

МИНОБРНАУКИ РОССИИ
ФЕДЕРАЛЬНОЕ ГОСУДАРСТВЕННОЕ БЮДЖЕТНОЕ ОБРАЗОВАТЕЛЬНОЕ УЧРЕЖДЕНИЕ
ВЫСШЕГО ОБРАЗОВАНИЯ
«ВОРОНЕЖСКИЙ ГОСУДАРСТВЕННЫЙ УНИВЕРСИТЕТ»
БОРИСОГЛЕБСКИЙ ФИЛИАЛ
(БФ ФГБОУ ВО «ВГУ»)

**МЕТОДИЧЕСКИЕ МАТЕРИАЛЫ ПО УЧЕБНОЙ ДИСЦИПЛИНЕ
ТЕПЛОФИЗИКА**

1. Код и наименование направления подготовки:

15.03.01 Машиностроение

2. Профиль подготовки:

Технологии, оборудование и автоматизация машиностроительных производств

3. Квалификация (степень) выпускника:

Бакалавр

4. Форма обучения:

Очная, заочная

5. Кафедра, отвечающая за реализацию дисциплины:

кафедра прикладной математики, информатики, физики и методики их преподавания

6. Составитель(и):

Зульф리카рова Т.В., кандидат технических наук, доцент, кафедры прикладной математики, информатики, физики и методики их преподавания

7. Методические указания для обучающихся по освоению дисциплины

Вид учебных занятий	Деятельность студента
Лекция	<p>При написании лекций студент должен кратко, схематично, последовательно фиксировать основные положения, выводы, формулировки, обобщения, пометить важные мысли, выделять ключевые слова, термины. В некоторых случаях требуется проверка терминов, понятий с помощью энциклопедий, словарей, справочников с выписыванием толкований в тетрадь.</p> <p>При изучении теоретического материала необходимо написание опорных конспектов по вопросам, выделенным для самостоятельного изучения. Если самостоятельно не удастся разобраться в материале, необходимо сформулировать вопрос и задать преподавателю на консультации, на практическом занятии.</p>
Практические занятия	<p>В процессе освоения дисциплины на практических занятиях студенты решают типовые задачи по основным разделам, выполняют самостоятельные работы. Решение каждой задачи необходимо сопровождать краткими пояснениями (какие законы используются для решения, какие математические преобразования приводят к результату и т.п.)</p>
Подготовка к зачету	<p>При подготовке к зачету необходимо ориентироваться на конспекты лекций, рекомендуемую литературу, отработанные методы решения задач и приобретенные навыки анализа и проверки выполненных решений.</p>

8. Методические материалы для обучающихся по освоению теоретических вопросов дисциплины

№	Тема лекции	Рассматриваемые вопросы
1	Термодинамическая система. Уравнение состояния. Первый закон термодинамики.	<p>Термодинамическая система. Основные термодинамические параметры. Уравнение состояния идеального газа. Теплофизические свойства газовой смеси.</p> <p>Внутренняя энергия. Работа и теплота. Теплоемкость, ее зависимость от температуры и вида процесса. Первый закон термодинамики. Уравнения первого закона термодинамики. Энтальпия. Анализ термодинамических процессов с помощью первого начала термодинамики. Изопараметрические процессы. Адиабатный процесс. Политропные процессы.</p>
2	Второй закон термодинамики. Энтропия.	<p>Исторические формулировки второго начала термодинамики. Энтропия. Аналитическое выражение второго закона термодинамики для обратимых и необратимых процессов. Необратимый адиабатный процесс. Эксергия как мера работоспособности. Статистическое истолкование второго закона термодинамики. Энтропия и вероятность. Пределы применимости второго закона термодинамики.</p>

		мики. Изменение энтропии идеального газа. Энтропийные диаграммы идеального газа.
3	Термодинамические свойства реальных веществ. Термодинамика пара и влажного воздуха.	Фазовая диаграмма. Правило фаз Гиббса. Теплота фазового перехода. Уравнение Клапейрона - Клаузиуса. Реальный газ. Уравнение Ван - дер - Ваальса. Критические параметры веществ. Принцип соответственных состояний. Термодинамическое подобие. Уравнение Вукаловича-Новикова. Водяной пар. Таблицы термодинамических свойств воды и водяного пара. Энтропийные диаграммы состояний водяного пара. Графическое изображение основных термодинамических процессов с водяным паром. Абсолютная и относительная влажность воздуха. Термодинамические параметры влажного воздуха. <i>id</i> - диаграмма влажного воздуха. Графическое изображение термодинамических процессов во влажном воздухе. Измерение относительной влажности и точки росы с помощью психрометра и гигрометра.
4	Термодинамика газового потока	Уравнение первого закона термодинамики для потока. Располагаемая работа. Адиабатные течения. Параметры полного адиабатного торможения потока. Скорость и расход газа (пара) при истечения из сужающегося сопла. Критический режим истечения. Сопло Лавалья. Течение с трением. Течение по длинным трубам. Дросселирование газов и паров. Эффект Джоуля-Томсона. Температура инверсии. Кривая инверсии. Использование процесса дросселирования в технике.
5	Термодинамические циклы.	Цикл Карно, его термический КПД. Теоремы Карно. Обратный цикл Карно. Холодильный коэффициент. Циклы двигателей внутреннего сгорания (ДВС). Циклы с изохорным и изобарным подводом теплоты. Цикл со смешанным подводом теплоты. Принципиальная схема паротурбинной установки (ПТУ). Идеальный цикл ПТУ (цикл Ренкина) и его термический КПД. Влияние начальных и конечных параметров пара на термический КПД цикла, методы повышения КПД. Применение пара высоких параметров. Действительный цикл с необратимым адиабатным расширением пара в турбине. Цикл ПТУ с промежуточным перегревом пара. Регенеративные циклы. Компрессоры. Виды и назначение компрессоров. Одноступенчатый поршневой компрессор, его индикаторная диаграмма. Преимущества многоступенчатого сжатия. Центробежные компрессоры.

9. Методические материалы для обучающихся по подготовке к практическим/лабораторным занятиям

№	Тема практического занятия	Содержание практического занятия
1	Основные термодинамические параметры. Уравнение состояния термодинамической системы.	<p>Решение задач на уравнение состояния идеального газа. Определение параметров газовой смеси.</p> <p><i>Вопросы для подготовки к занятию</i></p> <p>Какой газ называется идеальным? Что такое нормальные физические условия? Какой объем занимает киломоль любого газа при нормальных физических условиях? Какими способами может быть задана смесь идеальных газов? Что такое кажущаяся мольная масса смеси идеальных газов? Сформулируйте закон Дальтона. В каком случае справедлив этот закон? Что такое парциальное давление и парциальный (приведенный) объем? Получите выражение для определения удельной газовой постоянной смеси идеальных газов.</p>
2	Первый закон термодинамики	<p>Анализ термодинамических процессов с точки зрения первого закона термодинамики. Решение задач.</p> <p><i>Вопросы для подготовки к занятию</i></p> <p>Что такое рабочее тело? Почему в качестве рабочего тела используются вещества в газообразном (парообразном) состоянии? В чем состоит взаимодействие между системой и окружающей средой? Какие процессы называются равновесными и какие неравновесными? Что такое термодинамическая поверхность? Как вычисляется теплота и работа? Функциями чего являются эти величины? Дайте определение внутренней энергии энтальпии и энтропии. Функцией чего являются эти величины? Какие термодинамические диаграммы чаще всего применяют на практике и почему? Чему равна площадь под кривой процесса на pV – диаграмме? Сформулируйте первый закон термодинамики. Запишите различные аналитические выражения первого закона термодинамики. Какова история открытия первого закона термодинамики?</p>
3	Теплоемкость	Вычисление значений теплоемкостей газов и их смесей.

		<p style="text-align: center;"><i>Вопросы для подготовки к занятию</i></p> <p>В чем сущность молекулярно-кинетической теории теплоемкости? Каковы основные недостатки этой теории?</p> <p>В чем сущность квантовой теории теплоемкости? Какие преимущества имеет эта теория перед молекулярно-кинетической теорией теплоемкости?</p> <p>Какова связь между истинной и средней теплоемкостями? Как вычислить теплоту процесса с помощью каждой из этих теплоемкостей?</p> <p>Какими свойствами обладают теплоемкости идеального газа?</p> <p>Как связаны изобарная и изохорная теплоемкости идеального газа?</p> <p>В какой форме может быть задана зависимость теплоемкости идеального газа от температуры?</p> <p>Как рассчитывается теплоемкость смеси идеальных газов при различных способах задания этой смеси?</p>
4	Второй закон термодинамики	<p>Расчет изменения энтропии в различных термодинамических процессах.</p> <p style="text-align: center;"><i>Вопросы для подготовки к занятию</i></p> <p>Какой цикл называется прямым и какой обратным?</p> <p>Из каких процессов состоит цикл Карно?</p> <p>Сформулируйте теоремы Карно</p> <p>Как влияет необратимость на процесс преобразования теплоты в работу?</p> <p>В чем сущность второго закона термодинамики?</p> <p>Приведите различные формулировки второго закона термодинамики.</p> <p>Приведите аналитическое выражение второго закона термодинамики.</p> <p>В чем статистический смысл второго закона термодинамики?</p> <p>Как связаны энтропия и термодинамическая вероятность состояния?</p> <p>В чем заключается различие между адиабатным и изоэнтропным процессами? В каких случаях адиабатный процесс является одновременно и изоэнтропным?</p> <p>Что такое эксергия теплоты?</p> <p>Приведите выражение для эксергетического КПД.</p> <p>Как идут линии основных процессов в Ts – диаграмме идеального газа?</p> <p>Приведите формулы для расчета изменения энтропии идеального газа в различных процессах.</p> <p>Как строится абсолютная термодинамическая шкала температур?</p>

5	Реальный газ	<p>Расчет постоянных Ван-дер-Ваальса на основе критических параметров газа. Вычисление параметров реального газа.</p> <p><i>Вопросы для подготовки к занятию</i></p> <p>Какие свойства реальных веществ учитываются при выводе уравнения состояния Ван – дер – Ваальса?</p> <p>Изобразите изотермы реального газа в фазовой pV – диаграмме.</p> <p>В чем заключается принцип соответственных состояний?</p> <p>Что такое критические соотношения вещества?</p> <p>Сформулируйте условия равновесия при фазовых переходах.</p>
6	Термодинамика пара и влажного воздуха.	<p>Определение параметров пара и влажного воздуха 1) аналитическим методом 2) по таблицам и диаграммам.</p> <p><i>Вопросы для подготовки к занятию</i></p> <p>Существует ли принципиальное различие между парами и газами?</p> <p>Чем отличаются фазовые pT – диаграммы для нормальных и аномальных веществ?</p> <p>Что такое фундаментальная (главная) тройная точка вещества?</p> <p>Чем отличаются процессы испарения и кипения?</p> <p>Какой пар называется влажным и сухим насыщенным, какой – перегретым?</p> <p>Что такое степень сухости?</p> <p>Как рассчитываются удельный объем, энтропия и энтальпия влажного насыщенного пара?</p> <p>Изобразите пограничные линии в фазовой Ts – диаграмме.</p> <p>Покажите, что в области перегретого пара изобара на Ts – диаграмме идет круче изохоры</p> <p>Назовите величину критического давления и критической температуры для воды.</p> <p>Изобразите линии основных процессов в фазовых pV -, Ts – и hs – диаграммах.</p> <p>Как строятся линии постоянной степени сухости в фазовых pV -, Ts – и hs – диаграммах?</p> <p>При каких условиях влажный воздух можно считать с достаточной степенью точности идеальным газом?</p> <p>Как определяется массовое и мольное влагосодержание влажного воздуха?</p> <p>Как определяется энтальпия влажного воздуха?</p> <p>Что такое абсолютная и относительная влажность?</p> <p>Почему в процессе испарения в идеальной сушилке энтальпию влажного воздуха можно считать постоянной?</p> <p>Как определить состояние влажного воздуха с помо-</p>

		<p>щью психрометра? Что такое точка росы?</p>
7	Термодинамические циклы.	<p>Определение термических КПД циклов Дизеля и Отто. <i>Вопросы для подготовки к занятию</i> Какова термодинамическая классификация двигателей внутреннего сгорания? Как осуществляется и выглядит в p-v-диаграмме действительный цикл ДВС с подводом тепла при постоянном объеме? Как выглядит идеализированный цикл ДВС при постоянном объеме в p-v- и T-s-диаграммах? Как выглядит формула для термического КПД этого цикла? Как осуществляется и выглядит в p-v-диаграмме действительный цикл ДВС с подводом тепла при постоянном давлении? Как изображается цикл со смешанным подводом тепла в p-v- и T-s-диаграммах?</p>
8	Термодинамические циклы.	<p>Определение термического КПД цикла ПСУ <i>Вопросы для подготовки к занятию</i> Почему в паротурбинных установках не используется цикл Карно? Почему основным рабочим телом паротурбинных установок служит водяной пар? Изобразите цикл Ренкина в координатах p, v; T, s и h, s. Изобразите принципиальную схему паротурбинной установки. При каких условиях можно пренебречь работой, затрачиваемой на привод питательного насоса паротурбинной установки? Как влияют начальные параметры пара на термический КПД цикла Ренкина? Изобразите в координатах h, s условный процесс расширения пара в турбине с учетом потерь на трение. Что такое внутренний относительный КПД турбины?</p>
9	Теплопроводность	<p>Расчет теплового сопротивления, коэффициента теплопроводности и распределения температуры для многослойной плоской стенки. <i>Вопросы для подготовки к занятию</i> Как выглядит уравнение стационарной теплопроводности? Что такое нестационарная теплопроводность? Что называется градиентом температуры? Физический смысл коэффициента теплопроводности? Какую величину называют тепловым сопротивлением?</p>

		Тепловое сопротивление многослойной стенки.
10	Конвективный теплообмен и теплообмен излучением	<p>Расчет коэффициентов теплоотдачи плоской стенки и трубы</p> <p><i>Вопросы для подготовки к занятию</i></p> <p>Какое явление называется конвекцией?</p> <p>Как выглядит уравнение конвективного теплообмена?</p> <p>Физический смысл коэффициента теплоотдачи? Единицы измерения коэффициента теплоотдачи.</p> <p>Сформулируйте основные законы теплового излучения.</p>

10. Тематика рефератов/докладов/эссе, методические рекомендации по выполнению контрольных и курсовых работ, иные материалы

Методические рекомендации по самостоятельной работе

Курс теплофизики изучается студентами – заочниками в основном самостоятельно по учебникам и учебным пособиям. В период экзаменационных сессий студенты слушают лекции по основным разделам программы, отрабатывают навыки применения теории при решении инженерных задач, сдают зачеты и экзамены.

Самостоятельная работа в межсессионный период включает определенное количество задач по изучаемым разделам. Решение задач позволяет лучше понять и запомнить основные физические закономерности, осознать необходимость изучения законов теплофизики для профессиональной деятельности. Примеры оформления и пояснительного сопровождения решений приведены ниже.

Перед зачетом проводится собеседование по самостоятельной работе. Студент должен ответить на вопросы преподавателя и дать все необходимые пояснения на основе изученного теоретического материала.

Примеры решения задач

Пример 1

Определить массу воздуха, заключенного в пространстве между оконными рамами при нормальном атмосферном давлении, если температура линейно меняется от $t = -10^\circ\text{C}$ у наружного стекла до $t_2 = +20^\circ\text{C}$ у внутреннего. Считать, что конвекционных токов в пространстве нет. Расстояние между рамами $\ell = 0,25$ м и площадь рамы $S = 2$ м².

Решение

Мысленно разделим объем воздуха на бесконечно тонкие слои, параллельные стеклам (рис. 1,а). Температуру в любом из слоев можно выразить формулой (рис. 1,б).

$$t = t_1 + ax$$

или (по абсолютной шкале температур)

$$T = T_1 + ax \quad (1)$$

где x — расстояние данного слоя от наружного стекла, a - коэффициент пропорциональности. Из краевого условия ($T = T_2$ при $x = \ell$) находим:

$$a = \frac{T_2 - T_1}{\ell}.$$

Так как давление p во всех слоях одинаково, то изменение плотности ρ от слоя к слою происходит из-за изменения температуры. Согласно уравнению Клапейрона—Менделеева имеем:

$$p = \rho \frac{RT}{M}, \quad (2)$$

где R — универсальная газовая постоянная, T и ρ — абсолютная температура и плотность газа в данном слое, M — молярная масса данного газа.

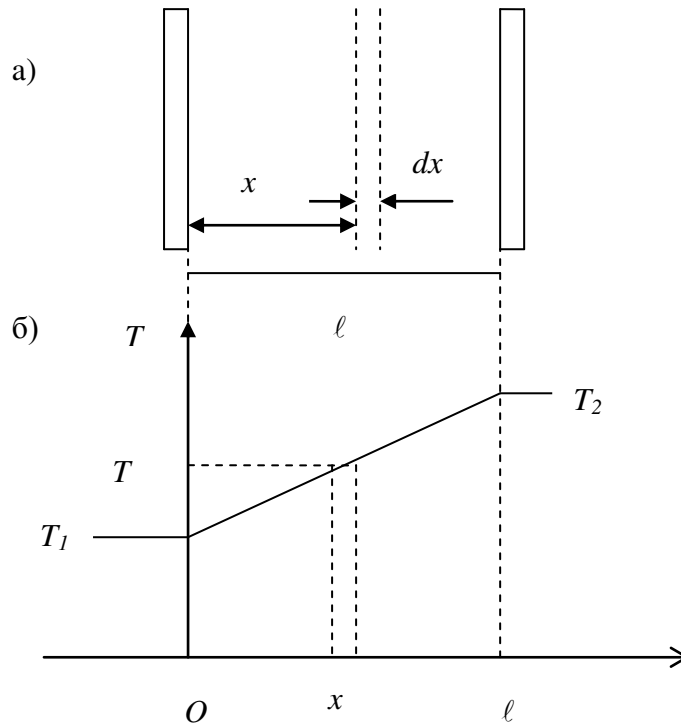


Рис 1.

Так как в (2) p , M и R — величины постоянные, то

$$\rho_1 T_1 = \rho_2 T_2$$

где ρ и T — параметры для произвольного слоя. Используя соотношение (1), получим:

$$\rho = \frac{\rho_1 T_1}{T_1 + \alpha x} \quad (3)$$

Уравнение Менделеева – Клапейрона для элементарного слоя записывается так

$$p dV = \frac{dm}{M} RT, \quad (4)$$

Где $dV = S dx$. Из (1) и (4) получим:

$$dm = \frac{MpS}{R} \frac{dx}{T_1 + \alpha x}.$$

Производя интегрирование и учитывая, что

$$\alpha = \frac{T_2 - T_1}{l},$$

Получаем для полной массы воздуха M' :

$$M' = \int_0^{M'} dm = \frac{MpS}{R} \int_0^l \frac{dx}{T_1 + \alpha x} = \frac{MpSl}{R(T_2 - T_1)} \ln \frac{T_2}{T_1}.$$

Подставляя значения величин $M = 29 \cdot 10^{-3}$ кг/моль, $p = 1,013 \cdot 10^5$ Па, $S = 2$ м², $l = 0,25$ м, $R = 8,314$ Дж/(моль·К), $T_2 = 293$ К, $T_1 = 263$ К, получаем:

$$M' = \frac{29 \cdot 10^{-3} \text{ кг / моль} \cdot 1,013 \cdot 10^5 \text{ Па} \cdot 2 \text{ м}^2 \cdot 0,25 \text{ м}}{8,314 \text{ Дж / (моль} \cdot \text{К)} \cdot 30 \text{ К}} \ln \frac{296 \text{ К}}{263 \text{ К}} = 0,636 \text{ кг}.$$

Пример 2

Один моль кислорода совершает цикл Карно в интервале температур от 27 до 327°С. Известно, что отношение максимального давления к минимальному за цикл равно 20. Определить КПД цикла, количество теплоты Q_1 , полученное от нагревателя за цикл, количество теплоты Q_2 , отданное холодильнику за цикл, работу A , совершаемую газом за цикл.

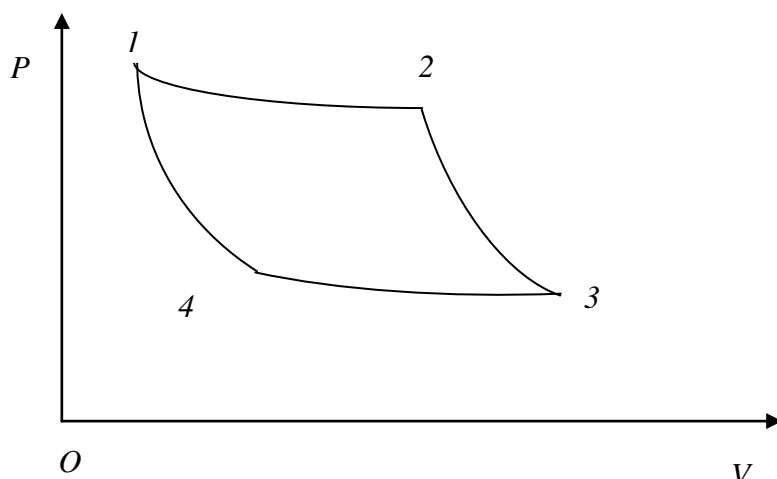


Рис. 2

Решение

Коэффициент полезного действия η тепловой машины определяется формулой

$$\eta = \frac{Q_1 - Q_2}{Q_1}, \quad (1)$$

Если рабочим телом служит идеальный газ, то КПД цикла Карно зависит только от температуры нагревателя T_1 и холодильника T_2 :

$$\eta = \frac{T_1 - T_2}{T_1}, \quad (2)$$

Следовательно, для всех обратимых циклов

$$\frac{Q_1 - Q_2}{Q_1} = \frac{T_1 - T_2}{T_1}. \quad (3)$$

В ходе изотермического процесса внутренняя энергия идеального газа остается постоянной. Поэтому количество получаемой газом теплоты равно работе $A_{1,2}$ газа совершаемой газом при переходе из состояния 1 в состояние 2. Работа $A_{1,2}$ газа при изотермическом процессе может быть выражена так:

$$Q_1 = A_{1,2} = \frac{m}{M} RT \ln \frac{p_1}{p_2} = \nu RT \ln \frac{p_1}{p_2}, \quad (4)$$

где ν -число молей газа, R - универсальная газовая постоянная, T_1 -температура нагревателя, p_1 -давление газа в состоянии 1, p_2 -давление газа в состоянии 2.

Из состояния 2 в состояние 3 газ переходит, расширяясь адиабатически. Параметры газа, совершающего адиабатический процесс, согласно уравнению Пуассона связаны между собой соотношением:

$$\left(\frac{T_2}{T_1}\right)^{\frac{\gamma}{1-\gamma}} = \left(\frac{p_2}{p_1}\right),$$

где γ - отношение теплоемкостей газа при постоянном давлении и постоянном объеме (для кислорода как двухатомного газа $\gamma=1,4$), p_3 - давление газа в состоянии 3. Отсюда получаем следующее выражение для конечного давления

$$p_3 = p_2 \left(\frac{T_2}{T_1}\right)^{\frac{\gamma}{1-\gamma}}, \quad (5)$$

Согласно условию, отношение максимального давления p_1 к минимальному давлению p_3 за цикл равно n , с учетом (5) имеем:

$$n = \frac{p_1}{p_2} = \frac{p_1}{p_2} \left(\frac{T_2}{T_1}\right)^{\frac{\gamma}{1-\gamma}},$$

откуда

$$\frac{p_1}{p_2} = n \left(\frac{T_2}{T_1}\right)^{\frac{\gamma}{1-\gamma}}, \quad (6)$$

Подставив это выражение в равенство (4), получим:

$$Q_1 = \nu RT_1 \ln \left[\left(\frac{T_1}{T_2} \right)^{\frac{\gamma}{1-\gamma}} \right], \quad (7)$$

Из равенства (3) получим

$$Q_2 = Q_1 \frac{T_2}{T_1}, \quad (8)$$

Работа A , совершаемая рабочим телом тепловой машины за цикл, равна:

$$A = Q_1 - Q_2, \quad (9)$$

Подставляя значения величин $\nu=1$ моль, $K=8,314$ Дж/(моль К), $T_1=600$ К, $T_2=300$ К, $n=20$, $\gamma=7/5$, $\frac{\gamma}{1-\gamma} = -\frac{7}{2}$, получаем:

$$\eta = \frac{600\text{К} - 300\text{К}}{600\text{К}} = 0,5$$

$$Q_1 = 1 \text{ моль } 8,314 \text{ Дж}/(\text{моль} \cdot \text{К}) \cdot 600\text{К} \cdot \ln \left[20 \frac{600\text{К}^{-7/2}}{300\text{К}} \right] \approx 2,9 \cdot 10^3 \text{ Дж}$$

$$Q_2 = 2,9 \cdot 10^3 \text{ Дж} \frac{300\text{К}}{600\text{К}} = 1,45 \cdot 10^3 \text{ Дж}$$

$$A = 2,9 \cdot 10^3 \text{ Дж} - 1,45 \cdot 10^3 \text{ Дж} = 1,45 \text{ кДж.}$$

Пример 3

Воздух массой 1 кг сначала сжимают адиабатически так, что объем уменьшается в 6 раз, а затем его изохорически нагревают, пока давление не увеличится в 1,5 раза. Определить общее изменение энтропии воздуха.

Решение

Разность значений энтропии системы в двух равновесных состояниях 1 и 2 определяется формулой:

$$S_1 - S_2 = \int \frac{dQ}{T}, \quad (1)$$

где S_1 и S_2 - значения энтропии системы соответственно в состояниях 1 и 2, Q - количество теплоты, полученное системой при элементарном квазистатическом переходе, T - температура системы, при которой было получено элементарное количество теплоты dQ .

При адиабатическом процессе $dQ = 0$ и, следовательно, $\Delta S_{ад} = 0$. Найдем изменение энтропии при изохорном изменении давления системы.

Согласно первому началу термодинамики

$$\delta Q = dU + \delta A. \quad (2)$$

Уравнение (2) дает математическую формулировку первого начала термодинамики. Оно утверждает, что тепло δQ , полученное системой, идет на приращение внутренней энергии dU и на производство внешней работы δA .

Для произвольной массы газа элементарное изменение внутренней энергии определяется формулой

$$dU = \frac{m}{M} c_v dT,$$

где M - масса 1 моль газа, c_v - молярная теплоемкость газа при постоянном объеме, dT - изменение температуры газа. Элементарная работа равна:

$$\delta A = p dV,$$

где p - давление газа, dV - элементарное изменение объема, поэтому:

$$\delta Q = \frac{m}{M} c_v dT + p dV. \quad (2, a)$$

Так как при изохорическом процессе $dV = 0$, то

$$\delta Q = \frac{m}{M} c_v dT.$$

Следовательно,

$$S_2 - S_1 = \frac{m}{M} c_v \int_{T_1}^{T_2} \frac{dT}{T};$$

$$S_2 - S_1 = \frac{m}{M} c_v \ln \frac{T_2}{T_1}. \quad (3)$$

Считая воздух идеальным газом, можно для изохорического процесса применить закон Шарля:

$$\frac{p_1}{p_2} = \frac{T_2}{T_1}, \quad (4)$$

тогда

$$S_2 - S_1 = \frac{m}{M} c_v \ln \frac{p_1}{p_2}, \quad (5)$$

где p_1 и p_2 - давление воздуха соответственно в начале и конце изохорического процесса.

Подставляя значения величин ($m = 1 \text{ кг}$, $M = 29 \cdot 10^{-3} \text{ кг/моль}$, $c_v = 20,785 \text{ Дж/моль К}$,

$\frac{p_1}{p_2} = 1.5$), получаем:

$$S_2 - S_1 = \frac{1 \text{ кг} \cdot 10^3}{29 \text{ кг / моль}} \cdot 20,785 \frac{\text{Дж}}{\text{моль К}} \ln 1.5 \approx 290 \text{ Дж / К}.$$

Пример 4

1 моль газа расширяется так, что зависимость между P и V линейная, т.е. $P = \alpha \cdot V$. Молярная теплоемкость газа при $P = \text{const}$ равна C_p . Определить теплоемкость газа в данном процессе.

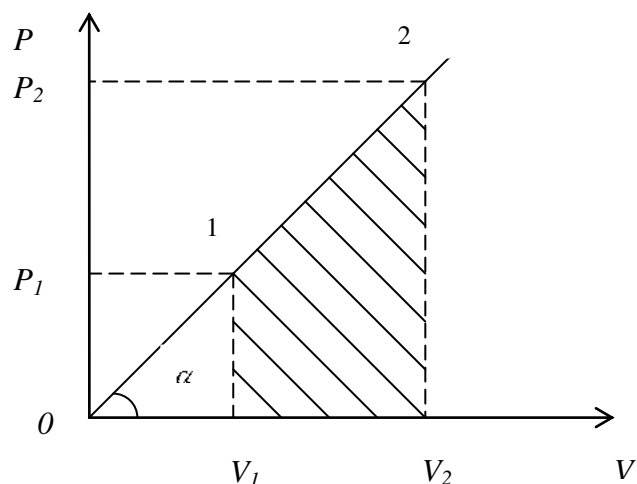


Рис. 3

Решение

Выделим на участке прямой две точки 1 и 2, тогда

$$\operatorname{tg} \alpha = \frac{P_1}{V_1} = \frac{P_2}{V_2}$$

Уравнение процесса

$$p = \operatorname{tg} \alpha \cdot V.$$

Используем первый закон термодинамики.

$$Q = \Delta U + A, \quad (1)$$

где $Q = cm \Delta T = C_v \nu \Delta T$ – количество теплоты, полученное газом; $\Delta U = \frac{i}{2} \nu RT$ – изменение внутренней энергии газа (i – число степеней свободы молекулы), A – работа газа
Теплоемкость одного моля газа при изохорном процессе

$$C_v = \frac{i}{2} R,$$

тогда

$$\Delta U = C_v \nu \Delta T \quad (2)$$

Вычислим работу газа графически

$$A = \frac{1}{2} p_2 V_2 - \frac{1}{2} p_1 V_1 = \frac{1}{2} (p_2 V_2 - p_1 V_1).$$

Выполняем замены, используя уравнение Менделеева – Клапейрона $pV = \nu RT$:

$$A = \frac{1}{2} \nu R (T_2 - T_1) = \frac{1}{2} \nu R \Delta T \quad (3)$$

Подставляем (2) и (3) в (1):

$$C_v \nu \Delta T = C_v \nu \Delta T + \frac{1}{2} \nu \Delta T$$

$$C = C_v + \frac{1}{2} R$$

Пример 5

Тепловая машина совершает цикл, показанный на рисунке 6. (3 – 1 – адиабатное сжатие). Показатель адиабаты - γ , а $\frac{V_2}{V_1} = K$. Определит КПД цикла?

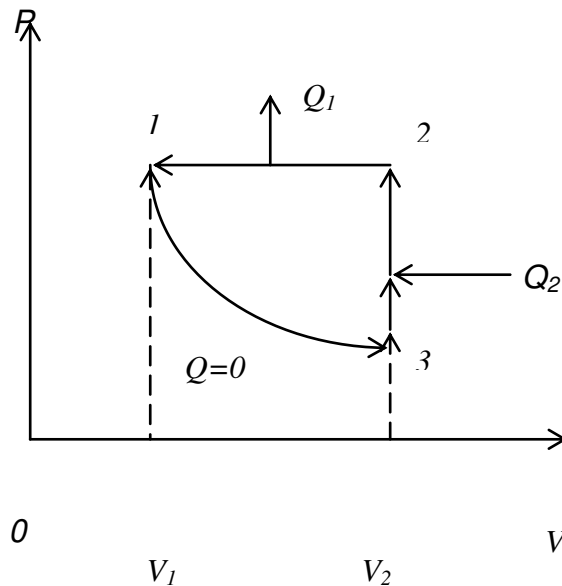


Рис. 4

Решение

Коэффициент полезного действия цикла

$$\eta = \frac{Q_1 + Q_2}{Q_1},$$

где Q_1 - полученное количество тепла, Q_2 – отданное количество тепла.

1) Рассмотрим изобарный процесс 1 – 2:

при $p = \text{const}$ объем газа увеличивается, значит, увеличивается T - система получает тепло. Вычислим $Q_{1-2} = Q_1$ по I закону термодинамики:

$$Q_1 = Q_{1-2} = \Delta U_{1-2} + A_{12}$$

$\Delta U_{1-2} = \frac{3}{2} \nu R (T_2 - T_1)$ – изменение внутренней энергии;

$A_{12} = p \Delta V$ – работа газа в изобарном процессе, которую через уравнение Менделеева – Клапейрона запишем:

$$A_{12} = \nu R \Delta T = \nu R (T_2 - T_1),$$

тогда

$$Q_1 = 1,5 \nu R \Delta T + \nu R \Delta T = 2,5 \nu R \Delta T = 2,5 \nu R (T_2 - T_1).$$

2) Рассмотрим изохорный процесс 2 – 3:

при $V = \text{const}$ $A_{23} = 0$;

$$\Delta U_{23} = \frac{3}{2} \nu R (T_3 - T_2),$$

тогда

$$Q_{23} = \Delta U_{23} = \frac{3}{2} \nu R (T_3 - T_2).$$

Здесь $T_3 < T_2$ $Q_{23} < 0$ - система отдает тепло

$$Q_2 = |Q_{23}| = \frac{3}{2} \nu R (T_2 - T_3).$$

3) Вычислим температуру газа в состояниях 1,2 и 3.
Состояния 1 и 3 связаны адиабатическим процессом.

$$T_1 V_1^{\gamma-1} = T_3 V_2^{\gamma-1} \quad T_1 = T_3 \left(\frac{V_2}{V_1} \right)^{\gamma-1} = T_3 \cdot K^{\gamma-1}$$

Состояния 1 и 2 связывает закон Гей – Люссака:

$$\frac{V_2}{T_2} = \frac{V_1}{T_1} \quad T_2 = T_1 \cdot \frac{V_2}{V_1} = T_1 \cdot K$$

В этом случае

$$Q_1 = 2,5\nu RT_1(K-1) = 2,5\nu RT_3 K^{\gamma-1}(K-1)$$

$$Q_2 = 1,5\nu RT_3(K^\gamma - 1)$$

$$\eta = \frac{2,5\nu RT_3 K^{\gamma-1}(K-1) - 1,5\nu RT_3(K^\gamma - 1)}{2,5\nu RT_3 K^{\gamma-1}(K-1)}$$

$$\eta = 1 - \frac{3(K^\gamma - 1)}{5(K^\gamma - K^{\gamma-1})}$$

ЗАДАЧИ ДЛЯ САМОСТОЯТЕЛЬНОГО РЕШЕНИЯ

Смеси газов

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

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

3. Смесь идеальных газов состоит из 30 кг CO_2 , 24 кг N_2 и 6 кг O_2 . В начальном состоянии объем смеси $V_1 = 1,7 \text{ м}^3$, а температура $t_1 = 330 \text{ }^\circ\text{C}$. В результате адиабатного расширения температура газа уменьшается до $t_2 = 10 \text{ }^\circ\text{C}$. Определить давление смеси в начальном состоянии, объем и давление смеси в конечном состоянии, работу расширения и изменение внутренней энергии смеси. Считать, что теплоемкость газов не зависит от температуры. Определить парциальные давления газов, входящих в смесь, в конечном состоянии. Изобразить процесс в pV - и TS – диаграммах.

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

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

6. Смесь идеальных газов состоит из 3,2 кг CO_2 , 4,0 кг N_2 и 0,8 кг O_2 . В начальном состоянии параметры смеси $p_1 = 0,6 \text{ МПа}$ и $t_1 = 370 \text{ }^\circ\text{C}$. В результате адиабатного расширения давление смеси уменьшается до $p_2 = 0,1 \text{ МПа}$. Определить объем смеси в начальном и конечном состояниях, температуру и плотность смеси в конечном состоянии, работу расширения и изменение внутренней энергии смеси. Считать, что теплоемкость газов не зависит от температуры. Определить парциальные давления газов, входящих в смесь, в конечном состоянии. Изобразить процесс в pV - и TS – диаграммах.

7. Смесь идеальных газов задана объемными долями: $r_{CO_2} = 0,3$; $r_{N_2} = 0,25$; $r_{O_2} = 0,45$. Общая масса смеси $m = 10$ кг. В начальном состоянии объем смеси $V_1 = 3,5$ м³, а давление $p_1 = 0,3$ МПа. В результате адиабатного расширения объем смеси увеличился до значения $V_2 = 7$ м³. Определить температуру смеси в начальном состоянии, давление и температуру смеси в конечном состоянии, работу расширения и изменение внутренней энергии смеси. Принять, что теплоемкость газов не зависит от температуры. Определить парциальные давления газов, входящих в смесь, в конечном состоянии. Изобразить процесс в pV - и TS – диаграммах.

8. Смесь идеальных газов задана объемными долями: $r_{CO_2} = 0,2$; $r_{N_2} = 0,36$; $r_{O_2} = 0,2$. Общая масса смеси $m = 10$ кг. В начальном состоянии объем смеси $V_1 = 4$ м³, а температура $t_1 = 387$ °С. В результате адиабатного расширения давление смеси уменьшается до значения $p_2 = 0,1$ МПа. Определить давление смеси в начальном состоянии, объем и температуру смеси в конечном состоянии, работу расширения и изменение внутренней энергии смеси. Считать, что теплоемкость газов не зависит от температуры. Определить парциальные давления газов, входящих в смесь, в конечном состоянии. Изобразить процесс в pV - и TS – диаграммах.

9. Смесь идеальных газов состоит из 20 кг N_2 , 16 кг CO_2 и 4 кг O_2 . В начальном состоянии параметры смеси $p_1 = 0,1$ МПа, а температура $t_1 = 60$ °С. В результате адиабатного сжатия давление газа возрастает до $p_2 = 0,5$ МПа. Определить объем смеси в начальном и конечном состоянии, температуру и плотность смеси в конечном состоянии, работу сжатия и изменение внутренней энергии смеси. Считать, что теплоемкость газов не зависит от температуры. Определить парциальные давления газов, входящих в смесь, в конечном состоянии. Изобразить процесс в pV - и TS – диаграммах.

10. Смесь идеальных газов задана объемными долями: $r_{CO_2} = 0,4$; $r_{N_2} = 0,25$; $r_{O_2} = 0,35$. Общая масса смеси $m = 10$ кг. В начальном состоянии параметры смеси $p_1 = 0,9$ МПа и $t_1 = 330$ °С. В результате адиабатного расширения объем смеси увеличился до значения $V_2 = 7,5$ м³. Определить объем смеси в начальном состоянии, температуру и давление смеси в конечном состоянии, работу расширения и изменение внутренней энергии смеси. Считать, что теплоемкость смеси не зависит от температуры. Определить парциальные давления газов, входящих в смесь, в конечном состоянии. Изобразить процесс в pV - и TS – диа- граммах.

Циклические процессы

11. Воздух из начального состояния 1 ($t_1 = 1600$ °С и $p_1 = 4$ МПа) изохорно охлаждается до температуры $t_2 = 200$ °С, а затем изотермически сжимается до состояния 3, в котором $p_3 = p_1$. Показать процессы 1-2-3 в pV - и TS -диаграммах. Определить значения p , t , и v в точках 1, 2, 3. Вычислить удельные работу, теплоту, изменение внутренней энергии и энтропии в процессах 1-2, 2-3, 1-2-3 в целом. Изохорный процесс рассчитать с учетом зависимости теплоемкости воздуха от температуры.

12. Кислород из начального состояния 1 изотермически сжимается до состояния 2, а затем в изохорном процессе охлаждается до состояния 3, в котором $p_3 = p_1$. В точке 2 параметры кислорода $t_2 = 1200$ °С и $p_2 = 6$ МПа, в точке 3 температура $t_3 = 300$ °С. Показать процесс 1-2-3 в pV - и TS -диаграммах. Определить значения p , t , и v в точках 1, 2, 3. Вычислить удельные значение работы, теплоты, изменения внутренней энергии и энтропии кислорода в процессах 1-2, 2-3 и 1-2-3 в целом. Изохорный процесс рассчитать с учетом зависимости теплоемкости воздуха от температуры.

13. Воздух из начального состояния 1 изотермически сжимается до состояния 2, а затем в изобарном процессе расширяется до состояния 3, в котором $v_3 = v_1$. Параметры воздуха в точке 2 $p_2 = 0,5$ МПа и $t_2 = 200$ °С. Температура воздуха в состоянии 3 $t_3 = 1400$ °С. Показать процесс 1-2-3 в pV - и TS -диаграммах. Определить значения p , t , и v кислорода в точках 1, 2, 3. Вычислить удельные работу, теплоту, изменение внутренней энергии и энтропии в процессах 1-2, 2-3, 1-2-3 в целом. Изобарный процесс рассчитать с учетом зависимости теплоемкости воздуха от температуры.

14. Кислород из состояния 1 изотермически расширяется до состояния 2, в котором $p_2 = 0,1$ МПа и $t_2 = 1000$ °С, а затем сжимается в изобарном процессе до объема $v_3 = v_1$. Температура кислорода в состоянии 3 $t_3 = 300$ °С. Показать процесс 1-2-3 в pV - и TS - диаграммах. Определить значения p , t , и v кислорода в точках 1, 2, 3. Вычислить удельные работу, теплоту, изменение внутренней энергии и энтропии в процессах 1-2, 2-3, 1-2-3 в целом. Изобарный процесс рассчитать с учетом зависимости теплоемкости кислорода от температуры.

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

16. Воздух из начального состояния 1 ($t_1 = 100$ °С и $p_1 = 0,1$ МПа) в изохорном процессе нагревается до температуры $t_2 = 1400$ °С, а затем изотермически расширяется до состояния 3, в котором $p_3 = p_1$. Показать процессы 1-2-3 в pV - и TS -диаграммах. Определить значения p , t , и v в точках 1, 2, 3. Вычислить удельные работу, теплоту, изменение внутренней энергии и энтропии в процессах 1-2, 2-3, 1-2-3 в целом. Изохорный процесс рассчитать с учетом зависимости теплоемкости воздуха от температуры.

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

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

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

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

Свойства пара

21. Влажный пар аммиака из состояния 1 ($p_1 = 0,615\text{МПа}$, $x_1 = 0.2$) в изохорном процессе переходит в состояние 2, где его температура $t_2 = 40^\circ\text{C}$. Определить значения p , t , v , s , u , x в состояниях 1 и 2 и удельную теплоту q процесса. Процесс 1-2 показать в pV -, TS - и iS -диаграммах.

22. Влажный пар диоксида углерода из состояния 1 ($t_1 = -40^\circ\text{C}$, $x_1 = 0.1$) в изохорном процессе переходит в состояние 2, где его температура $t_2 = 15^\circ\text{C}$. Определить значения p , t , v , s , u , x в состояниях 1 и 2 и удельную теплоту q процесса. Процесс 1-2-3 показать в pV -, TS - и iS -диаграммах.

23. Влажный пар хладагента R12 из состояния 1 ($t_1 = 20^\circ\text{C}$, $x_1 = 0,91$) адиабатически расширяется до состояние 2, где его температура $t_2 = -15^\circ\text{C}$. Определить значения p , t , v , s , u , x в состояниях 1 и 2 и удельную теплоту q процесса. Процесс 1-2-3 показать в pV -, TS - и iS -диаграммах.

24. Сухой пар аммиака с начальной температурой $t_1 = 50^\circ\text{C}$ в результате охлаждения при постоянном объеме переходит в двухфазное состояние 2, в котором $t_2 = 10^\circ\text{C}$. Затем в изобарном процессе аммиак нагревается до состояния 3, в котором степень сухости аммиака $x_3 = 0.8$. Определить значения p , t , v , s , u , x в состояниях 1 и 2 и удельную теплоту q процесса. Процесс 1-2-3 показать в pV -, TS - и iS -диаграммах.

25. Влажный пар диоксида углерода из состояния 1 ($t_1 = 15^\circ\text{C}$, $x_1 = 0.67$) адиабатно расширяется до состояния 2, в котором $t_2 = -40^\circ\text{C}$. Определить значения p , t , v , s , u , x в состояниях 1 и 2. Процесс 1-2 показать в pV -, TS - и iS -диаграммах.

26. Влажный пар аммиака из состояния 1 ($t_1 = 40^\circ\text{C}$, $x_1 = 0.5$) адиабатно расширяется до состояние 2, в котором $t_2 = 10^\circ\text{C}$. Определить значения p , t , v , s , u , x в состояниях 1 и 2 и удельную теплоту q процесса. Процесс 1-2 показать в pV -, TS - и iS -диаграммах.

27. Влажный пар хладагента R12 из состояния 1 ($t_1 = -15^\circ\text{C}$, $x_1 = 0.3$) в изохорном процессе переходит в состояние 2, в котором $t_2 = 20^\circ\text{C}$. Определить значения p , t , v , s , u , x в состояниях 1 и 2 и удельную теплоту q процесса. Процесс 1-2 показать в pV -, TS - и iS -диаграммах.

28. Сухой пар диоксида углерода с начальной температурой $t_1 = 15^\circ\text{C}$ адиабатно расширяется до состояния 2, в котором $t_2 = -50^\circ\text{C}$. Затем в изобарном процессе отвода теплоты диоксид углерода переходит в состояние 3, в котором степень сухости $x_3 = 0.25$. Определить значения p , t , v , s , u , x в состояниях 1 и 2 и удельную теплоту q процесса. Процесс 1-2-3 показать в pV -, TS - и iS -диаграммах.

29. Сухой пар хладагента R12 с начальной температурой $t_1 = 30^\circ\text{C}$ адиабатно расширяется до состояние 2, в котором $t_2 = -20^\circ\text{C}$. Затем в изобарном процессе отвода теплоты хладагент переходит в состояние 3, в котором степень сухости $x_3 = 0.3$. Определить значения p , t , v , s , u , x в состояниях 1 и 2 и удельную теплоту q процесса. Процесс 1-2-3 показать в pV -, TS - и iS -диаграммах.

30. Влажный пар хладагента R12 из состояния 1 ($t_1 = 15 \text{ }^\circ\text{C}$, $x_1 = 0.1$) в изохорном процессе подвода теплоты нагревается до температуры $t_2 = 30 \text{ }^\circ\text{C}$, а затем в изобарном процессе переходит в состояние 3 со степенью сухости $x_3 = 0.6$. Определить значения p , t , v , s , u , x в состояниях 1 и 2, а также удельную теплоту q процесса. Процесс 1-2-3 показать в pV -, TS - и iS -диаграммах.

31. Начальное состояние водяного пара задано параметрами $p_1 = 0,3 \text{ МПа}$ и $t_1 = 250 \text{ }^\circ\text{C}$. Из этого состояния пар охлаждается при постоянном давлении до состояния сухого пара $x_2 = 1$, а затем адиабатно расширяется до удельного объема $v_3 = 5 \text{ м}^3/\text{кг}$. Определить параметры пара в состояниях 1, 2 и 3, удельные количества теплоты и работу расширения процесса 1-2-3. Процесс 1-2-3 показать в TS - и iS -диаграммах.

32. Начальное состояние водяного пара задано параметрами $p_1 = 0.1 \text{ МПа}$ и $x_1 = 0.9$. Из этого состояния пар адиабатно сжимается до состояния сухого пара $x_2 = 1$ и далее при постоянном давлении нагревается до температуры $t_3 = 350 \text{ }^\circ\text{C}$. Определить параметры пара в точках 1, 2, 3, удельные количества теплоты и работу расширения процесса 1-2-3. Показать процесс 1-2-3 в TS - и iS - диаграммах.

33. Водяной пар в начальном состоянии имеет параметры $p_1 = 1,5 \text{ МПа}$ и $x_1 = 0.76$. Из этого состояния при постоянном объеме пар нагревается до температуры $t_2 = 550 \text{ }^\circ\text{C}$ и далее при неизменной температуре расширяется до удельного $v_3 = 2,0 \text{ м}^3/\text{кг}$. Определить параметры пара в состояниях 1, 2 и 3, удельные количества теплоты и работу расширения пара в процессе 1-2-3. Процесс 1-2-3 показать в TS - и iS - диаграммах.

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

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

36. Водяной пар в начальном состоянии имеет параметры $p_1 = 0,01 \text{ МПа}$ и $x_1 = 0,9$. Из этого состояния пар адиабатно сжимается до давления $p_2 = 2,0 \text{ МПа}$ и затем при постоянном давлении охлаждается до температуры $t_2 = 250 \text{ }^\circ\text{C}$. Определить параметры пара в состояниях 1, 2 и 3 удельные количества теплоты и работу расширения процесса 1-2-3. Процесс 1-2-3 показать в TS - и iS - диаграммах.

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

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

39. Водяной пар с начальными параметрами $p_1 = 0,005 \text{ МПа}$ и $t_1 = 150 \text{ }^\circ\text{C}$ сжимается при постоянной температуре и переходит в двухфазное состояние со степенью

сухости $x_2 = 0,9$. Определить начальные и конечные параметры пара, удельные количество теплоты и работу сжатия процесса. Показать процессы в TS- и iS- диаграммах.

40. Начальное состояние водяного пара задано параметрами $p_1 = 0,26$ МПа и $t_1 = 250$ °С. Из этого состояния пар охлаждается при постоянном давлении до состояния сухого пара $x_2 = 1$, а затем адиабатно расширяется до удельного объема $v_3 = 10$ м³/кг. Определить параметры пара в состоянии 1, 2, 3, удельные количество теплоты и работу расширения процесса. 1-2-3. Показать процессы в TS- и iS- диаграммах.

Влажный воздух

41. В идеальную сушильную камеру подается 50 кг/с влажного воздуха при параметрах $W_1 = 5\%$ и $t_1 = 90$ °С. Относительная влажность воздуха на выходе из камеры $W_2 = 60\%$. Определить массовый и объемный расход влажного воздуха на выходе из камеры. Принять давление в камере $B = 0,1$ МПа. Задачу решить с использованием hd- диаграммы и привести схему решения.

42. Определить массовый и объемный расход влажного воздуха на входе в идеальную сушильную камеру, если известно, что в камере испаряется 10 кг воды в секунду, параметры влажного воздуха на выходе из камеры $W_2 = 60\%$ и $t_2 = 45$ °С, а изменение влагосодержания воздуха в камере $\Delta d = 20$ г/(кг сух. возд.). Принять давление в камере $B = 0,1$ МПа. Задачу решить с использованием hd- диаграммы и привести схему решения.

43. В сушильную установку подается 50 кг/с влажного воздуха с параметрами $B_1 = 0,1$ МПа, $W_1 = 40\%$ и $t_1 = 25$ °С. Определить объемный расход влажного воздуха на входе в установку и количество воды, испаряющейся из высушиваемого материала в секунду, если изменение влагосодержания воздуха в установке $\Delta d = 19$ г на 1 кг сухого воздуха.

44. Влажный воздух поступает в идеальную сушильную камеру при $W_1 = 10\%$ и $t_1 = 70$ °С и выходит из камеры при относительной влажности $W_2 = 90\%$. Приняв давление в камере $B = 0,1$ МПа, определить плотность влажного воздуха на выходе из камеры и количество сухого воздуха, необходимого для испарения 1000 кг воды из высушиваемого материала. При расчете использовать hd- диаграмму и привести схему решения.

45. Влажный воздух на входе в идеальную сушильную установку имеет относительную влажность $W_1 = 50\%$ и температуру и $t_1 = 15$ °С. В калорифере он подогревается до $t_2 = 90$ °С. Затем в сушильной камере во влажный воздух испаряется вода в количестве 20 г на 1 кг сухого воздуха. Приняв давление в сушильной камере $B = 0,1$ МПа, определить температуру и плотность влажного воздуха на выходе из сушильной камеры и расход теплоты на испарения 1 кг. Задачу решить с использованием hd- диаграммы и привести схему решения.

46. Влажный воздух на входе в сушильную установку имеет параметры $W_1 = 50\%$ и $t_1 = 15$ °С. Объемный расход влажного воздуха на входе с м $V_{31} = 50$. Определить количество воды, испаряемой этим воздухом в секунду из высушиваемого материала, если изменение влагосодержания в камере $\Delta d = 20$ г на 1 кг сухого воздуха. Задачу решить с использованием hd - диаграммы. Принять давление $B = 0,1$ МПа.

47. Определить необходимый объемный расход влажного воздуха на входе в сушильную установку для испарения из материала 10 кг воды в секунду, если параметры влажного воздуха на входе в установку $W_1 = 40\%$ и $t_1 = 25$ °С, а изменение влагосо-

держания воздуха в сушильной камере составляет $\Delta d = 20$ г/(кг сух. возд). Принять давление $B = 0,1$ МПа.

48. Расход сухого воздуха через идеальную сушильную установку составляет 50 кг/с. Определить объемный расход влажного воздуха на входе в установку, на входе в сушильную камеру и на выходе из нее, если $W_1 = 40\%$, $t_1 = 20$ °С, $t_2 = 80$ °С и $W_3 = 80\%$. Принять давление $B = 0,1$ МПа. Задачу решить с использованием $h-d$ диаграммы.

49. Влажный воздух поступает в сушильную установку с параметрами $t_1 = 25$ °С и $W_1 = 80\%$, а выходит из нее с параметрами $t_2 = 55$ °С и $W_2 = 50\%$. Определить массовый и объемный расход воздуха на выходе из установки, если из высушиваемого материала испаряется 2,8 кг воды в секунду. Принять давление $B = 0,1$ МПа. Задачу решить с использованием $h-d$ диаграммы.

50. Влажный воздух массой 5 кг с параметрами $t_1 = 10$ °С и $W_1 = 70\%$, адиабатно смешивается с 10 кг влажного воздуха, параметры которого $t_2 = 60$ °С и $W_2 = 40\%$. Определить влагосодержание, относительную влажность, температуру и плотность образовавшегося при смешении влажного воздуха. Принять давление воздуха до и после смешения $B = 0,1$ МПа.

51. К соплу парциальной газовой турбины подводятся продукты сгорания топлива с начальными параметрами $p_1 = 1,3$ МПа и $t_1 = 550$ °С. В сопле давление понижается до $p_2 = 0,2$ МПа. Потерями напора пренебречь. Считая продукты сгорания идеальным газом с $R = 280$ Дж/(кг К) и $k = 1,33$, определить:

- 1) какой тип сопла применен в турбине;
- 2) параметры и скорость газа в выходном сечении сопла;
- 3) расход газа, если минимальный диаметр сопла $d_{\min} = 10$ мм .

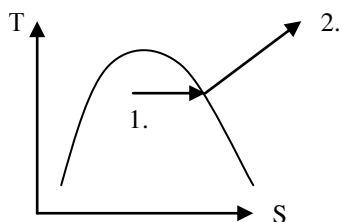
Тест по дисциплине «Теплофизика»

1. В изохорном процессе воздух нагревается на 100 °С. Определите конечное давление - P_2 , если начальные параметры: давление $P_1 = 3$ бара, температура $t_1 = 27$ °С. Выберите правильный вариант ответа.
1. $P_2 = 3$ бара; 2. $P_2 = 4$ бара; 3. $P_2 = 5$ бар; 4. $P_2 = 6$ бар.
2. В обратимом изотермическом процессе расширения при температуре $t = 227$ °С к рабочему телу подводится теплота $Q = 2,5$ МДж. Определите изменение энтропии в процессе. Выберите правильный вариант ответа.
1. $S_2 - S_1 = 2$ кДж/К; 2. $S_2 - S_1 = 3$ кДж/К; 3. $S_2 - S_1 = 4$ кДж/К; 4. $S_2 - S_1 = 5$ кДж/К.
3. Определите работу обратимого цикла Карно, если теплота в количестве $Q_1 = 1$ кДж подводится к рабочему телу при температуре $t_1 = 327$ °С, а отвод теплоты осуществляется при температуре $t_2 = 27$ °С. Выберите правильный вариант ответа.
1. $L = 2$ кДж; 2. $L = 1,5$ кДж; 3. $L = 1$ кДж; 4. $L = 0,5$ кДж.
4. Определите энтальпию влажного пара при степени сухости $x = 0,5$, если энтальпия насыщенной жидкости $i' = 350$ КДж/кг, а теплота парообразования $r = 2300$ КДж/кг.

1. $i = 1600$ КДж/кг; 2. $i = 1500$ КДж/кг; 3. $i = 1400$ КДж/кг; 4. $i = 1300$ КДж/кг.
5. Определите термический КПД цикла Ренкина без учета насоса, если энтальпии пара: перед турбиной $i_1 = 3400$ КДж/кг, после турбины $i_2 = 1800$ КДж/кг, а энтальпия конденсата $i_2' = 200$ КДж/кг.
1. КПД = 0,4; 2. КПД = 0,45; 3. КПД = 0,5; 4. КПД = 0,55/
6. Определите абсолютный внутренний КПД турбины, если ее относительный внутренний КПД равен 0,9, а термический КПД цикла Ренкина составляет 40 %.
1. Абс. вн. КПД = 0,36; 2. Абс. вн. КПД = 0,34; 3. Абс. вн. КПД = 0,32; 4. Абс. вн. КПД = 0,30.
7. Для адиабатного процесса справедливо соотношение:
1. $(P_1/P_2) = (V_2/V_1)^k$; 2. $(P_2/P_1) = (V_2/V_1)^k$; 3. $(P_2/P_1) = (V_2/V_1)^{1/k}$; 4. $(P_1/P_2) = (V_2/V_1)^{1/k}$.
8. В адиабатном процессе расширения идеального газа совершается работа, определяемая выражением:
1. $L = R(T_2 - T_1)$; 2. $L = C_p(T_2 - T_1)$; 3. $L = C_n(T_2 - T_1)$; 4. $L = C_v(T_1 - T_2)$.
9. Теплота политропного процесса определяется по одному из следующих выражений:
1. $q = C_v(T_2 - T_1)$; 2. $q = C_p(T_2 - T_1)$; 3. $q = C_n(T_2 - T_1)$; 4. $q = R(T_2 - T_1)$.
10. Теплоемкость политропного процесса определяется по формуле (n – показатель политропы, k – показатель адиабаты):
1. $C_n = C_v(n - 1)/(n - k)$; 2. $C_n = C_v(n - k)/(n - 1)$; 3. $C_n = C_v(k - n)/(n - 1)$; 4. $C_n = C_v(n - k)/(1 - n)$.
11. Коэффициент полезного действия термодинамического цикла – это:
1. Отношение совершаемой работы к подведенной теплоте;
2. Отношение совершаемой работы к отведенной теплоте;
3. Отношение отведенной теплоты к подведенной;
4. Отношение подведенной теплоты к совершаемой работе.
12. Термодинамический КПД цикла Карно, совершаемого между двумя источниками теплоты, по сравнению с КПД любого другого цикла, совершаемого между теми же источниками, всегда:
1. Меньше; 2. Равен; 3. Больше; 4. Не больше.
13. Совместное выражение I и II законов термодинамики имеет вид:
1. $Tds = du + pdv$; 2. $Tds \geq du + pdv$; 3. $Tds < du + pdv$; 4. $Tds \leq du + pdv$.
14. Изменение энтропии в необратимом адиабатном процессе определяется выражением:
1. $s_2 - s_1 < 0$; 2. $s_2 - s_1 > 0$; 3. $s_2 - s_1 = 0$; 4. $s_2 - s_1 \geq 0$.

15. Уравнение Ван-дер-Ваальса определяется выражением:
 1. $(p + a)(v - b) = RT$; 2. $(p + a/v)(v - b) = RT$; 3. $(p + a/v^2)(v - b) = RT$; 4. $(p + a)(v - b/v^2) = RT$.

16. Процесс водяного пара, изображенный на графике, является:



1. Изохорным; 2. Изобарным; 3. Изотермическим; 4. Политропным.
17. Если влажный воздух охлаждать при постоянном влагосодержании, то его относительная влажность...:
 1. Не изменяется; 2. Уменьшается; 3. Увеличивается; 4. Изменяется произвольно.
18. Если при постоянной температуре влажного воздуха увеличивать его относительную влажность, то показания сухого – t_c и мокрого – t_m термометров будут изменяться следующим образом:
 1. t_c и t_m – уменьшатся; 2. t_c не изменится, t_m – увеличится; 3. t_c не изменится, t_m – уменьшится; 4. t_c и t_m – увеличатся.
19. Какое из приведенных выражений определяет второе начало термодинамики?
 1. $dS = dQ/T$; 2. $dS \leq dQ/T$; 3. $dS \geq dQ/T$; 4. $dS < dQ/T$.
20. В каком из процессов идеального газа теплота равна изменению энтальпии?
 1. Изобарном; 2. Изотермическом; 3. Изохорном; 4. Адиабатном.
21. При адиабатном дросселировании потока не изменяется его ...:
 1. Энтальпия; 2. Энтальпия; 3. Внутренняя энергия; 4. Удельный объем.
22. Какой процесс сжатия газа в компрессоре наиболее экономичен:
 1. Адиабатный; 2. Политропный; 3. Изотермический; 4. Изохорный.
23. В цикле Отто двигателя внутреннего сгорания теплота подводится в следующем процессе:
 1. Изобарном; 2. Изохорном; 3. Изотермическом; 4. Адиабатном.

24. В цикле Дизеля двигателя внутреннего сгорания теплота подводится в следующем процессе:
1. Изобарном; 2. Изохорном; 3. Изотермический; 4. Адиабатном.
25. Сравниваются коэффициенты полезного действия (КПД) двух циклов двигателя внутреннего сгорания с подводом теплоты: а) при $V = \text{const}$ и б) при $P = \text{const}$, при одинаковых степенях сжатия. Выберите вариант ответа:
1. КПД а) < КПД б); 2. КПД а) = КПД б); 3. КПД а) \approx КПД б); 4. КПД а) > КПД б).
26. Как влияет снижение степени повышения давления в газотурбинной установке на ее термодинамический КПД?
1. Не влияет; 2. Увеличивает; 3. Незначительно; 4. Уменьшает.
27. Паросиловая установка, работающая по циклу Ренкина, включает в себя основное оборудование, работающее в следующей последовательности:
1. Котел – турбина – насос – конденсатор – котел;
 2. Турбина – котел – конденсатор – насос – турбина;
 3. Котел – турбина – конденсатор – насос – котел;
 4. Котел – конденсатор – насос – турбина – котел.
28. Повышение давления пара перед турбиной оказывает на термический КПД цикла Ренкина, следующее влияние:
1. Повышает; 2. Понижает; 3. Не влияет; 4. Влияет незначительно.
29. Холодильный коэффициент – это отношение...:
1. Затраченной работы к теплоте, отданной горячему источнику;
 2. Теплоты, отданной горячему источнику, к затраченной работе;
 3. Теплоты, отведенной от холодного источника, к теплоте отданной горячему источнику;
 4. Теплоты, отведенной от холодного источника, к затраченной работе.
30. Какое из приведенных выражений определяет первое начало термодинамики?
1. $dq = du - vdp$; 2. $dq = du + vdp$ 3. $dq = du + pdv$; 4. $dq = du - pdv$.
31. Если теплоемкость линейно зависит от температуры ($c = a + bt$), то её средняя величина между t_1 и t_2 определяется следующим выражением:
1. $C_m = a - \frac{b(t_1 - t_2)}{2}$; 2. $C_m = a + \frac{b(t_1 + t_2)}{2}$; 3. $C_m = a + \frac{b(t_1 - t_2)}{2}$; 4. $C_m = a - \frac{b(t_1 + t_2)}{2}$.
32. Кажущаяся молекулярная масса идеальной смеси, компоненты которой имеют молекулярные массы - μ_i и объемные доли – r_i , определяется по формуле:
1. $\mu_{см} = \frac{1}{\sum r_i \mu_i}$; 2. $\mu_{см} = \sum \mu_i / r_i$; 3. $\mu_{см} = \sum \mu_i \cdot r_i$; 4. $\mu_{см} = \sum r_i / \mu_i$.
33. Внутренняя энергия идеального газа зависит от следующих величин:

1. Температуры и объема; 2. Температуры; 3. Температуры и давления; 4. Давления и объема.

34. Между изобарной – C_p и изохорной – C_v теплоёмкостями идеального газа существует связь, которая определяется выражением:

1. $C_v + R = C_p$; 2. $R - C_v = C_p$; 3. $C_p + C_v = R$; 4. $C_v - C_p = R$.

35. Изохорный подвод теплоты изображается в TS – диаграмме следующим графиком:

