объемными долями?

Тема 2. Первый закон термодинамики

Сущность первого закона термодинамики. Внутренняя энергия. Работа процесса. Графическое изображение работы в pV -диаграмме. Теплота процесса. Принцип эквивалентности теплоты и работы. Аналитическое выражение и формулировка первого закона термодинамики. Энтальпия. Теплоемкость газов. Средняя и истинная теплоемкости. Теплоемкость смеси идеальных газов. Применение первого закона термодинамики к идеальному газу. Теплоемкость идеального газа при постоянном давлении и постоянном объеме. Энтропия. Вычисление изменения энтропии идеальных газов. Ts -диаграмма. Графическое изображение теплоты в диаграмме Ts .

Методические указания

Студент должен понять особенности применения в термодинамике общего закона сохранения и превращения энергии. Энергетические изменения, происходящие в термодинамической системе, определяют по изменению параметров рабочего тела, которое является объектом анализа.

Аналитическое выражение первого закона термодинамики имеет две

формы: $q = \Delta u + \int_{v_1}^{v_2} p dv$; $q = \Delta i - \int_{p_1}^{p_2} v dp$, где $\Delta u, \Delta i$ - изменение внутренней

энергии и энтальпии, соответственно.

Следует четко разобраться в разнице понятий «работа расширения» и «располагаемая работа» и уметь дать геометрическую интерпретацию их в p - v -диаграмме.

Уясните принципиальную разницу между внутренней энергией, однозначно определяемой данным состоянием рабочего тела, а также работой и теплотой, которые появляются лишь при наличии процесса перехода рабочего тела из одного состояния в другое и, следовательно, зависят от характера этого процесса. Следует понять разницу между функцией состояния и функцией процесса.

При изучении темы вводится еще одна функция (параметр) состояния, которая называется энтропией. Этот параметр служит лишь для упрощения термодинамических расчетов, а главное, позволяет графически изобразить теплоту, участвующую в процессе, в T - s -диаграмме. Уясните, как из выражения $ds = dq/T$ можно установить знак теплоты, участвующей в процессе. Знание этого вопроса поможет при пользовании T - s -диаграммой, на которой теплота q - площадь под кривой процесса. В диаграмме T - s эта площадь определяет в масштабе количество теплоты, подведенной к рабочему телу (+) ($ds > 0$) или отведенной от него (—) ($ds < 0$).

Уясните, почему для всех процессов, в которых рабочим телом является идеальный газ, всегда $du = c_v dT$, а $di = c_p dT$.

Литература: [1], с. 45—78.

Вопросы для самопроверки

1. Что такое внутренняя энергия рабочего тела? 2. Что такое теплота и работа процесса? 3. В чем сущность первого закона термодинамики? 4. Что такое энтальпия и энтропия? В чем они выражаются? 5. В чем разница между функцией состояния и функцией процесса? 6. Как доказать на примере идеального газа, что энтальпия и энтропия являются функциями состояния? 7. Как графически изобразить работу и теплоту процесса? 8. Что такое теплоемкость? Какие существуют теплоемкости? 9. В чем разница между средней и истинной теплоемкостями? 10. Как вычислить теплоемкость смеси идеальных газов? 11. Каков физический смысл удельной газовой постоянной? В чем физический смысл уравнения Майера? 12. Как вычислить изменение энтропии идеального газа?

Тема 3. Второй закон термодинамики

Круговые термодинамические процессы (циклы). Прямой и обратный (обратимый) циклы Карно. Обобщенный (регенеративный) цикл Карно. Сущность второго закона термодинамики и его основные формулировки. Аналитическое выражение второго закона термодинамики. Изменение энтропии изолированной термодинамической системы. Максимальная работа и понятие об эксергии.

Методические указания

Непрерывное получение работы за счет подведения теплоты возможно только в цикле и невозможно в разомкнутом процессе. Поэтому тщательно изучите все вопросы, относящиеся к циклам, особенно к циклу Карно, который имеет большое значение в термодинамике. С его помощью выводят все аналитические зависимости. Формула для к.п.д. цикла Карно, по существу, также является техническим выражением сущности второго закона термодинамики в применении к тепловым машинам. Обратимый цикл Карно при выбранных температурах T_{max} горячего источника теплоты и T_{min} холодильника имеет наивысший термический к.п.д. среди любых других обратимых циклов. Первый закон термодинамики не устанавливает условий, при которых теплота в машине превращается в работу. Это легко уяснить из следующих рассуждений. Если применить уравнение первого закона термодинамики к циклу и проинтегрировать его по замкнутому контуру цикла, то получим $q_u = \oint dq = \oint du + \oint dl_u = 0 + l_u = l_u$, поскольку u — функция состояния. Отсюда вытекает, что теплота, подведенная к рабочему телу в цикле (q_u), равна работе, полученной в результате совершения цикла (l_u). Последнее может привести к неверному выводу о полном превращении теплоты в работу цикла, что равносильно возможности создания вечного двигателя второго рода. Это противоречие легко устранить с помощью понятия энтропии как функции состояния. Проинтегрировав выражение $ds = dq/T$ по замкнутому контуру цикла, получим $\oint ds = \oint dq/T = 0$, так как s — функция состояния. Учитывая, что абсолютная температура T не может быть отрицательной, приходим к выводу, что интеграл $\oint dq/T$ может быть равен нулю только в том случае, если на отдельных участках цикла будет неравенство $dq < 0$, т. е. будет осуществляться отвод теплоты. Следовательно, при совершении цикла наряду с подводом теплоты к рабочему телу ($dq > 0$) обязательно должны быть процессы с отводом теплоты ($dq < 0$). Именно это и означает, что подведенную к рабочему телу теплоту в цикле нельзя полностью превратить в работу.

Несмотря на наличие в литературе большого количества формулировок второго закона термодинамики, сущность этого закона сводится к двум положениям: - теплота не может самопроизвольно переходить от холодного тела к горячему без затраты работы; - для превращения теплоты в работу в периодически действующей машине необходимо наличие не менее двух источников теплоты: теплоотдатчика (горячего) и теплоприемника (холодного). При этом только часть теплоты, переданной телу от горячего источника, может быть превращена в работу, остальная часть должна быть отдана холодному источнику.

В отличие от первого закона термодинамики, являющегося абсолютным законом природы, справедливым как для макромира, так и для микромира, второй закон термодинамики таковым не является. Объясняется это тем, что он получен из наблюдений над объектами, имеющими конечные размеры в окружающих нас земных условиях, и не может произвольно распространяться как на бесконечную вселенную, так и на бесконечный микромир.

Если рассматривается изолированная система, состоящая из теплоотдатчика, рабочего тела, совершающего обратимый цикл Карно, и теплоприемника, то:

а) в случае обратимых процессов передачи теплоты (т. е. при бесконечно малой разнице температур) от теплоотдатчика рабочему телу и от него теплоприемнику энтропия системы остается постоянной ($\Delta s_c = 0$);

б) в случае, если один из процессов, например теплоотдача от источника к рабочему телу, протекает при конечной разнице температур, энтропия системы возрастает ($\Delta s_c > 0$).

Независимо от обратимости процесса энтропия рабочего тела в цикле (как функция состояния) всегда остается неизменной ($\Delta s_{p.m} = 0$).

Все реальные процессы являются необратимыми, поэтому энтропия изолированной системы, в которой протекают такие процессы, всегда возрастает ($\Delta s_c > 0$). Возрастание энтропии в необратимых процессах само по себе ни о чем не говорит. Однако возрастание энтропии приводит к уменьшению работоспособности изолированной системы. Для количественной оценки потери работоспособности системы вводится понятие удельной эксергии, под которой понимают максимальную удельную работу, совершаемую системой при ее переходе от данного состояния до равновесия с окружающей средой. Следует понимать, почему потеря эксергии, ведущая к уменьшению работоспособности системы из-за необратимости процесса, определяется произведением наименьшей температуры системы на приращение энтропии.

Литература: [1], с. 96—123.

Вопросы для самопроверки

1. Что такое термодинамический цикл? 2. В чем состоит термическая и механическая необратимости процессов? 3. Что такое прямой и обратный (обратимые) циклы Карно? 4. Что называют термическим к.п.д. и холодильным коэффициентом произвольного цикла, чему они равны для цикла Карно? 5. Почему обратимый цикл Карно является самым эффективным среди других циклов, осуществляемых в заданном интервале температур? 6. В чем сущность второго закона термодинамики? Приведите основные формулировки этого закона. 7. Приведите аналитическое выражение второго закона термодинамики для обратимых и необратимых процессов. 8. Как изменяется энтропия изолированной системы при протекании в ней обратимых и необратимых процессов? 9. Что такое эксергия? 10. Чем определяется уменьшение работоспособности изолированной системы?

Тема 4. Термодинамические процессы

Общие вопросы исследования процессов изменения состояния любых рабочих тел. Термодинамические процессы идеальных газов. Политропные процессы. Уравнение политропы. Определение показателя политропы и теплоемкости политропного процесса. Основные термодинамические процессы: изохорный, изобарный, изотермический и адиабатный как частные случаи политропного процесса. Изображение политропных процессов в pV - и Ts -диаграммах. Отличие реального газа от идеального. Термодинамические процессы изменения состояния водяного пара как реального газа. Процессы парообразования в pV - и Ts -диаграммах. Термодинамические таблицы воды и водяного пара. Расчет термодинамических процессов водяного пара с помощью таблицы и i - s -диаграммы.

Методические указания

В термодинамике переход рабочего тела из одного равновесного состояния в другое совершается в обратимом термодинамическом процессе. Задание начального и конечного состояний рабочего тела означает полное знание всех термодинамических параметров состояния начальной и конечной точек процесса. Основная задача исследования термодинамического процесса — определение теплоты (q_{1-2}), участвующей в процессе, и работы изменения объема рабочего тела (l_{1-2}). Такие величины, как изменение внутренней энергии (Δu_{1-2}), энтальпии (Δi_{1-2}) и энтропии (Δs_{1-2}), являются вспомогательными, служащими для решения основной задачи.

Общий метод исследования термодинамических процессов является универсальным, не зависящим от природы тела. Метод базируется на применении уравнения первого закона термодинамики, записанного в двух

$$\text{равнозначных формах: } q_{1-2} = \Delta u_{1-2} + \int_{v_1}^{v_2} p dv = \Delta i_{1-2} - \int_{p_1}^{p_2} v dp.$$

Различие в применении общего метода исследования к идеальным газам и водяному пару обусловлено отсутствием для пара такого простого уравнения состояния, как уравнение Клайперона для идеального газа, и сложной зависимостью теплоемкости пара от температуры и давления. Поэтому решение основной задачи для идеального газа опирается на аналитические зависимости, в то время как для пара применение общего метода требует использования таблиц или диаграммы *is*. Например, в случае изотермического процесса изменения $l_{кг}$ рабочего тела общими формулами будут:

$$q_{1-2} = T\Delta s_{1-2} = T(s_2 - s_1), \quad l_{1-2} = q_{1-2} - \Delta u_{1-2}.$$

В случае идеального газа

$$\Delta s_{1-2} = R \ln v_2 / v_1 = R \ln p_2 / p_1, \quad \Delta u_{1-2} = 0,$$

$$q_{1-2} = RT \ln v_2 / v_1 = RT \ln p_2 / p_1 = l_{1-2},$$

В случае реального газа (пара):

$$\Delta u_{1-2} = (i_2 - p_2 v_2) - (i_1 - p_1 v_1);$$

$$q_{1-2} = T(s_2 - s_1); \quad l_{1-2} = q_{1-2} - ((i_2 - p_2 v_2) - (i_1 - p_1 v_1)),$$

где $s_1, s_2, i_1, i_2, p_1, p_2, v_1, v_2$ берутся из таблиц или снимаются с диаграммы *is* для точек, определяющих начальное и конечное состояния пара.

Водяной пар является рабочим телом в современных теплосиловых установках, а также находит широкое применение в различных технологических процессах. Необходимо разобраться в процессе парообразования и уметь изображать этот процесс в *pv*- и *Ts*-диаграммах. Параметры водяного пара можно определить по таблицам, а также с помощью *is*-диаграммы. Наиболее просто и с достаточной для инженерных расчетов точностью параметры влажного, сухого насыщенного и перегретого паров определяются с помощью *is*-диаграммы. Студент должен уяснить принцип работы с *is*-диаграммой и научиться определять по ней параметры пара различного состояния.

Любая точка на диаграмме *is* в области перегретого пара и на кривой сухого насыщенного пара определяет шесть параметров (p, v, T, s, i, u), а любая точка в области влажного пара определяет семь параметров, так как к названным выше параметрам добавляется еще степень сухости $\chi < 1$.

Нужно уметь определять все параметры любой точки на диаграмме *is*. Для успешного решения различных задач, связанных с водяным паром, научитесь схематично изображать основные процессы (изобарный, изохорный, изотермический и адиабатный) в диаграммах *pν*, *Ts* и *is*.

Уясните понятие политропного процесса, под которым понимается любой термодинамический процесс идеального газа с постоянной теплоемкостью (или показателем политропы *n*) в этом процессе, общность политропного процесса, выраженного уравнением $p\nu^n = const$, получая из него уравнение известных основных процессов (изохорного, изобарного, изотермического и адиабатного). Разберитесь в определении показателя политропы и теплоемкости политропного процесса идеального газа как обобщающих величин, из которых получают частные значения для основных процессов.

Научитесь изображать графически в *pν*- и *Ts*-диаграммах как основные, так и общие политропные процессы.

Литература: [1], с. 33—35, 80—92, 162—178.

Вопросы для самопроверки

1. Какие термодинамические процессы рабочего тела называют основными? 2. Изобразите в *pν*- и *Ts*-диаграммах основные процессы идеального газа и приведите характеристику каждому из них. 3. Чему равен показатель политропы в основных процессах идеального газа? 4. Чему равна теплоемкость политропного процесса? 5. Какие группы политропных процессов вы знаете? Покажите их на *pν*- и *Ts*-диаграммах. 6. В чем физический смысл отрицательной теплоемкости? 7. В чем принципиальное различие между идеальным и реальным газами? 8. Изобразить процесс парообразования в *pν*- и *Ts*-диаграммах. 9. В чем сущность исследования термодинамических процессов любого рабочего тела? 10. Как определяют теплоту и работу изменения объема для основных термодинамических процессов идеального газа? 11. Изобразите в *pν*-, *Ts*- и *is*-диаграммах основные термодинамические процессы водяного пара. 12. Как определяют теплоту и работу изменения объема для основных термодинамических процессов водяного пара?

Тема 5. Фазовые переходы

Основные понятия и определения. Критерии равновесного состояния. Условия равновесия изолированной и неизолированной систем. Характеристические функции. Условия фазового равновесия и фазовые переходы.

Методические указания

Усвойте основные понятия и определения при анализе равновесия однофазных и многофазных термодинамических систем. Следует понимать физический смысл характеристических функций. Так изохорно-изотермический потенциал это часть энергии, которая в изотермическом процессе превращается в работу, а связанная энергия не может быть

превращена в работу. Разобраться, почему критерием равновесного состояния системы является максимальное значение ее энтропии, а условием равновесия отдельных фаз в многофазной системе является равенство их температур, давлений и химических потенциалов.

Литература: [1], с. 126—152, [2.], с. 79-86.

Вопросы для самопроверки

1. Какие термодинамические функции считаются основными? 2. Что такое изохорно-изотермический потенциал и связанная энергия, их физический смысл? 3. Уравнение максимальной работы Гиббса-Гельмгольца при постоянных T , P . 4. Что представляет собой химический потенциал? 5. Какие условия необходимо осуществлять для равновесия однофазной и многофазной термодинамической системы?

Тема 6. Термодинамика потока. Истечение и дросселирование жидкостей, газов и паров

Уравнение первого закона термодинамики для потока и его анализ. Адиабатное истечение. Скорость адиабатного истечения. Критическое отношение давлений. Расчет скорости истечения и секундного массового расхода для критического режима. Воздействие на поток геометрии канала. Сопло Лавала. Особенности определения скорости истечения для водяного пара. Влияние потерь на скорость истечения. Сущность процесса дросселирования. Изменение параметров рабочего тела при дросселировании. Понятие об эффекте Джоуля — Томсона. Температура инверсии. Техническое применение эффекта дросселирования. Условное изображение процесса дросселирования водяного пара в is -диаграмме. Потеря работоспособности рабочего тела при дросселировании.

Методические указания

Тщательно разберите физический смысл отдельных членов уравнения первого закона термодинамики для потока. Уясните, за счет чего совершаются различные виды работ при течении рабочего тела, почему в суживающихся и цилиндрических каналах скорость потока не может превзойти скорости звука. Разберитесь в воздействии профиля канала на скорость потока и проанализируйте изменение параметров рабочего тела при дросселировании. Понятие об эффекте Джоуля — Томсона. Температура инверсии. Техническое применение эффекта дросселирования. Условное изображение процесса дросселирования водяного пара в is -диаграмме. Потеря работоспособности рабочего тела при дросселировании.

Разберитесь в воздействии профиля канала на скорость потока и проанализируйте изменение параметров рабочего тела при течении его по соплу Лавала. Поймите принципиальную разницу в расчете скорости истечения идеального газа и водяного пара. Необходимо отчетливо представлять себе влияние трения на адиабатный процесс истечения идеального газа и водяного пара и уметь изображать реальный процесс истечения в Ts - и is -диаграммах. Из-за явной необратимости адиабатного

процесса дросселирования последний нельзя отождествлять с процессом, протекающим при постоянной энтальпии. Уясните принципиальную разницу между адиабатным дросселированием, при котором $dq = 0$, а $\Delta s > 0$, и адиабатным обратимым процессом расширения рабочего тела, при котором $dq=0$ и $\Delta s = 0$. Понять, почему в результате дросселирования водяного пара температура его может уменьшаться, увеличиваться или оставаться неизменной.

Литература: [1], с. 180-194, 197-204.

Вопросы для самопроверки

1. Какие допущения лежат в основе вывода уравнения первого закона термодинамики для потока? 2. Объясните физический смысл каждого члена уравнения первого закона термодинамики для потока. 3. На что расходуется работа расширения газа в потоке? 4. Что такое работа проталкивания и какой она может иметь знак? 5. Что такое располагаемая работа, как показать ее на pv -диаграмме? 6. Что такое сопло и диффузор? 7. Каков физический смысл критической скорости? 8. Какая связь между изменением профиля канала, изменением плотности рабочего тела и изменением скорости его течения? 9. Каким условиям должны отвечать диффузор и сопло для дозвукового и сверхзвукового режимов течения? 10. Какой процесс носит название дросселирования? 11. Как протекает процесс адиабатного дросселирования? 12. Как и почему меняется температура водяного пара при его дросселировании? 13. Возможно ли осуществить сжижение газа в процессе дросселирования?

Тема 7. Термодинамический анализ процессов в компрессорах

Назначение и классификация компрессоров. Техническая работа в компрессоре. Работа, затрачиваемая на привод компрессора. Изотермическое и политропное сжатие. Индикаторная диаграмма. Отличие индикаторной диаграммы действительного цикла от теоретического. Понятие о многоступенчатом сжатии. Изображение в pv - и Ts -диаграммах процессов в компрессорах для одно- и многоступенчатого сжатия. Определение эффективной мощности, затрачиваемой на привод компрессора, и понятие о внутреннем относительном к.п.д.

Методические указания

Из-за широкого распространения в промышленности компрессоров термодинамический анализ их работы имеет большое значение в подготовке студентов. Ознакомившись с конструктивной схемой и работой поршневых и центробежных компрессоров, обратите внимание на то, что процессы всасывания и выталкивания, изображенные на индикаторной диаграмме горизонтальными линиями, нельзя рассматривать как изобарные, так как в этих процессах не происходит изменения состояния, а происходит изменение количества всасываемого или выталкиваемого рабочего тела. Уделите внимание изображению термодинамических процессов в pv - и Ts - диаграммах. Сравните изотермическое, адиабатное и политропное сжатие рабочего тела.

Уясните влияние вредного пространства на работу поршневого компрессора. В связи с применением высокого давления в некоторых технологических аппаратах разберите принципы работы многоступенчатых компрессоров.

Литература: [1], с. 217-228.

Вопросы для самопроверки

1. Каково назначение компрессоров? 2. Какова классификация компрессоров? 3. Каковы принципы действия поршневого компрессора и изображение работы компрессора в p - v -диаграмме? 4. Какой процесс сжатия в поршневом компрессоре наиболее выгодный? 5. Можно ли получить газ высокого давления в одноступенчатом компрессоре? 6. Как определяют работу, затрачиваемую на привод компрессора? 7. Как определяют техническую работу компрессора? 8. Чем вызвано применение нескольких ступеней сжатия в многоступенчатом компрессоре? 9. Чем отличаются центробежные компрессоры от поршневых? 10. Приведите описание многоступенчатого компрессора. 11. Как влияет вредное пространство на работу компрессора? 12. Как определяют эффективную мощность, затрачиваемую на привод компрессора? 13. Как определяют внутренний относительный к.п.д. компрессора?

Тема 8. Циклы двигателей внутреннего сгорания. Циклы газотурбинных установок

Классификация поршневых двигателей внутреннего сгорания (ДВС). Изображение циклов ДВС в p - v - и T - s -диаграммах. Анализ и сравнение циклов поршневых двигателей внутреннего сгорания. Определение термического к.п.д. и влияние параметров цикла ДВС на увеличение к.п.д. Преимущества газотурбинных установок по сравнению с поршневым ДВС. Циклы газотурбинных установок. Цикл газотурбинной установки с подводом теплоты при постоянном давлении. Цикл газотурбинной установки с подводом теплоты при постоянном объеме. Изображение циклов в p - v - и T - s диаграммах. Анализ и сравнение циклов газотурбинных установок. Определение термического к.п.д. и методы повышения к.п.д. газотурбинных установок. Методы анализа циклов теплоэнергетических установок. Эксергетический метод анализа циклов.

Методические указания

Термодинамический анализ циклов двигателей внутреннего сгорания проводится при допущении термодинамической обратимости процессов, составляющих цикл. Для простоты анализа циклов ДВС в качестве рабочего тела принимают идеальный газ с постоянной теплоемкостью. Разность температур между источником теплоты и рабочим телом считают бесконечно малой, а подвод теплоты к рабочему телу осуществляют от внешних источников теплоты, а не за счет сжигания топлива. Следует научиться анализировать различные циклы, пользуясь при этом p - v - и T - s -диаграммами. При рассмотрении действительных процессов обратите внимание на отличие индикаторных диаграмм от теоретического идеального цикла.

Проанализируйте уравнение для определения термического к.п.д. различных циклов и влияние основных параметров на термический к.п.д. Разберитесь в экономичности циклов ДВС. При сравнении экономичности рассматриваемых циклов при одинаковых степенях сжатия следует помнить, что наиболее экономичным будет цикл с изохорным подводом теплоты. Если же сравнение экономичности производить при одинаковых максимальных давлениях и температурах, то максимальный к.п.д. имеет цикл с изобарным подводом теплоты, а наименьший — цикл с изохорным подводом теплоты. При рассмотрении газотурбинных установок (ГТУ) обратите внимание на преимущества их перед поршневыми двигателями внутреннего сгорания. Уясните принцип работы газотурбинных установок, запомните схемы установок и научитесь анализировать их работу, используя $p\nu$ - и Ts диаграммы. Поймите принцип получения уравнения термического к.п.д., внутреннего относительного к.п.д. и эффективного к.п.д. газотурбинных установок, обратите внимание на физический смысл этих понятий. Запомните, что при сравнении циклов ГТУ при различных степенях повышения давлений и одинаковых максимальных температурах наибольший к.п.д. имеет цикл с изобарным подводом теплоты. Разберите методы повышения термического к.п.д. и запомните, что регенерация теплоты, ступенчатое сжатие и ступенчатый подвод теплоты значительно повышают к.п.д. газотурбинной установки, а идеальный цикл при этом приближается к обобщенному циклу Карно.

Литература: [1], с. 230—241, 244—254.

Вопросы для самопроверки

1. Приведите определение понятия «двигатель внутреннего сгорания».
2. Как классифицируют теоретические циклы двигателей внутреннего сгорания?
3. Изобразите тепловой процесс цикла ДВС с подводом теплоты при $\nu = \text{const}$ в $p\nu$ - и Ts -диаграммах.
4. Как определить термический к.п.д. цикла ДВС с подводом теплоты при $\nu = \text{const}$?
5. Почему в циклах ДВС с подводом теплоты при $\nu = \text{const}$ нельзя применять высокие степени сжатия?
6. Изобразите идеальный цикл двигателя внутреннего сгорания с подводом теплоты при $\nu = \text{const}$ в $p\nu$ - и Ts -диаграммах.
7. Как определить термический к.п.д. цикла ДВС с подводом теплоты при $p = \text{const}$?
8. Изобразите идеальный цикл двигателя внутреннего сгорания со смешанным подводом теплоты в $p\nu$ - и Ts -диаграммах.
9. Как определить термический к.п.д. и полезную работу в цикле?
10. Почему термический к.п.д. цикла ДВС при $p = \text{const}$ больше, чем в цикле при $\nu = \text{const}$?
11. Какие преимущества имеют газотурбинные установки по сравнению с двигателями внутреннего сгорания?
12. Приведите принципиальную схему газотурбинной установки с подводом теплоты при $\nu = \text{const}$. Изобразите тепловой процесс в $p\nu$ - и Ts -диаграммах.
13. Приведите принципиальную схему газотурбинной установки с подводом теплоты при $p = \text{const}$. Изобразите тепловой процесс в $p\nu$ и Ts диаграммах.
14. Что называют внутренним относительным к.п.д.

газотурбинной установки и как его определяют? 15. Что называют эффективным к.п.д. газотурбинной установки и как его определяют? 16. Назовите методы повышения термического к.п.д. газотурбинной установки. 17. Приведите сравнительную характеристику газотурбинных установок. 18. В чем сущность эксергетического метода анализа циклов?

Тема 9. Циклы паросиловых установок

Основной цикл паросиловой установки — цикл Ренкина. Принципиальная схема паросиловой установки. Изображение идеального цикла Ренкина в pv -, Ts - и is -диаграммах. Определение термического к.п.д. цикла Ренкина. Влияние основных параметров на термический к.п.д. цикла Ренкина. Способы повышения экономичности паросиловых установок. Цикл с вторичным перегревом пара, регенеративный цикл, бинарные и парогазовые циклы. Основы теплофикации. Понятие о внутреннем, относительном и эффективном к.п.д. паросиловых установок. Понятие о циклах атомных силовых установок.

Методические указания

Циклы паросиловых установок являются основой теплоэнергетики. Поэтому повышению эффективности паросиловых установок в настоящее время уделяется большое внимание. Прежде всего необходимо изучить историю развития теории циклов паросиловых установок, ее современное состояние и перспективы развития. Особое внимание уделите основному циклу паросиловой установки. Разберите принципиальную схему установки. За основной цикл принят идеальный цикл Ренкина. В этом цикле осуществляется полная конденсация рабочего тела в конденсаторе, поэтому для подачи питательной воды в паровой котел вместо громоздкого малоэффективного компрессора используется питательный насос, который имеет малые габариты и высокий к.п.д. Исследование основного цикла осуществляется с помощью pv -, Ts и is -диаграмм. Умение анализировать циклы с помощью диаграмм является обязательным. Разберите вывод уравнения для определения термического к.п.д. цикла Ренкина. Исследование термического к.п.д. при различных начальных и конечных состояниях пара позволяет понять, что увеличение начального давления и температуры, а также снижение давления в конденсаторе приводят к росту к.п.д. паросиловой установки и в итоге — значительной экономии топлива. Повышение к.п.д. достигается путем изменений в самом цикле. Эти изменения приводят к созданию циклов, из которых наибольший интерес представляют: с вторичным перегревом пара, регенеративный, парогазовый и бинарные. Несмотря на снижение термического к.п.д. в теплофикационном цикле, метод комбинированной выработки тепловой энергии является наиболее прогрессивным. Комбинированное производство теплоты и электроэнергии значительно снижает расходы топлива по сравнению с отдельной выработкой, поэтому развитие теплофикации имеет большое значение. При изучении темы ознакомьтесь с общими понятиями

термодинамических циклов атомных установок. Строительство АЭС с реакторами на быстрых нейтронах — дальнейшее развитие атомной энергетики.

Литература: [1], с. 259—277, 280—287.

Вопросы для самопроверки

1. В чем принципиальное отличие паросиловой установки от двигателей внутреннего сгорания?
2. Приведите принципиальную схему паросиловой установки.
3. Изобразите идеальный цикл Ренкина в p - v -диаграмме.
4. Изобразите идеальный цикл Ренкина в T - s -диаграмме.
5. Изобразите идеальный цикл Ренкина в i - s -диаграмме.
6. В чем отличие цикла Ренкина от цикла Карно?
7. Как определить термический к.п.д. цикла Ренкина?
8. Как и почему изменяется термический к.п.д. цикла Ренкина при увеличении начальных параметров водяного пара?
9. Каково влияние конечных параметров водяного пара на термический к.п.д. цикла Ренкина?
10. Покажите с помощью i - s -диаграммы, как изменяется влажность пара в конце адиабатного расширения при повышении начального давления при неизменной начальной температуре и конечном давлении пара?
11. Для каких целей в паросиловой установке используют вторичный перегрев пара?
12. Объясните работу регенеративного цикла паросиловой установки с помощью i - s -диаграммы.
13. Приведите описание бинарного цикла.
14. Что такое внутренний относительный к.п.д. паросиловой установки и как его определяют?
15. В чем преимущество комбинированной выработки теплоты и электроэнергии?
16. Как определяют удельный расход пара в паросиловой установке?
17. Как определяют эффективный к.п.д. паросиловой установки?
18. В чем сущность парогазового цикла?

Тема 10. Циклы холодильных машин, теплового насоса и термотрансформаторов (обратные термодинамические циклы)

Основные понятия о работе холодильных установок. Классификация холодильных установок. Понятие о холодильном коэффициенте и холодопроизводительности. Циклы воздушных, парожеткорных и абсорбционных холодильных установок. Принципиальные схемы установок и изображение циклов в p - v - и T - s -диаграммах. Цикл паровой компрессорной холодильной установки, принципиальная схема и изображение цикла в T - s диаграмме. Общие понятия о глубоком охлаждении. Принципиальная схема теплового насоса. Понятие о коэффициенте теплоиспользования. Требования, предъявляемые к рабочим телам холодильных установок.

Методические указания

Холодильные установки работают по обратному циклу. Знание классификации и принципиальных схем холодильных установок позволяет правильно выбирать соответствующий тип холодильной установки при расчете охлаждения. Несмотря на то что воздушные холодильные установки в промышленности используют редко, изучение схемы и принципа действия такой установки позволит студенту изучить термодинамические основы

холодильного цикла. Усвоив учебный материал темы, студент сможет анализировать с помощью Ts -диаграммы работу холодильных циклов, определять холодильные коэффициенты и холодопроизводительность установок. Особое внимание обратите на работу паровой компрессорной холодильной установки, получившей наибольшее распространение в промышленности. Уясните принципиальное отличие паровых компрессорных установок от воздушных. Запомните, что в паровой компрессорной холодильной установке не применяется расширительный цилиндр (детандер), а рабочее тело дросселируется в регулировочном вентиле. Несмотря на то что это приводит к потере холодопроизводительности, замена упрощает установку и дает возможность легко регулировать давление пара и получать низкую температуру в охладителе. По обратному циклу работают не только холодильные машины, но и тепловые насосы, в которых теплота, забираемая от окружающей среды, с помощью затраченной работы повышает энергетический уровень рабочего тела и при более высокой температуре отдается внешнему потребителю. Уясните понятие коэффициента теплоиспользования и разберите принципиальную схему и работу теплового насоса.

Литература: [1], с. 290—302.

Вопросы для самопроверки

1. Какие машины называют холодильными?
2. Назовите отрасли промышленности, в которых большое применение находят холодильные установки.
3. Как классифицируют холодильные установки?
4. Чем отличается холодильная установка от теплового двигателя?
5. Что называют холодильным коэффициентом?
6. Приведите определение понятия «холодопроизводительность».
7. Приведите принципиальную схему воздушной холодильной установки и описание ее работы.
8. Изобразите идеальный цикл воздушной холодильной установки в pV - и Ts -диаграммах.
9. Принцип работы парожеткорных холодильных установок.
10. Объясните понятие «абсорбция».
11. Приведите принципиальную схему абсорбционной холодильной установки и описание ее работы.
12. Почему наибольшее распространение получили паровые компрессорные холодильные установки?
13. Приведите принципиальную схему работы паровой компрессорной установки и описание ее работы.
14. Чем отличается работа теплового насоса от работы холодильных установок?

Практические задания

Задание № 1. Газовые смеси и теплоемкости (Параметры состояния. Уравнение состояния.)

Газовая смесь задана следующим образом: в вариантах с № 1 по 15 в объемных долях r_b , с № 16 по 30 в массовых g_i долях, процентным составом компонентов смеси (*графа 1*); давление смеси $p_{см} = \dots$ [бар] (*графа 2*), объем смеси $V_{см} = \dots$ [м³] (*графа 3*), температура смеси $t_{см} = 100$ °C ($T_{см} = 373$ K).

Определить:

- состав смеси (если состав смеси задан в объемных долях, то представить его в массовых долях, если состав смеси задан в массовых долях, то представить его в объемных долях);

- газодые постоянные компонентов R_i и смеси $R_{см}$, [кДж/(кг·K)].

- среднюю молярную массу смеси, $\mu_{см}$, [кг/кмоль], выраженную через объемные и массовые доли;

- парциальные давления компонентов p_b , выраженные через объемные r_i и массовые g_i доли;

- массу смеси $m_{см}$, [кг] и ее компонентов m_b , [кг];

- парциальные объемы V_b , [м³] и протности ρ_b , [кг/м³] компонентов и смеси $\rho_{см}$, [кг/м³];

- истинную молярную c_{μ} , [кДж/(кмоль·K)], объемную c_v , [кДж/(м³·K)] и массовую c , [кДж/(кг·K)] теплоемкости для $p = const$, $v = const$ при температуре смеси t , [°C] (*графа 4*).

- среднюю молярную c_{μ} , [кДж/(кмоль·K)], объемную c_v , [кДж/(м³·K)] и массовую c , [кДж/(кг·K)] теплоемкости интервала температур t_1-t_2 , [°C] (*графа 5*).

- количество теплоты Q , [кДж], необходимое для нагрева (охлаждения) $p = const$, на интервале температур t_1-t_2 , [°C] (*графа 5*) при для случаев, когда количество вещества смеси задано как: 2 моль, 5 м³, 7 кг.

Варианты заданий приведены в таблице 1.

Справочные данные, необходимые для решения задачи, приведены в таблицах 5-7, приложения.

Варианты заданий № 1

Таблица. 1

№ зад ачи	(1)							(2)	(3)	(4)	(5)
	CO ₂	H ₂	CO	N ₂	H ₂ O	Воздух	O ₂	$p_{ср}$ [бар]	$V_{ср}$ [м ³]	t , [°C]	t_1-t_2 , [°C]
1	12	-	-	75	8	-	5	1,0	3	2000	200-1000
2	10	-	2	80	-	-	8	0,95	2	450	300-100
3	-	5	15	70	10	-	-	0,9	4	500	100-300
4	13	-	-	75	6	-	6	1,05	5	150	600-200
5	-	10	30	50	10	-	-	1,05	6	200	1000-100
6	5	30	10	55	-	-	-	0,85	7	350	900-200
7	14	-	-	77	5	-	4	0,7	8	400	700-500
8	-	5	20	75	-	-	-	0,95	9	100	500-200
9	-	-	-	60	15	10	15	1,0	10	300	800-300
10	15	-	-	76	4	-	5	1,05	2	600	600-100
11	20	-	10	-	15	-	55	1,15	3	700	750-250
12	16	-	-	76	4	-	4	1,2	4	750	1000-500
13	8	5	2	85	-	-	-	1,25	5	700	300-1300
14	15	-	-	75	5	-	5	1,05	6	800	600-900
15	-	20	10	50	-	-	20	0,85	7	1000	1000-400
16	18	-	1	65	-	16	-	1,2	8	1200	850-350
17	-	15	-	45	15	-	25	1,0	9	1000	350-750
18	14	-	-	76	6	-	4	0,9	10	2000	900-600
19	-	2	25	65	-	8	-	1,0	2	450	450-300
20	-	10	-	70	-	15	5	1,05	3	350	300-150
21	10	-	-	75	5	-	10	1,05	4	600	800-300
22	-	5	10	80	-	-	5	1,0	5	550	400-300
23	17	-	-	74	5	-	4	0,95	6	400	800-300
24	10	10	20	60	-	-	-	1,15	7	1000	650-150
25	-	2	28	55	-	15	-	0,85	8	1000	150-1200
26	15	-	-	47	7	-	31	1,0	9	800	300-800
27	-	17	40	13	-	30	-	1,0	10	300	1200-1000
28	12	-	-	74	5	-	8	0,9	2	500	400-900
29	-	8	15	62	-	15	-	0,95	3	1000	800-600
30	10	-	-	80	5	-	5	1,0	4	600	600-100

Пример решения задания № 1

В качестве исходных данных выберем из таблицы 1 исходные значения параметров к задаче №1.

Смесь имеет следующий объемный состав:

$$CO_2 = 12\%; \quad r_{CO_2} = 0,12;$$

$$N_2 = 75\%; \quad r_{N_2} = 0,75;$$

$$H_2O = 8\%; \quad r_{H_2O} = 0,08;$$

$$\underline{O_2} = 5\%; \quad r_{O_2} = 0,05;$$

$$\text{Всего: } 100\% \quad \sum r_i = 1,0.$$

Давление смеси $p_{см} = 1,0 \text{ бар}$, объем смеси $V_{см} = 2 \text{ м}^3$, температура смеси $t_{см} = 100 \text{ }^\circ\text{C}$ ($T_{см} = 373 \text{ K}$), температура при которой определяется истинная теплоемкость $t = 2000 \text{ }^\circ\text{C}$ ($T = 2273 \text{ K}$), интервал температур, для которого определяется средняя теплоемкость смеси $t_1 - t_2 = 200 - 1000 \text{ }^\circ\text{C}$ ($T_1 = 473 \text{ K}$; $T_2 = 1273 \text{ K}$).

Молярная масса веществ, входящих в смесь (табл. 5), [кг/кмоль]:

$$\mu_{CO_2} = 44; \quad \mu_{N_2} = 28; \quad \mu_{H_2O} = 18; \quad \mu_{O_2} = 32.$$

Решение

Состав смеси в массовых долях:

$$g_i = r_i \mu_i / \left(\sum r_i \mu_i \right);$$

$$g_{CO_2} = \frac{0,12 \cdot 44}{0,12 \cdot 44 + 0,75 \cdot 28 + 0,08 \cdot 18 + 0,05 \cdot 32} = \frac{5,28}{29,32} = 0,180;$$

$$g_{N_2} = 0,75 \cdot 28 / 29,32 = 0,716;$$

$$g_{H_2O} = 0,08 \cdot 18 / 29,32 = 0,049;$$

$$g_{O_2} = 0,05 \cdot 32 / 29,32 = 0,055;$$

$$\sum g_i = 1,000.$$

Для вариантов с № 16 по 30 формула перехода имеет вид: $r_i = \frac{g_i}{\mu_i} / \left(\sum g_i / \mu_i \right)$.

Газовые постоянны компонентов R_i смеси, [$\text{кДж}/(\text{кг}\cdot\text{K})$]:

$$R_i = 8,314 / \mu_i;$$

$$R_{CO_2} = 8,314 / 44 = 0,189;$$

$$R_{N_2} = 8,314 / 28 = 0,297;$$

$$R_{H_2O} = 8,314 / 18 = 0,462;$$

$$R_{O_2} = 8,314 / 32 = 0,260.$$

Газовые постоянная смеси $R_{см}$, [кДж/(кг·К)]:

$$R_{см} = \sum g_i R_i = 0,18 \cdot 0,189 + 0,716 \cdot 0,297 + 0,049 \cdot 0,462 + 0,055 \cdot 0,260 = 0,284 .$$

Среднюю молярная масса смеси, $\mu_{см}$, [кг/кмоль]:

через объемные доли:

$$\mu_{см} = \sum r_i \mu_i = 0,12 \cdot 44 + 0,75 \cdot 28 + 0,08 \cdot 18 + 0,05 \cdot 32 = 29,32 ;$$

(проверка $\mu_{см} = 8,314/R_{см} = 8,314/0,284 = 29,32$)

через массовые доли:

$$\mu_{см} = 1/\sum (g_i/\mu_i) = 1/\left(\frac{0,18}{44} + \frac{0,716}{28} + \frac{0,049}{18} + \frac{0,055}{32}\right) = 1/0,03413 = 29,32 .$$

Парциальные давления компонентов p_i [бар]:

через объемные r_i доли:

$$p_i = p_{см} r_i$$

$$p_{CO_2} = 1,0 \cdot 0,12 = 0,12 ;$$

$$p_{N_2} = 1,0 \cdot 0,75 = 0,75 ;$$

$$p_{H_2O} = 1,0 \cdot 0,08 = 0,08 ;$$

$$p_{O_2} = 1,0 \cdot 0,05 = 0,05 ;$$

$$\sum p_i = p_{см} = 1,0 .$$

через массовые g_i доли

$$p_i = p_{см} g_i R_i / R_{см} ;$$

$$p_{CO_2} = 1,0 \cdot 0,18 \cdot 0,189 / 0,284 = 0,12 ;$$

$$p_{N_2} = 1,0 \cdot 0,716 \cdot 0,297 / 0,284 = 0,75 ;$$

$$p_{H_2O} = 1,0 \cdot 0,049 \cdot 0,462 / 0,284 = 0,08 ;$$

$$p_{O_2} = 1,0 \cdot 0,055 \cdot 0,260 / 0,284 = 0,05 ;$$

$$\sum p_i = p_{см} = 1,0 .$$

Масса смеси $m_{см}$ [кг]:

$$m_{см} = p_{см} V_{см} / (R_{см} T_{см}) = 1,0 \cdot 10^5 \cdot 3 / (0,284 \cdot 10^3 \cdot 373) = 2,83 .$$

Масса компонентов m_i смеси, [кг]:

$$\begin{aligned} m_i &= m_{см} g_i ; \\ m_{CO_2} &= 2,83 \cdot 0,18 = 0,51 ; \\ m_{N_2} &= 2,83 \cdot 0,716 = 2,025 ; \\ m_{H_2O} &= 2,83 \cdot 0,049 = 0,139 ; \\ m_{O_2} &= 2,83 \cdot 0,055 = 0,156 ; \\ \sum m_i &= m_{см} = 2,83 . \end{aligned}$$

Парциальные объемы V_i компонентов смеси, [M^3]:

$$\begin{aligned} V_i &= V_{см} r_i \\ V_{CO_2} &= 3,0 \cdot 0,12 = 0,36 ; \\ V_{N_2} &= 3,0 \cdot 0,75 = 2,25 ; \\ V_{H_2O} &= 3,0 \cdot 0,08 = 0,24 ; \\ V_{O_2} &= 3,0 \cdot 0,05 = 0,15 ; \\ \sum V_i &= V_{см} = 3,00 . \end{aligned}$$

Протности ρ_i компонентов смеси, [кг/ M^3]:

$$\begin{aligned} \rho_i &= m_i / V_i \\ \rho_{CO_2} &= 0,51 / 0,36 = 1,417 ; \\ \rho_{N_2} &= 2,025 / 2,25 = 0,9 ; \\ \rho_{H_2O} &= 0,139 / 0,24 = 0,579 ; \\ \rho_{O_2} &= 0,156 / 0,15 = 1,04 . \end{aligned}$$

Плотность смеси $\rho_{см}$ [кг/ M^3]:

$$\rho_{см} = 1 / \sum (g_i / \rho_i) = 1 / \left(\frac{0,18}{1,417} + \frac{0,716}{0,9} + \frac{0,049}{0,579} + \frac{0,055}{1,04} \right) = 1/1,06 = 0,94 ;$$

(проверка $\rho_{см} = m_{см} / V_{см} = 2,83 / 3,0 = 0,94$;

или $\rho_{см} = p_{см} / (R_{см} T_{см}) = 10^5 / (0,284 \cdot 10^3 \cdot 373) = 0,94$.

Истинная теплоемкость смеси для $p = const$, $v = const$, при температуре $t = 2000$ °C:

$$\begin{aligned} \text{молярная } c_{\mu} , [kJ/(кмоль \cdot K)] : \\ \mu_{CO_2} c_{pCO_2} &= 44 \cdot 1,3783 = 60,65 ; \\ \mu_{N_2} c_{pN_2} &= 28 \cdot 1,2979 = 36,3412 ; \\ \mu_{H_2O} c_{pH_2O} &= 18 \cdot 2,9366 = 52,8588 ; \mu_{O_2} c_{pO_2} = 32 \cdot 1,2004 = 38,4128 \end{aligned}$$

$$\mu_{см} c_{рсм} = \sum r_i \mu_i c_{pi} ;$$

$$\mu_{см} c_{рсм} = 0,12 \cdot 60,65 + 0,75 \cdot 36,3412 + 0,08 \cdot 52,8588 + 0,05 \cdot 34,4128 = 40,48$$

$$\mu_{см} c_{vсм} = \mu_{см} c_{рсм} - 8,314 = 40,48 - 8,314 = 32,166 .$$

объемная c_v , [кДж/(м³·К)]:

$V_1 = 22,4$ м³/кмоль – объем 1 моля любого газа;

$$c_{рсм}^* = \mu c_{рсм} / V_1 = 40,48 / 22,4 = 1,81 ;$$

$$c_{vсм}^* = \mu c_{vсм} / V_1 = 32,166 / 22,4 = 1,44 ;$$

массовая c , [кДж/(кг·К)]:

$$c_{рсм} = \mu c_{рсм} / \mu_{см} = 40,48 / 29,32 = 1,381 ;$$

$$c_{vсм} = \mu c_{vсм} / \mu_{см} = 32,166 / 29,32 = 1,097 .$$

Средняя теплоемкость на интервале температур $t_1 = 200$ °С; $t_2 = 1000$ °С:

молярная c_μ , [кДж/(кмоль·К)]:

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

$$\text{где } \mu c_{рсм} \Big|_0^t = \sum \mu_i c_{pi} \Big|_0^t r_i ;$$

$$\begin{aligned} \mu c_{рсм} \Big|_0^{1000} &= (44 \cdot 1,29 \cdot 0,12) + (28 \cdot 1,215 \cdot 0,75) \\ &+ (18 \cdot 2,4824 \cdot 0,08) + (32 \cdot 1,229 \cdot 0,05) = 37,8673 \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} \mu c_{рсм} \Big|_0^{200} &= 44 \cdot 0,9927 \cdot 0,12 + 28 \cdot 1,0517 \cdot 0,75 \\ &+ 18 \cdot 1,9406 \cdot 0,08 + 32 \cdot 0,9630 \cdot 0,05 = 31,6624 \end{aligned}$$

$$\mu c_{рсм} \Big|_{200}^{1000} = (37,8673 \cdot 1000 - 31,6624 \cdot 200) / (1000 - 200) = 39,4185 ;$$

$$\mu c_{vсм} \Big|_{200}^{1000} = \mu c_{рсм} \Big|_{200}^{1000} - 8,314 = 39,4185 - 8,314 = 31,1045 .$$

объемная c_v , [кДж/(м³·К)]:

$$c_{рсм}^* \Big|_{200}^{1000} = \mu c_{рсм} \Big|_{200}^{1000} / V_1 = 39,4185 / 22,4 = 1,7597 ;$$

$$c_{vсм}^* \Big|_{200}^{1000} = \mu c_{vсм} \Big|_{200}^{1000} / V_1 = 31,1045 / 22,4 = 1,3886 ;$$

массовая c , [$\text{кДж}/(\text{кг}\cdot\text{К})$]:

$$c_{\text{рсм}} \Big|_{200}^{1000} = \mu c_{\text{рсм}} \Big|_{200}^{1000} / \mu_{\text{см}} = 39,4185/29,32 = 1,3444;$$

$$c_{\text{всм}} \Big|_{200}^{1000} = \mu c_{\text{всм}} \Big|_{200}^{1000} / \mu_{\text{см}} = 31,1045/29,32 = 1,0608.$$

Количество теплоты Q , [кДж], необходимое для нагрева в интервале температур при $p = \text{const}$, на интервале температур от $t_1 = 200^\circ\text{C}$; до $t_2 = 1000^\circ\text{C}$:

количество вещества смеси задано как 2 моль:

$$Q_1 = 2 \mu c_{\text{рсм}} \Big|_{t_1}^{t_2} (t_2 - t_1) = 2 \cdot 39,4185 \cdot (1000 - 200) = 63069,6;$$

количество вещества смеси задано как 5 м³:

$$Q_2 = 5 c_{\text{рсм}}^* \Big|_{t_1}^{t_2} (t_2 - t_1) = 5 \cdot 1,7597 \cdot (1000 - 200) = 7038,8;$$

количество вещества смеси задано как 7 кг:

$$Q_3 = 7 c_{\text{рсм}} \Big|_{t_1}^{t_2} (t_2 - t_1) = 7 \cdot 1,3444 \cdot (1000 - 200) = 7528,64.$$

Задание № 2. Термодинамические процессы идеальных газов (Первый закон термодинамики)

Газа, массой $m = \dots [кг]$, при начальном давлении $p_1 = \dots [МПа]$ и начальной температуре, расширяется по политропе до конечного давления $p_2 = \dots [МПа]$ и конечной температуры $t_2 = \dots [°C]$. Определить начальный и конечный объемы, показатель политропы, работу расширения, изменение внутренней энергии, количество подведенной теплоты, и изменение энтропии.

Варианты заданий приведены в таблице 2.

Варианты заданий № 2

Таблица. 2

№ задачи	Газ	m , [кг]	p_1 , [МПа]	p_2 , [МПа]	t_1 , [°C]	t_2 , [°C]
1	O_2	5	2,0	0,1	427	27
2	воздух	4,5	1,5	0,2	405	15
3	H_2O	2,2	1,2	0,15	320	20
4	N_2	1,5	1,3	0,11	380	80
5	CO	3,0	1,6	0,12	450	50
6	CO_2	4,0	1,0	0,2	430	20
7	воздух	2,1	1,1	0,1	427	27
8	O_2	3,5	1,5	0,2	405	15
9	H_2O	2,4	1,2	0,15	320	20
10	SO_2	4,2	1,3	0,11	380	80
11	CO	5,1	1,6	0,12	450	50
12	CO_2	1,5	1,0	0,2	430	20
13	N_2	3,0	1,5	0,1	421	21
14	SO_2	4,0	1,1	0,1	427	27
15	O_2	2,1	1,5	0,2	405	15
16	H_2O	3,5	1,2	0,15	320	20
17	N_2	3,5	1,3	0,11	380	80
18	CO	2,4	1,6	0,12	450	50
19	CO_2	4,2	1,0	0,2	430	20
20	воздух	5,1	1,1	0,1	427	27
21	O_2	1,5	1,5	0,2	405	15
22	SO_2	3,0	1,2	0,15	320	20
23	N_2	2,1	1,3	0,11	380	80
24	CO	3,5	1,6	0,12	450	50
25	CO_2	3,5	1,0	0,2	430	20
26	воздух	2,4	1,1	0,1	427	27
27	SO_2	4,2	1,5	0,2	405	15
28	H_2O	5,1	1,2	0,15	320	20
29	N_2	3,8	1,3	0,11	380	80
30	CO	2,6	1,6	0,12	450	50

Пример решения задания № 2

В качестве исходных данных выберем из таблицы 2 исходные значения параметров к задаче №1.

Рабочий газ – кислород O_2 ;

Масса $m=5$ кг;

Начальное давление $p_1=2,0$ МПа;

Начальная температура $t_1=427$ °С ($T_1=700$ К);

Конечное давление $p_2=0,1$ МПа;

Конечная температура $t_2=27$ °С ($T_2=300$ К);

Молярная масса $\mu_{O_2}=32$ кг/кмоль;

Универсальная газовая постоянная кислорода :

$$R_{O_2} = 8,314/32 = 260 \text{ Дж}/(\text{кг}\cdot\text{К}).$$

Решение

Начальный объем находим из уравнения состояния:

$$V_1 = mR_{O_2}T_1/p_1 \quad V_1 = 5 \cdot 260 \cdot (427 + 273)/2 \cdot 10^6 = 0,452 \text{ м}^3.$$

Показатель политропы находим из уравнения $\frac{n-1}{n} = \frac{\lg(T_2/T_1)}{\lg(p_2/p_1)}$:

$$\frac{n-1}{n} = \frac{\lg(300/700)}{\lg(10^5/2 \cdot 10^6)}, \text{ откуда } n=1,39.$$

Конечный объем находим по уравнению политропы $p_2/p_1 = (V_1/V_2)^n$:

$$V_2 = V_1/(p_2/p_1)^{1/n} = 0,452/(10^5/2 \cdot 10^6)^{1/1,39} = 3,9 \text{ м}^3.$$

Работу расширения определим по формуле $L_{1-2} = [mR(T_1 - T_2)]/(n-1)$:

$$L_{1-2} = [5 \cdot 260 \cdot (700 - 300)]/(1,39 - 1) = 1334 \text{ кДж}.$$

Изменение внутренней энергии определяем по средним теплоемкостям, что дает более точный результат $U_2 - U_1 = m[c_{v0}^{t_2} t_2 - c_{v0}^{t_1} t_1]$:

$$U_2 - U_1 = 5[0,6560 \cdot 27 - 0,709 \cdot 427] = -1424 \text{ кДж}.$$

Соответственно удельное значение составит: $u_{1-2} = -284,5$ кДж/кг.

Количество подведенной теплоты $Q_{1-2} = [\Delta U_{1-2}(n-k)]/(n-1)$;

показатель адиабаты $k = \Delta i_{1-2}/\Delta u_{1-2}$;

изменение энтальпии $\Delta i_{1-2} = \left(c_p \Big|_0^{t_2} t_2 - c_p \Big|_0^{t_1} t_1 \right)$;

$$\Delta i_{1-2} = (0,9199 \cdot 27) - (0,9698 \cdot 427) = -389 \text{ кДж/кг};$$

$$k = -389 / -284,5 = 1,365 ;$$

$$Q_{1-2} = [-1424 \cdot (1,39 - 1,365)] / (1,39 - 1) = -91 \text{ кДж}.$$

**Задание № 3. Максимальная работа. Эксергия.
(Второй закон термодинамики)**

Определить эксергетический КПД котельной установки, если известно, что температура продуктов сгорания в топке равна $t_1 = \dots [^\circ\text{C}]$, а теплотворная способность топочного мазута $Q = \dots [\text{кДж/кг}]$. В котельной установке вырабатывается пар с температурой $t_2 = \dots [^\circ\text{C}]$. Температура окружающей среды $t_0 = \dots [^\circ\text{C}]$.

Варианты заданий приведены в таблице 3.

Варианты заданий № 3

Таблица. 3

<i>№ задачи</i>	$t_1, [^\circ\text{C}]$	$Q, [\text{кДж/кг}]$	$t_2, [^\circ\text{C}]$	$t_0, [^\circ\text{C}]$
1	1827	42000	557	27
2	1500	40000	550	25
3	1660	35500	560	26
4	1750	41500	570	25
5	1550	36800	540	23
6	1800	41000	535	24
7	1900	41300	545	21
8	1850	38500	560	20
9	1500	40000	550	25
10	1660	35500	560	26
11	1750	41500	570	25
12	1550	36800	540	23
13	1800	41000	535	24
14	1900	41300	545	21
15	1850	38500	560	20
16	1550	36800	540	23
17	1800	41000	535	24
18	1900	41300	545	21
19	1850	38500	560	20
20	1500	40000	550	25
21	1660	35500	560	26
22	1750	41500	570	25
23	1900	41300	545	21
24	1850	38500	560	20
25	1550	36800	540	23
26	1800	41000	535	24
27	1900	41300	545	21
28	1750	43000	543	24
29	1830	45000	542	26
30	1860	41600	538	28

Пример решения задания № 3

В качестве исходных данных выберем из таблицы 3 исходные значения параметров к задаче №1.

Температура продуктов сгорания в топке равна $t_1=1827^\circ\text{C}$ ($T_1=2100\text{K}$);

Теплотворная способность топочного мазута $Q=42000$ кДж/кг;

Температура пара $t_2=557^\circ\text{C}$ ($T_2=830\text{K}$);

Температура окружающей среды $t_0=27^\circ\text{C}$ ($T_0=300\text{K}$);

Решение

Эксергия теплоты продуктов сгорания топлива определится:

$$e_1 = Q(1 - T_0/T_1) = 42000 \cdot (1 - 300/2100) = 35990 \text{ кДж/кг.}$$

Эксергия теплоты полученного пара:

$$e_2 = Q(1 - T_0/T_2) = 42000 \cdot (1 - 300/830) = 26840 \text{ кДж/кг.}$$

Потеря эксергии на 1 кг израсходованного топлива:

$$\Delta e = e_1 - e_2 = 35990 - 26840 = 9150 \text{ кДж/кг.}$$

Потерю эксергии можно определить по уравнению Гюи-Стодолы:

$$\Delta e = T_0 \Delta s = T_0 [Q/T_2 - Q/T_1] = 300(42000/830 - 42000/2100) = 9150 \text{ кДж/кг.}$$

Эксергетический КПД котельной установки без тепловых потерь:

$$\eta_e = 1 - \Delta e/e_1 = 1 - 9150/35990 = 0,747 = 74,7 \text{ \%}.$$

Задание № 4. Термодинамический анализ процессов в компрессорах

Определить теоретическую работу на привод одноступенчатого и трехступенчатого компрессоров при сжатии воздуха до давления $p_2 = \dots [МПа]$. Начальное давление $p_1 = \dots [МПа]$ и температура $t_1 = \dots [°C]$. Показатель политропы для всех ступеней $n = \dots$. Определить работу на $1 м^3$ воздуха и температуру сжатия в одноступенчатом, трехступенчатом и четырехступенчатом компрессорах. Оценить уменьшение затрат работы при переходе с от одноступенчатого к четырехступенчатому компрессору.

Варианты заданий № 4

Таблица. 4

№ задачи	$p_1, [МПа]$	$t_1, [°C]$	$p_2, [МПа]$	n
1	0,1	27	12,5	1,2
2	0,12	24	10,5	1,1
3	0,15	25	10,0	1,2
4	0,13	26	11,5	1,21
5	0,9	21	13,4	1,11
6	0,16	20	12,0	1,12
7	0,11	23	13,0	1,1
8	0,10	25	11,2	1,14
9	0,12	24	10,5	1,15
10	0,15	25	10,0	1,2
11	0,13	26	11,5	1,21
12	0,9	21	13,4	1,11
13	0,16	20	12,0	1,12
14	0,11	23	13,0	1,1
15	0,13	26	11,5	1,21
16	0,9	21	13,4	1,11
17	0,16	20	12,0	1,12
18	0,11	23	13,0	1,1
19	0,10	25	11,2	1,14
20	0,12	24	10,5	1,15
21	0,15	25	10,0	1,2
22	0,13	26	11,5	1,21
23	0,9	21	13,4	1,11
24	0,16	20	12,0	1,12
25	0,11	23	13,0	1,1
26	0,13	26	11,5	1,21
27	0,9	21	13,4	1,11
28	0,16	20	12,0	1,12
29	0,11	23	13,0	1,1
30	0,10	25	11,2	1,14

Пример решения задания № 4

В качестве исходных данных выберем из таблицы 4 исходные значения параметров к задаче №1.

Начальное давление $p_1=0,1$ МПа;

Начальная температура $t_1=27$ °С ($T_1=300$ К);

Конечное давление $p_2=12,5$ МПа;

Показатель политропы $n=1,2$.

Решение

Одноступенчатый компрессор

Работа на привод одноступенчатого компрессора, [кДж/м³]:

$$l_{k1} = -\frac{n}{n-1} p_1 V_1 \left[\left(p_2 / p_1 \right)^{\frac{n-1}{n}} - 1 \right] = -\frac{1,2}{1,2-1} 0,1 \cdot 10^6 \cdot 1 \cdot \left[\left(12,5 / 0,1 \right)^{\frac{1,2-1}{1,2}} - 1 \right] = -774.$$

Температура в конце сжатия определится из соотношения $T_2 / T_1 = (p_2 / p_1)^{\frac{n-1}{n}}$:

$$T_2 = 300 \cdot (12,5 / 0,1)^{\frac{1,2-1}{1,2}} = 672 \text{ К.}$$

Трехступенчатый компрессор

Степень увеличения давления воздуха в каждой ступени определяется из уравнения $x = \sqrt[n]{p_z / p_1}$:

$$x = \sqrt[3]{12,5 / 0,1} = 5.$$

Работа, затраченная на получение сжатого воздуха в первой ступени равна, [кДж/м³]:

$$l_1 = -\frac{n}{n-1} p_1 V_1 \left[\left(p_2 / p_1 \right)^{\frac{n-1}{n}} - 1 \right] = -\frac{1,2}{1,2-1} 0,1 \cdot 10^6 \cdot 1 \cdot \left[\left(5 \right)^{\frac{1,2-1}{1,2}} - 1 \right] = -186.$$

Затраченная работа всех ступеней одинакова, поэтому общая работа на привод компрессора определится:

$$l_{k3} = 3l_1 = 3 \cdot (-186) = -558 \text{ кДж/м}^3.$$

Температура в конце сжатия в каждой ступени:

$$T_2 / T_1 = (p_2 / p_1)^{\frac{n-1}{n}} = 5^{\frac{1,2-1}{1,2}} = 1,31; \quad T_2 = T_1 \cdot 1,31 = 300 \cdot 1,31 = 393 \text{ К.}$$

Четырехступенчатый компрессор

Степень увеличения давления воздуха в каждой ступени:

$$x = \sqrt[4]{12,5/0,1} = 3,34 .$$

Работа, затраченная на получение сжатого воздуха в первой ступени равна, [кДж/м³]:

$$l_1 = -\frac{n}{n-1} p_1 V_1 \left[\left(p_2/p_1 \right)^{\frac{n-1}{n}} - 1 \right] = -\frac{1,2}{1,2-1} 0,1 \cdot 10^6 \cdot 1 \cdot \left[(3,34)^{\frac{1,2-1}{1,2}} - 1 \right] = -122 .$$

Общая работа на привод компрессора определится:

$$l_{k4} = 4l_1 = 4 \cdot (-122) = -488 \text{ кДж/м}^3.$$

Температура в конце сжатия в каждой ступени:

$$T_2/T_1 = (p_2/p_1)^{\frac{n-1}{n}} = 3,34^{\frac{1,2-1}{1,2}} = 1,22 ; T_2 = T_1 \cdot 1,22 = 300 \cdot 1,22 = 366 \text{ К}.$$

Затрата работа при переходе от одноступенчатого к четырехступенчатому компрессору уменьшается на:

$$\frac{l_{k1} - l_{k4}}{l_{k4}} = \frac{-774 - (-488)}{-774} = 0,344 = 34,4 \% .$$

Приложение

Молекулярная масса веществ μ , [кг/кмоль] [4]

Таблица. 5

CO_2	H_2	CO	N_2	H_2O	Воздух	O_2
44	2	28	28	18	29	32

Средняя массовая теплоемкость c_p газов
при $p=const$, [кДж/(кг · К)] [1,4]

Таблица. 6

t , [°C]	CO_2	H_2	CO	N_2	H_2O	Воздух	O_2
0	0,8148	14,1949	1,0396	1,0392	1,8594	1,0036	0,9148
100	0,9136	14,4482	1,0446	1,0421	1,8903	1,0103	0,9232
200	0,9927	14,5043	1,0584	1,0517	1,9406	1,0245	0,9353
300	1,0567	14,5332	1,0802	1,0693	2,0005	1,0446	0,9500
400	1,1103	14,5809	1,1057	1,0915	2,0645	1,0685	0,9651
500	1,1542	14,662	1,1321	1,1154	2,1319	1,0923	0,9793
600	1,1920	14,7786	1,1568	1,1392	2,2014	1,1149	1,0689
700	1,2230	14,930	1,1790	1,1614	2,2730	1,1355	1,0856
800	1,2493	15,1148	1,1987	1,1815	2,3450	1,1539	1,0999
900	1,2715	15,3120	1,2158	1,1974	2,4154	1,1702	1,1120
1000	1,2900	15,5175	1,2305	1,2150	2,4824	1,1844	1,1229
1100	1,3059	15,7357	1,2435	1,2288	2,5456	1,1970	1,1317
1200	1,3197	15,9496	1,2544	1,2410	2,6042	1,2083	1,1401
1300	1,3314	16,1657	1,2644	1,2514	2,6586	1,2179	1,1484
1400	1,3415	16,3691	1,2728	1,2606	2,7089	1,2267	1,1564
1500	1,3498	16,5642	1,2799	1,2686	2,7553	1,2347	1,1639
1600	1,3574	16,7472	1,2866	1,2761	2,7980	1,2418	1,1710
1700	1,3636	16,9218	1,2926	1,2824	2,8382	1,2485	1,1786
1800	1,3695	17,0855	1,2979	1,2883	2,8742	1,2944	1,1757
1900	1,3741	17,2433	1,3025	1,2933	2,9073	1,2602	1,1928
2000	1,3783	17,3890	1,3067	1,2979	2,9366	1,2653	1,2004

**Средняя массовая теплоемкость c_p газов
при $v=const$, [$\text{кДж}/(\text{кг} \cdot \text{К})$] [1]**

Таблица. 7

$t, [^\circ\text{C}]$	CO_2	SO_2	CO	N_2	H_2O	Воздух	O_2
0	0,6259	0,477	0,7427	0,7352	1,3980	0,7164	0,6548
100	0,6770	0,507	0,7448	0,7365	1,4114	0,7193	0,6632
200	0,7214	0,532	0,7494	0,7394	1,4323	0,7243	0,6753
300	0,7599	0,557	0,7570	0,7448	1,4574	0,7319	0,6900
400	0,7938	0,578	0,7666	0,7524	1,4863	0,7415	0,7051
500	0,8240	0,595	0,7775	0,7616	1,5160	0,7519	0,7193
600	0,8508	0,607	0,7892	0,7716	1,5474	0,7624	0,7827
700	0,8746	0,624	0,8009	0,7821	1,5805	0,7733	0,7448
800	0,8964	0,632	0,8122	0,7926	1,6140	0,7842	0,7557
900	0,9157	0,645	0,8231	0,8030	1,6483	0,7942	0,7658
1000	0,9332	0,653	0,8336	0,8127	1,6823	0,8039	0,7750
1100	0,9496	0,662	0,8432	0,8219	1,7158	0,8127	0,7834
1200	0,9638	0,666	0,8566	0,8307	1,7488	0,8215	0,7913
1300	0,9772	-	0,8608	0,8390	1,7815	0,8294	0,7984
1400	0,9893	-	0,8688	0,8470	1,8129	0,8369	0,8051
1500	1,0006	-	0,8763	0,8541	1,8434	0,8441	0,8114
1600	1,0107	-	0,8830	0,8612	1,8728	0,8508	0,8173
1700	1,0203	-	0,8893	0,8675	1,9016	0,8570	0,8231
1800	1,0291	-	0,8956	0,8738	1,9293	0,8633	0,8286
1900	1,0371	-	0,9014	0,8792	1,9552	0,8688	0,8340
2000	1,0446	-	0,9064	0,8847	1,9804	0,8742	0,8390

Литература

1. Нащокин В. В. Техническая термодинамика и теплопередача. - М.: ВШ. - 1980. - 469 с.
2. Юдаев Б. Н. Техническая термодинамика. Теплопередача. - М.: ВШ. - 1988. - 479 с.
3. Андрианова Т. Н., Дзампов Б. В. и др. Сборник задач по технической термодинамике. -М.: Издательство МЭИ, 2000. - 356 с.
4. Теплотехнический справочник / Под ред. В.Н. Юренина и П.Б. Лебедева. - Т.1 - М.: Энергия, 1975. - 744 с.