

Министерство науки и высшего образования Российской Федерации
Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего
образования
«Сахалинский государственный университет»

Кафедра геологии и нефтегазового дела

УТВЕРЖДАЮ

Руководитель основной
профессиональной образовательной
программы

Новиков Д.Г.

"27" мая 2025 г.

РАБОЧАЯ ПРОГРАММА

Дисциплины (модуля)
Б1.О.25 «Теплотехника»

Уровень высшего образования
БАКАЛАВРИАТ

Направление подготовки
23.03.03 Эксплуатация транспортно-технологических машин и комплексов
(код и наименование направления подготовки)

Сервис транспортных и транспортно-технологических машин и оборудования (строитель-
ные, дорожные и коммунальные машины)
(наименование направленности (профиля) образовательной программы)

Квалификация
бакалавр

Форма обучения
очная

РПД адаптирована для лиц с ограниченными возможностями здоровья и инвалидов

Южно-Сахалинск
2025

Рабочая программа дисциплины *Б1.О.25 «Теплотехника»* составлена в соответствии с федеральным государственным образовательным стандартом высшего образования (ФГОС ВО) по направлению подготовки 23.03.03 Эксплуатация транспортно-технологических машин и комплексов, профиль «Сервис транспортных и транспортно-технологических машин и оборудования (строительные, дорожные и коммунальные машины)»

Программу составила:

Денисова Янина Вячеславовна, к.б.н., доцент ВАК



Рабочая программа дисциплины *Б1.О.25 «Теплотехника»* утверждена на заседании кафедры строительства № 9 от «27» мая 2025 г.

и.о. заведующего кафедрой Новиков Д.Г.



1. Цели и задачи освоения дисциплины

Цель дисциплины – сформировать у студентов устойчивые представления о практическом применении теоретических, технических и технологических основ термодинамики и теплотехники, дать действенный аппарат для подготовки, принятия и реализации энергоэффективных проектов.

В процессе изучения дисциплины студенты должны понять и усвоить процессы преобразования, передачи и использования теплоты в такой степени, чтобы они могли выбирать и эксплуатировать необходимое теплотехническое оборудование с максимальной эффективностью, экономя топливно-энергетические ресурсы, выявлять и использовать вторичные энергоресурсы, защищать окружающую среду.

Задачи дисциплины:

– изучение основ преобразования энергии, законов термодинамики и теплопередачи, термодинамических процессов и циклов, свойств существенных для отрасли рабочих тел, способов теплообмена, принципа действия и устройства теплообменных аппаратов, теплосиловых установок и других теплотехнических устройств, применяемых в отрасли;

– формирование умения рассчитывать состояния рабочих тел, термодинамические процессы и циклы, теплообменные процессы, аппараты и другие основные технические устройства отрасли;

– формирование навыков расчета и анализа эффективности термодинамических процессов нефтегазового производства, навыков расчёта процессов конвективного тепло- и массопереноса, передачи тепла излучением и молекулярной теплопроводностью, выбора тепловой защиты и организации систем охлаждения, проведения теплотехнических измерений.

2. Место дисциплины (модуля) в структуре образовательной программы

Дисциплина «Теплотехника» относится к базовой части учебного плана подготовки бакалавров по направлению 23.03.03 «Эксплуатация транспортно-технологических машин и комплексов», профиль «Сервис транспортных и технологических машин и оборудования».

Дисциплина входит в перечень курсов федерального компонента профессионального цикла ООП. Она имеет предшествующие логические и содержательно-методические связи с общими математическими и естественнонаучными дисциплинами «Химия», «Физика», «Теория механизмов и машин», «Силовые агрегаты», а также является основой для последующего изучения специальных дисциплин.

3. Формируемые компетенции и индикаторы их достижения по дисциплине (модулю)

Процесс обучения дисциплины «Теплотехника» направлен на формирование следующих компетенций в соответствии с ФГОС 3+ и требованиями к результатам освоения основной профессиональной образовательной программы (ОПОП):

Код и наименование компетенции	Планируемые результаты освоения дисциплины	Код и наименование индикатора достижения компетенции
ОПК-3. Способен в сфере своей профессиональной деятельности проводить измерения и наблюдения, обрабатывать и представлять экспериментальные данные и результаты испытаний.	Знать: методы сбора информации, экспериментальным путем, для разработки модели в трехмерном пространстве.	ОПК-3.1. Демонстрирует знание методов и средств экспериментальных исследований в сфере профессиональной деятельности.
	Уметь: собирать данные экспериментальным путем и выделять необходимое, для построения модели в трехмерном пространстве.	ОПК-3.2. Обоснованно подбирает средства и методы измерения различных параметров в профессиональной деятельности.
	Владеть: навыками построения моделей и механизмов в трехмерном пространстве.	ОПК-3.3. Выбирает современные методы и средства экспериментальных исследований в профессиональной деятельности.

4. Структура и содержание дисциплины (модуля)

4.1. Структура дисциплины (модуля)

Общая трудоемкость дисциплины (модуля) составляет 3 зачетные единицы (108 академических часов).

Вид работы	Трудоемкость, акад. часов	
	6 семестр	всего
Общая трудоемкость	108	108
Контактная работа:	28	28
Лекции (Лек)	10	10
Практические занятия (ПР)	-	-
Лабораторные работы (Лаб)	12	12
Контактная работа в период теоретического обучения (КонтТО) (Проведение текущих консультаций и индивидуальная работа со студентами)	5	5
Самостоятельная работа студентов	54	54
ИТОГО	108/3	108/3
Контроль	26	26

4.2. Распределение видов работы и их трудоемкости по разделам дисциплины (модуля)

№ п/п	Раздел дисциплины/темы	Виды учебной работы (в часах)			Формы текущего контроля успеваемости, промежуточной аттестации
		Контактная		Самостоятельная работа	
		Лекции	Лабораторные занятия		
1.	Раздел 1. Термодинамика	4	6	27	Блиц-опрос, доклад-презентация, собеседование, тестирование, практическое задание
2.	Раздел 2. Теория теплообмена	6	6	27	Блиц-опрос, доклад-презентация, собеседование, тестирование, практическое задание
	итого:	10	12	54	

4.3. Содержание разделов дисциплины

Раздел 1. Термодинамика

Тема 1. Основные понятия и законы феноменологической термодинамики:

Предмет, метод исследования и область применения феноменологической термодинамики. Термодинамическая система. Параметры и уравнения состояния. Идеальный и реальный газы. Смеси идеальных газов. Теплоемкость газов и их смесей. Дифференциальные уравнения термодинамики. Термодинамические потенциалы. Основные законы термодинамики.

Тема 2. Термодинамические процессы:

Термодинамические процессы с идеальным газом. Термодинамические процессы с водяным паром. Влажный воздух.

Тема 3. Рабочий процесс в турбине и компрессоре:

Идеальная газовая турбина и идеальный компрессор. Многоступенчатые компрессоры. Работа и коэффициент полезного действия реальных компрессоров. Принципиальная схема газотурбинной установки и процессы в ней.

Тема 4. Термодинамика газовых потоков:

Сопловое и диффузорное течение. Закон обращения воздействий на поток. Форма каналов сопел и диффузоров. Истечение газа через суживающееся сопло и сопло Лавала. Скачки уплотнения

Тема 5. Циклы теплоэнергетических установок:

Прямые и обратные круговые процессы (циклы). Циклы теплосиловых установок, холодильных машин и тепловых насосов. Цикл Карно, теорема Карно. Обобщенные и эквивалентные циклы Карно. Циклы поршневых двигателей внутреннего сгорания. Циклы газотурбинных двигателей. Циклы паротермических установок. Обратные циклы.

Тема 6. Термодинамический анализ теплотехнических устройств:

Второе начало термодинамики для необратимых процессов. Закон возрастания энтропии. Необратимость и производство работы. Эксергия. Анализ необратимых циклов с помощью системы коэффициентов полезного действия. Энтропийный и эксергетический методы анализа. Тепловой и эксергетический балансы теплоэнергетических установок. Вторичные энергетические ресурсы.

Раздел 2. Теория теплообмена

Тема 1. Теория теплопроводности:

Процессы теплообмена. Основные понятия теории теплопроводности. Теплопроводность материалов. Дифференциальное уравнение теплопроводности. Условия однозначности. Распространение теплоты теплопроводностью в плоской и цилиндрической стенках при стационарном режиме (граничные условия первого рода).

Тема 2. Конвективный теплообмен

Основные понятия и определения. Дифференциальные уравнения конвективного теплообмена. Подобие физических явлений. Гидромеханическое подобие. Тепловое подобие. Уравнения подобия конвективного теплообмена. Экспериментальное изучение конвективного теплообмена.

Тема 3. Теплообмен при вынужденном и свободном движении теплоносителей:

Вынужденное движение жидкости в трубах. Теплоотдача при вынужденном движении жидкости в трубах. Особенности расчета коэффициента теплоотдачи при поперечном омывании пучка оребренных труб. Теплоотдача при свободном движении. Теплообмен при кипении жидкости. Теплоотдача при конденсации пара.

Тема 4. Тепловое излучение:

Общие сведения. Закон поглощения. Основные законы излучения. Серые тела. Закон Кирхгофа. Излучение газов. Теплообмен излучением между двумя телами. Защита от теплового излучения с помощью экранов.

Тема 5. Теплопередача:

Сложный теплообмен. Теплопередача через стенки. Тепловая изоляция. Критический диаметр изоляции.

Тема 6. Типы теплообменных аппаратов:

Схемы тока теплоносителей. Тепловой баланс теплообменного аппарата. Температурный напор. Тепловые расчеты теплообменных аппаратов. Гидродинамический расчет теплообменных аппаратов. Тепловые трубы и термосифоны.

4.4. Лабораторные и семинарские занятия, их наименование, содержание и объем в часах

Занятие 1 (2 ч.) Тема «Основные термодинамические параметры состояния рабочего тела»

Задание. Решение задач.

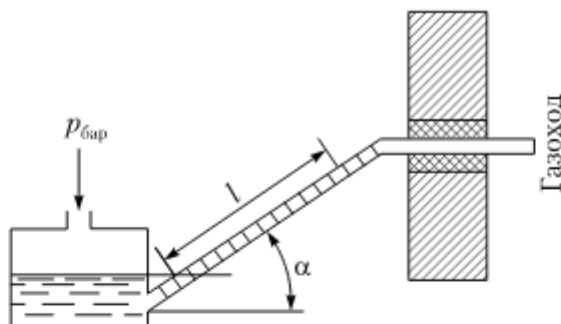
1.1. Манометрическое давление в паровом котле $p_{\text{ман}} = 1$ МПа при барометрическом давлении $p_{\text{бар}} = 735$ мм рт. ст. Как изменится манометрическое давление, если показание барометра понизится до $p_{\text{бар}} = 450$ мм рт. ст., а состояние пара в котле останется прежним?

Ответ: $p_{\text{ман}} = 10,38 \cdot 10^5$ Па.

1.2. Пневматический пресс, поршень которого имеет диаметр $d = 400$ мм, должен действовать с силой $F = 50$ кН. Каково должно быть абсолютное давление воздуха в цилиндре при атмосферном давлении $p_{\text{бар}} = 750$ мм рт. ст.?

Ответ: $p_{\text{абс}} = 1,4 \cdot 10^5$ Па.

1.3. К дымоходу парового котла для измерения разрежения присоединен тягомер (см. схему), угол наклона трубки которого $\alpha = 30^\circ$. Длина столба воды, отсчитанная по наклонной шкале, $l = 200$ мм.



Определите абсолютное давление газа, если показание ртутного барометра $p_{\text{бар}} = 745$ мм рт. ст. при температуре столба ртути $t = 25^\circ\text{C}$.

Ответ: $p_{\text{абс}} = 0,978 \cdot 10^5$ Па.

1.4. Воздух массой $M = 5$ кг занимает объем $V = 2,7$ м³. Определите удельный объем и плотность воздуха в этом состоянии.

Ответ: $v = 0,54$ м³/кг; $\rho = 1,85$ кг/м³.

1.5. Углекислый газ массой $M = 5,4$ кг при температуре $t = 15^\circ\text{C}$ и давлении $p = 1 \cdot 10^5$ Па занимает объем $V = 3$ м³. Определите удельный объем и плотность углекислого газа при заданных условиях.

Ответ: $v = 0,555$ м³/кг; $\rho = 1,8$ кг/м³.

1.6. Установленный на смазочной системе автомобильного двигателя манометр показывает давление $p_{\text{ман}} = 2,3 \cdot 10^5$ Па. Определите абсолютное давление смазки при барометрическом давлении $p_{\text{бар}} = 720$ мм рт. ст.

1.7. Определите, какой объем занимают 1,3 кг воздуха при давлении $p = 1 \cdot 10^5$ Па и температуре $T = 373$ К, если при $p = 1 \cdot 10^5$ Па и $T = 288$ К плотность воздуха $\rho = 1,19$ кг/м³.

Ответ: $V = 1,415$ м³.

1.8. Какой объем занимают 3 т воздуха при нормальных физических условиях?

Ответ: $V = 2320$ м³.

1.9. Какова масса 42 л кислорода при нормальных физических условиях?

Ответ: $M = 0,06$ кг.

1.10. Какова масса 100 л газа, имеющего плотность 25 кг/м³?

Ответ: $M = 255$ кг.

1.11. Определите вакуум в конденсаторе, если абсолютное давление $p_{\text{абс}} = 0,049$ МПа, а барометрическое давление $p_{\text{бар}} = 750$ мм рт. ст.

Ответ: $p_{\text{вак}} = 0,051$ МПа.

1.12. Давление в баллоне $p = 0,025$ МПа при барометрическом давлении $p_{\text{бар}} = 690$ мм рт. ст. Каково будет показание манометра, если атмосферное давление повысится до $p_{\text{бар}} = 775$ мм рт. ст.?

Ответ: $p_{\text{ман}} = 0,0147$ МПа.

1.13. Тягомер, заполненный спиртом ($\rho = 0,8$ г/см³), показывает разрежение в газоходе $p_{\text{разр}} = 50$ мм сп. ст. Определите абсолютное давление дымовых газов, если показание барометра, приведенное к температуре $t = 0^\circ\text{C}$, составляет $p_{\text{бар}} = 757$ мм рт. ст.

Ответ: $p_{\text{абс}} = 0,0955$ МПа.

1.14. Определите силу, действующую на поршень диаметром $d = 150$ мм, если давление в цилиндре $p = 49 \cdot 10^5$ Па. Барометрическое давление $p_{\text{бар}} = 750$ мм рт. ст.

Ответ: $F = 9$ т.

1.15. Разрежение в дымовой трубе $p_{\text{разр}} = 30$ мм вод. ст., атмосферное давление $p_{\text{атм}} = 763$ мм рт. ст. при температуре $t = 30^\circ\text{C}$. Определите абсолютное давление дымовых газов.

Ответ: $p_{\text{абс}} = 0,101$ МПа.

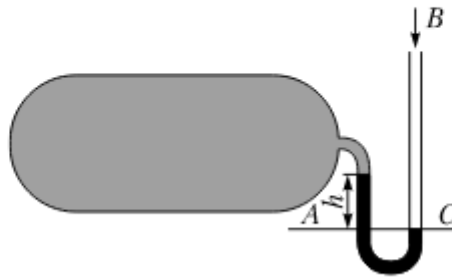
1.16. Манометр показывает давление $p_{\text{ман}} = 800$ мм вод. ст. при барометрическом давлении $p_{\text{бар}} = 780$ мм рт. ст. При другом наблюдении показания приборов оказались соответственно $p_{\text{ман}} = 600$ мм вод. ст. и $p_{\text{бар}} = 795$ мм рт. ст. Как изменилось абсолютное давление?

Ответ: давление $p_{\text{абс}} = 0,112$ МПа не изменилось.

1.17. В машинно-котельном отделении (МКО) судна давление по водяному манометру $p_{\text{ман}}^{\text{МКО}} = 120$ мм вод. ст. Барометр на палубе показывает $p_{\text{бар}}^{\text{п}} = 750$ мм рт. ст. По показаниям манометра на котле рабочее давление составляет $p_{\text{ман}}^{\text{к}} = 3,0$ МПа. Разрежение в конденсаторе по вакуумметру $p_{\text{разр}}^{\text{конд}} = 610$ мм рт. ст. Определите абсолютные давления в машинно-котельном отделении, котле и конденсаторе.

Ответ: $p_{\text{абс}}^{\text{МКО}} = 0,101$ МПа; $p_{\text{абс}}^{\text{к}} = 3,08$ МПа; $p_{\text{абс}}^{\text{конд}} = 0,0196$ МПа.

1.18. Определите абсолютное давление в трубопроводе (см. схему), если разность уровней ртути в манометре составляет $h_1 = 515$ мм, а высота столба воды, налитой поверх ртути, $h_2 = 50$ мм. Давление окружающей среды $p_{о.с} = 0,106$ МПа.



Ответ: $p = 1,75 \cdot 10^5$ Па.

1.19. Судно на воздушной подушке имеет размеры $L = 20$ м, $B = 5$ м, масса судна $M = 4$ т. Какое избыточное давление в миллиметрах водного столба должен создавать вентилятор, чтобы оно опиралось на воздушную подушку?

Ответ: $p_{изб} = 40$ мм вод. ст.

1.20. Определите массу воздуха, заключенного в баллоне емкостью 400 л, если плотность воздуха при некоторых давлении и температуре $\rho = 28,6$ кг/м³.

Ответ: $M = 11,44$ кг.

1.21. Масса 1 м³ метана при определенных условиях составляет 0,7 кг. Определите плотность и удельный объем метана при этих условиях.

Ответ: $\rho = 0,7$ кг/м³; $v = 1,429$ м³/кг.

1.22. Плотность воздуха при определенных условиях $\rho = 1,293$ кг/м³. Определите удельный объем воздуха при этих условиях.

Ответ: $v = 0,773$ м³/кг.

1.23. В сосуде объемом 0,9 м³ находится 1,5 кг окиси углерода. Определите удельный объем и плотность окиси углерода при указанных условиях.

Ответ: $v = 0,6$ м³/кг; $\rho = 1,67$ кг/м³.

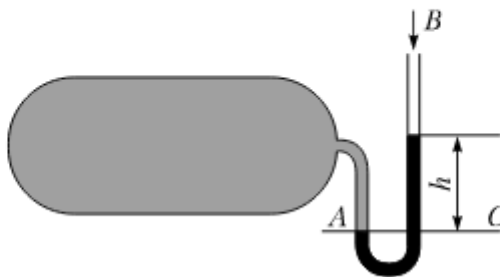
1.24. Давление воздуха по ртутному барометру $p_{бар} = 770$ мм рт. ст. при температуре ртути $t = 0^\circ\text{C}$. Выразите это давление в паскалях.

Ответ: $p_{бар} = 102\,660$ Па = 102,7 кПа.

1.25. Давление воздуха, измеренное ртутным барометром, $p_{бар} = 765$ мм рт. ст. при температуре ртути $t = 20^\circ\text{C}$. Выразите это давление в паскалях.

Ответ: $p_{бар} = 101\,640$ Па = 101,6 кПа.

1.26. Определите абсолютное давление в сосуде (см. схему), если показание присоединенного к нему ртутного манометра $p_{\text{ман}} = 66,7$ кПа (500 мм рт. ст.), а атмосферное давление по ртутному барометру $p_{\text{бар}} = 100$ кПа (750 мм рт. ст.). Температура воздуха в месте установки приборов $t_{\text{о.с}} = 0^\circ\text{C}$.



Ответ: $p_{\text{абс}} = 0,1667$ МПа.

1.27. Определите абсолютное давление в паровом котле, если манометр показывает $p_{\text{ман}} = 0,245$ МПа, а атмосферное давление по ртутному барометру составляет $p_{\text{бар}} = 93\,325$ Па (700 мм рт. ст.) при температуре ртути $t = 20^\circ\text{C}$.

Ответ: $p_{\text{абс}} = 0,338$ МПа.

1.28. Какая высота водяного столба соответствует 10 Па?

Ответ: $h = 1$ мм.

1.29. Какая высота ртутного столба соответствует 100 кПа?

Ответ: $h = 750$ мм.

1.30. Определите абсолютное давление в конденсаторе паровой турбины, если показание присоединенного к нему ртутного вакуумметра $p_{\text{разр}} = 94$ кПа (705 мм рт. ст.), а показание ртутного барометра, приведенное к температуре $t = 0^\circ\text{C}$, составляет $p_{\text{бар}} = 99,6$ кПа (747 мм рт. ст.). Температура воздуха в месте установки приборов $t_{\text{о.с}} = 20^\circ\text{C}$.

Ответ: $p_{\text{абс}} = 60$ кПа.

Указание к выполнению заданию.

Для решения задач нужно воспользоваться лекционным материалом и материалом, приведенным в источнике «Теплотехника. Практикум» под редакцией В. Л. Ерофеева, А. С. Пряхина, с. 13 – 17. Для помощи студенту ниже приводятся примеры решения задач.

Пример 1.1. Определите абсолютное давление в конденсаторе, если вакуумметр, установленный на нем, показывает разрежение $p_{\text{разр}} = 660$ мм рт. ст. Показание барометра $p_{\text{бар}} = 744$ мм рт. ст.

Решение. Абсолютное давление находим по формуле

$$p_{\text{абс}} = p_{\text{бар}} - p_{\text{разр}}.$$

Таким образом,

$$p_{\text{абс}} = \frac{744 - 660}{7,5024 \cdot 10^{-3}} = 11\,196 \text{ (Па)}.$$

Ответ: $p_{\text{абс}} = 11\,196 \text{ Па}$.

Пример 1.2. Скольким градусам шкалы Цельсия соответствует температура 100°F и скольким градусам шкалы Фаренгейта соответствует температура 5°C ?

Решение. Для пересчета значений температур воспользуемся соотношениями, приведенными в табл. 1.2:

$$t = (T_{\text{F}} - 32)/1,8 = (100 - 32)/1,8 = 37,8 \text{ (}^\circ\text{C)};$$

$$T_{\text{F}} = 1,8t + 32 = 1,8 \cdot 5 + 32 = 41 \text{ (}^\circ\text{F)}.$$

Ответ: $100^\circ\text{F} = 37,8^\circ\text{C}$; $5^\circ\text{C} = 41^\circ\text{F}$.

Пример 1.3. Определите массу воздуха в баллоне объемом $V = 10 \text{ л}$, если его плотность составляет $\rho = 2,56 \text{ кг/м}^3$.

Решение. Массу воздуха находим по формуле

$$M = V\rho;$$

$$M = 0,010 \cdot 2,56 = 0,0256 \text{ кг}.$$

Ответ: $M = 0,0256 \text{ кг}$.

Пример 1.4. Определите изменение удельного объема кислорода, содержащегося в баллоне объемом $V = 50 \text{ л}$, после израсходования $\Delta M = 10 \text{ кг}$, если первоначальная масса газа $M_1 = 40 \text{ кг}$.

Решение. Конечная масса кислорода

$$M_2 = M_1 - \Delta M = 40 - 10 = 30 \text{ кг}.$$

Начальный удельный объем кислорода

$$v_1 = \frac{V}{M_1} = \frac{0,050}{40} = 0,00125 \text{ (м}^3\text{/кг)}.$$

Конечный удельный объем

$$v_2 = \frac{V}{M_2} = \frac{0,050}{30} = 0,001667 \text{ (м}^3\text{/кг)}.$$

Изменение удельного объема

$$\Delta v = v_2 - v_1 = 0,001667 - 0,00125 = 0,000417 \text{ (м}^3\text{/кг)}.$$

Ответ: $\Delta v = 0,000417 \text{ м}^3\text{/кг}$.

Занятие 2 (2 ч.) Тема «Связь между параметрами состояния. Уравнения состояния идеальных газов»

Задание. Решение задач.

2.1. Определите объем V , занимаемый углекислым газом массой $M = 5$ кг при температуре $t = 17^\circ\text{C}$ и давлении $p = 0,147$ МПа.

Ответ: $V = 1,86$ м³.

2.2. Определите массу воздуха в баллоне емкостью $V = 400$ л, если давление по манометру $p_{\text{ман}} = 1,5$ МПа, а температура $t = 27^\circ\text{C}$. Барометрическое давление $p_{\text{бар}} = 740$ мм рт. ст.

Ответ: $M = 7,3$ кг.

2.3. Определите давление в баллоне емкостью $V = 100$ л при температуре $t = 15^\circ\text{C}$, если в нем содержится $V = 0,5$ м³ кислорода при нормальных физических условиях.

Ответ: $p = 0,514$ МПа.

2.4. Какой объем занимает воздух массой $M = 2$ кг при давлении $p = 4,9$ МПа и температуре $t = 20^\circ\text{C}$?

Ответ: $V = 0,0343$ м³.

2.5. При какой температуре азот массой $M = 10$ кг имеет объем $V = 30$ л, если его давление $p = 14,7 \cdot 10^5$ Па? Барометрическое давление $p_{\text{бар}} = 760$ мм рт. ст.

Ответ: $t = -123^\circ\text{C}$.

2.6. Какую температуру имеет кислород, сжатый до $p = 1,275$ МПа, если его масса $M = 30$ кг занимает объем $V_{\text{O}_2} = 0,5$ м³?

Ответ: $t = 85^\circ\text{C}$.

2.7. Сколько килограммов воздуха израсходовано на пуск двигателя, если давление в баллоне емкостью $V = 400$ л снизилось с $p_1 = 2,94$ до $p_2 = 2,45$ МПа?

Ответ: $M = 2,78$ кг.

2.8. Как изменится объем продуктов горения топлива, если температура снизится с $t_1 = 1500$ до $t_2 = 500^\circ\text{C}$ при неизменном давлении?

Ответ: в 2,3 раза.

2.9. Объем газа при температуре $t_1 = 15^\circ\text{C}$ равен $V = 0,8 \text{ м}^3$. Каким будет объем этого газа, если температуру повысить до $t_2 = 30^\circ\text{C}$, не изменяя давления?

Ответ: $V = 0,84 \text{ м}^3$.

2.10. Воздух объемом $V = 100 \text{ м}^3$ при температуре $t_1 = 30^\circ\text{C}$ нагревают в воздухоподогревателе до температуры $t_2 = 90^\circ\text{C}$ при постоянном давлении. Какой объем будет занимать нагретый воздух?

Ответ: $V = 120 \text{ м}^3$.

2.11. Во сколько раз уменьшился объем газа при постоянной температуре, если давление увеличилось с $p_1 = 0,196$ до $p_2 = 0,49 \text{ МПа}$? Барометрическое давление $p_{\text{бар}} = 735,6 \text{ мм рт. ст.}$

Ответ: в 2 раза.

2.12. Газ объемом $V = 4 \text{ м}^3$ сжимают при постоянной температуре от $p_1 = 2,94 \cdot 10^5 \text{ Па}$ до $p_2 = 6,87 \cdot 10^5 \text{ Па}$. Каков конечный объем газа? Барометрическое давление $p_{\text{бар}} = 750 \text{ мм рт. ст.}$

Ответ: $V = 2 \text{ м}^3$.

2.13. В резервуаре емкостью $V = 2 \text{ м}^3$ находится воздух при температуре $t = -5^\circ\text{C}$. Вакуумметр показывает разрежение $p_{\text{вак}} = 200 \text{ мм рт. ст.}$ Барометрическое давление $p_{\text{бар}} = 740 \text{ мм рт. ст.}$ Определите массу воздуха.

Ответ: $M = 1,94 \text{ кг.}$

2.14. Какое давление будет показывать манометр, установленный на баллоне емкостью $V = 40 \text{ л}$, если баллон наполнить азотом массой $M = 1,13 \text{ кг}$ при температуре $t = 20^\circ\text{C}$? Барометрическое давление $p_{\text{бар}} = 765 \text{ мм рт. ст.}$

Ответ: $p = 0,231 \text{ МПа.}$

2.15. В резервуаре емкостью $V = 20 \text{ м}^3$ находится смесь газов, состоящая из $N_1 = 0,6$ моля углекислого газа и $N_2 = 1,3$ моля азота. Давление по манометру $p_{\text{ман}} = 0,15 \text{ МПа}$. Барометрическое давление $p_{\text{бар}} = 745 \text{ мм рт. ст.}$ Какова температура смеси?

Ответ: $t = 38^\circ\text{C.}$

2.16. Два баллона одинаковой емкостью заполнены одинаковой массой различных газов: метана и кислорода. Температура обоих газов одинакова. Одинаково ли давление в баллонах?

Ответ: давление в баллоне, содержащем метан, приблизительно в 2 раза больше, чем в баллоне, содержащем кислород.

2.17. Чему равен объем азота при давлении $p = 0,589 \text{ МПа}$ и температуре $t = 40^\circ\text{C}$, если при температуре $t = 0^\circ\text{C}$ и давлении $p = 0,196 \text{ МПа}$ он составляет $V = 3 \text{ м}^3$?

Ответ: $V = 1,145 \text{ м}^3$.

2.18. Как изменится плотность воздуха, если его абсолютное давление возрастет в 2 раза, а температура повысится с $t_1 = 5^\circ\text{C}$ до $t_2 = 100^\circ\text{C}$?

Ответ: увеличится в 1,49 раза.

2.19. В баллоне находится газ при температуре $t_1 = -15^\circ\text{C}$ и давлении $p_1 = 4,12$ МПа. Каким будет давление в баллоне, если его перенесут в помещение, где температура газа повысится до $t_2 = 30^\circ\text{C}$? Барометрическое давление при этом не остается постоянным и равно $p_{\text{бар}} = 750$ мм рт. ст.

Ответ: $p = 4,86$ МПа.

2.20. По трубопроводу протекает $V_\tau = 4$ м³/мин кислорода при давлении $p = 1,47 \cdot 10^5$ Па и температуре $t = 17^\circ\text{C}$. Какая масса газа протечет в течение $\tau = 20$ мин?

Ответ: $M = 156$ кг.

2.21. За какое время компрессор, всасывающий $V_\tau = 3$ м³/мин воздуха, заполнит резервуар емкостью $V = 1,5$ м³ до давления $p = 3,92 \cdot 10^5$ Па? Температура воздуха в резервуаре повышается с $t_1 = 10^\circ\text{C}$ до $t_2 = 70^\circ\text{C}$. Барометрическое давление $p_{\text{бар}} = 765$ мм рт. ст.

Ответ: $\tau = 1,49$ мин.

2.22. В баллоне емкостью $V = 20$ л находится азот массой $M = 2,62$ кг при температуре $t_1 = 20^\circ\text{C}$. Какая масса газа выпущена из баллона, если давление понизилось в 2 раза, а температура упала до $t_2 = 5^\circ\text{C}$?

Ответ: $M = 1,24$ кг.

2.23. Производительность компрессора при давлении $p = 0,0981$ МПа и температуре $t_1 = 10^\circ\text{C}$ равна $V_\tau = 250$ м³/ч. За какое время компрессор наполнит воздухом резервуар емкостью $V = 25$ м³ при повышении давления с $p_1 = 0,049$ до $p_2 = 0,49$ МПа? Изменением температуры воздуха пренебречь. Барометрическое давление $p_{\text{бар}} = 736$ мм рт. ст.

Ответ: $\tau = 27,2$ мин.

2.24. Открытый сосуд (сообщенный с атмосферным воздухом при давлении $p_1 = 0,1$ МПа и температуре $t_1 = 17^\circ\text{C}$) емкостью $V = 2$ м³ нагревают до $t_2 = 400^\circ\text{C}$, после чего разобщают с атмосферой и охлаждают. Какое количество воздуха вытекло из сосуда при нагревании? Какое давление установится в сосуде, когда температура воздуха в нем станет равной первоначальной?

Ответ: $M = 1,37$ кг; $p_2 = 0,043$ МПа.

2.25. Баллон, содержащий кислород под давлением $p_1 = 12,75$ МПа, имеет массу $M_1 = 35,1$ кг. В результате выпуска части газа масса баллона стала равной $M_2 = 33,2$ кг, а давление снизилось до $p_2 = 7,36$ МПа. Какое давление установится в баллоне, если из него выпустить еще $\Delta M = 0,85$ кг кислорода? Температура газа во всех указанных случаях одинакова и равна $t = 15^\circ\text{C}$.

Ответ: $p = 4,95$ МПа.

2.26. В цилиндре диаметром $d = 0,6$ м содержится $V = 0,41$ м³ воздуха при давлении $p = 0,25$ МПа и температуре $t = 35^\circ\text{C}$. До какой температуры должен нагреваться воздух при постоянном давлении, чтобы движущийся без трения поршень поднялся на $h = 0,4$ м?

Ответ: $t_2 = 117,6^\circ\text{C}$.

2.27. В цилиндрическом сосуде, имеющем внутренний диаметр $d = 0,6$ м и высоту $h = 2,4$ м, находится воздух при температуре $t = 18^\circ\text{C}$. Давление воздуха составляет $p = 0,765$ МПа. Барометрическое давление (приведенное к нулю) $p_{\text{бар}} = 101\,858$ Па. Определите массу воздуха в сосуде.

Ответ: $M = 7,04$ кг.

2.28. Баллон с кислородом емкостью $V = 20$ л находится под давлением $p_1 = 10$ МПа при температуре $t_1 = 15^\circ\text{C}$. После израсходования части кислорода давление понизилось до $p_2 = 7,6$ МПа, а температура упала до $t_2 = 10^\circ\text{C}$. Определите массу израсходованного кислорода.

Ответ: $M = 0,606$ кг.

2.29. В сосуде объемом $V = 0,5$ м³ находится воздух под давлением $p_1 = 0,2$ МПа при температуре $t = 20^\circ\text{C}$. Сколько воздуха надо выкачать из сосуда, чтобы разрежение в нем составило $p_{\text{раз}} = 56$ кПа при условии, что температура в сосуде не изменится? Атмосферное давление по ртутному барометру $p_{\text{атм}} = 102,4$ кПа при температуре ртути в нем $t_{\text{ртути}} = 18^\circ\text{C}$; разрежение в сосуде измерено ртутным вакуумметром при температуре ртути $t_{\text{ртути}} = 20^\circ\text{C}$.

Ответ: $M = 1,527$ кг.

2.30. Резервуар объемом $V = 4$ м³ заполнен углекислым газом. Определите массу и силу тяжести (вес) газа в резервуаре, если избыточное давление газа $p_{\text{изб}} = 40$ кПа, температура его $t = 80^\circ\text{C}$, а барометрическое давление воздуха $p_{\text{бар}} = 102,4$ кПа.

Ответ: $M = 8,64$ кг; $G = 84,8$ Н.

Указание к выполнению задания.

Для решения задач нужно воспользоваться лекционным материалом и материалом, приведенным в источнике «Теплотехника. Практикум» под редакцией В. Л. Ерофеева, А. С. Пряхина, с. 23 – 24. Для помощи студенту ниже приводятся примеры решения задач.

Пример 2.1. Каково давление в резервуаре емкостью $V = 0,5$ м³, если в нем содержится $M = 0,945$ кг водорода при температуре $t = 25^\circ\text{C}$?

Решение. Давление водорода находим из уравнения состояния

$$p = \frac{MRT}{V} = \frac{0,945 \cdot 4124 \cdot 298}{0,5} = 23,4 \cdot 10^5 \text{ (Па)},$$

где $R = 4124$ Дж/(кг · К) — газовая постоянная водорода.

Ответ: $p = 23,4 \cdot 10^5$ Па.

Пример 2.2. Какой объем занимает смесь, состоящая из $N_1 = 0,8$ молей одного газа и $N_2 = 0,4$ моля другого газа при давлении $p = 2,94 \cdot 10^5$ Па и температуре $t = 45^\circ\text{C}$?

Решение. Число молей смеси газа

$$N = 0,8 + 0,4 = 1,2 \text{ моля.}$$

Из уравнения состояния для N молей газа определяем объем смеси:

$$V = \frac{8314NT}{p} = \frac{8314 \cdot 1,2 \cdot 318}{2,94 \cdot 10^5} = 10,78 \text{ (м}^3\text{)}.$$

Ответ: $V = 10,78$ м³.

Пример 2.3. Чему равна плотность идеального газа при $p_2 = 11,76 \cdot 10^5$ Па и $t_2 = 60^\circ\text{C}$, если при $p_1 = 2,94 \cdot 10^5$ Па и $t_1 = 10^\circ\text{C}$ его плотность составляет $\rho_1 = 4$ кг/м³?

Решение. Зная, что $v = 1/\rho$, запишем уравнение состояния для первого и второго состояний:

$$p_1 = \rho_1 R T_1;$$

$$p_2 = \rho_2 R T_2.$$

После почленного деления правых и левых частей получим

$$\frac{p_1}{p_2} = \frac{\rho_1 T_1}{\rho_2 T_2},$$

откуда определим плотность газа

$$\rho_2 = \rho_1 \frac{p_2 T_1}{p_1 T_2} = 4 \cdot \frac{11,76}{2,94} \cdot \frac{283}{333} = 13,6 \text{ (кг/м}^3\text{)}.$$

Ответ: $\rho_2 = 13,6$ кг/м³.

Пример 2.4. Баллон с воздухом при давлении $p_1 = 12,26$ МПа и температуре $t_1 = 25^\circ\text{C}$ имеет массу $M_1 = 36,12$ кг. В результате выпуска части воздуха масса стала равной $M_2 = 35,21$ кг. Давление воздуха снизилось до $p_2 = 8,83$ МПа, а температура — до $t_2 = 15^\circ\text{C}$. Каким будет давление в баллоне при температуре $t_3 = 25^\circ\text{C}$, если из него выпустить еще $\Delta M_{в2} = 0,5$ кг воздуха?

Решение. Масса баллона $M_б$ и воздуха в нем $M_в$ в начальном состоянии

$$M_1 = M_б + M_{в1} = 36,12 \text{ (кг)}.$$

Масса баллона с воздухом после выпуска первой порции воздуха

$$M_2 = M_б + M_{в2} = 35,21 \text{ (кг)}.$$

Вычитая из первого уравнения второе, определим массу выпущенной первой порции воздуха:

$$\Delta M_{в1} = M_{в1} - M_{в2} = 36,12 - 35,21 = 0,91 \text{ (кг)}.$$

Используя уравнение состояния, находим выражение для расчета объема баллона

$$\left(\frac{p_1}{T_1} - \frac{p_2}{T_2} \right) \frac{V}{R} = \left(\frac{12,26}{298} - \frac{8,83}{288} \right) \cdot \frac{10^6}{287} V = 0,91 \text{ (кг)}.$$

Отсюда находим емкость баллона:

$$V = 0,025 \text{ м}^3 = 25 \text{ л}.$$

Масса воздуха в баллоне после выпуска части воздуха

$$M_{в2} = \frac{p_2 V}{R T_2} = \frac{88,3 \cdot 10^5 \cdot 0,025}{287 \cdot 288} = 2,67 \text{ (кг)}.$$

Масса воздуха после дополнительного выпуска 0,5 кг

$$M_в = M_{в2} - 0,5 = 2,67 - 0,5 = 2,17 \text{ (кг)}.$$

Давление воздуха в этом случае

$$p_2 = \frac{MRT_3}{V} = \frac{2,17 \cdot 287 \cdot 298}{0,025 \cdot 10^5} = 7,43 \cdot 10^5 \text{ (Па)}.$$

Ответ: $p_2 = 7,43 \cdot 10^5$ Па.

Занятие 3 (2 ч.) Тема «Смеси идеальных газов»

Задание. Решение задач.

3.1. Определите массовый состав и массу газовой смеси в баллоне емкостью $V = 33$ л, если давление смеси $p_{\text{см}} = 1,2$ МПа, а температура $t = 40^\circ\text{C}$. Объемный состав смеси: $r_{\text{CO}_2} = 15\%$; $r_{\text{N}_2} = 83\%$; $r_{\text{O}_2} = 2\%$.

Ответ: $m_{\text{CO}_2} = 0,216$; $m_{\text{N}_2} = 0,763$; $m_{\text{O}_2} = 0,021$; $M = 0,462$ кг.

3.2. Принимая, что сухой воздух состоит из 21 объемной части кислорода и 79 объемных частей азота, определите массовый состав воздуха, его газовую постоянную, кажущуюся молекулярную массу и плотность при нормальных условиях.

Ответ: $m_{\text{O}_2} = 0,232$; $m_{\text{N}_2} = 0,768$; $R_{\text{в}} = 287$ Дж/(кг·К); $\mu_{\text{в}} = 29$; $\rho_{\text{в}} = 1,293$ кг/м³.

3.3. Смесь газа состоит из $N_{\text{N}_2} = 4$ молей азота, $N_{\text{CO}_2} = 2$ молей углекислого газа и $N_{\text{O}_2} = 2$ молей кислорода. Определите объемный и массовый составы смеси и ее газовую постоянную.

Ответ: $r_{\text{N}_2} = 0,5$; $r_{\text{CO}_2} = 0,25$; $r_{\text{O}_2} = 0,25$; $m_{\text{N}_2} = 0,425$; $m_{\text{CO}_2} = 0,333$; $m_{\text{O}_2} = 0,242$; $R_{\text{с}} = 253$ Дж/(кг·К).

3.4. При сгорании 1 кг жидкого топлива образуется 20 кг дымовых газов, имеющих следующий объемный состав: $r_{\text{CO}_2} = 8\%$; $r_{\text{O}_2} = 13\%$; $r_{\text{N}_2} = 79\%$. Определите массу каждого компонента дымовых газов при сгорании 100 кг топлива.

Ответ: $M_{\text{CO}_2} = 12,8$ кг; $M_{\text{O}_2} = 13,9$ кг; $M_{\text{N}_2} = 74,3$ кг.

3.5. В сосудах объемом $V = 1$ м³ при давлении $p = 0,195$ МПа находится смесь азота и углекислого газа при температуре $t = 50^\circ\text{C}$. Масса азота в сосудах $M_{\text{N}_2} = 1,5$ кг. Определите массовые и объемные доли и массу углекислого газа.

Ответ: $r_{\text{N}_2} = 0,735$; $r_{\text{CO}_2} = 0,265$; $m_{\text{N}_2} = 0,638$; $m_{\text{CO}_2} = 0,362$; $M_{\text{CO}_2} = 0,85$ кг.

3.6. В резервуаре объемом $V = 20$ м³ находится смесь газа, объемный состав которой — $r_{\text{CO}_2} = 13\%$, $r_{\text{O}_2} = 7\%$, $r_{\text{N}_2} = 80\%$. Смесь находится под разрежением $p_{\text{раз}} = 250$ мм рт. ст. при температуре $t = 20^\circ\text{C}$. Барометрическое давление $p_{\text{бар}} = 740$ мм рт. ст. Определите массу смеси газов в резервуаре.

Ответ: $M = 16$ кг.

3.7. Какой объем будут занимать 10 молей газовой смеси, имеющей объемный состав $r_{\text{H}_2} = 40\%$, $r_{\text{CH}_4} = 35\%$, $r_{\text{CO}} = 15\%$, $r_{\text{N}_2} = 10\%$ при давлении $p = 0,3$ МПа и температуре $t = 90^\circ\text{C}$. Определите также массовый состав, газовую постоянную и кажущуюся молекулярную массу смеси.

Ответ: $V = 100,5$ м³; $m_{\text{H}_2} = 0,059$; $m_{\text{CH}_4} = 0,418$; $m_{\text{CO}} = 0,314$; $m_{\text{N}_2} = 0,209$; $\mu_{\text{см}} = 13,4$; $R_{\text{см}} = 620$ Дж/(кг·К).

3.8. Горючий газ, состоящий из водорода и метана, при давлении $p = 0,05$ МПа и температуре $t = 25^\circ\text{C}$ находится в сосуде емкостью $V = 2,5$ м³. Газовая постоянная горючего газа $R_r = 2000$ Дж/(кг·К). Определите массовые, объемные доли и массу газа в сосуде.

Ответ: $m_{\text{H}_2} = 0,396$; $m_{\text{CH}_4} = 0,604$; $r_{\text{H}_2} = 0,165$; $r_{\text{CH}_4} = 0,835$; $M = 0,64$ кг.

3.9. В котле при сгорании топлива образуются дымовые газы следующего состава по объему: $r_{\text{CO}_2} = 12\%$; $r_{\text{CO}} = 1,5\%$; $r_{\text{O}_2} = 7\%$; $r_{\text{N}_2} = 79,5\%$. Определите плотность и удельный объем дымового газа, если его температура $t = 250^\circ\text{C}$, а давление $p = 720$ мм рт. ст.

Ответ: $\rho_{\text{см}} = 0,565$ кг/м³; $v_{\text{см}} = 1,77$ м³/кг.

3.10. В баллоне объемом $V = 30$ л находится горючий газ следующего состава по объему: $r_{\text{H}_2} = 15\%$; $r_{\text{CH}_4} = 20\%$; $r_{\text{CO}} = 5\%$; $r_{\text{N}_2} = 60\%$. Давление газа по манометру $p_{\text{ман}} = 1,2$ МПа, температура $t = 5^\circ\text{C}$. Барометрическое давление $p_{\text{бар}} = 745$ мм рт. ст. Часовой расход горючего газа на горелку $M_r = 0,30$ кг/ч. Определите время работы газовой горелки.

Ответ: $\tau = 11,2$ ч.

3.11. Какова объемная доля азота в уходящих газах двигателя внутреннего сгорания, если объем остальных составляющих выпускных газов следующий: $r_{\text{CO}_2} = 13,5\%$; $r_{\text{O}_2} = 6\%$; $r_{\text{CO}} = 1,0\%$. Определите массовые доли компонентов смеси, газовую постоянную и кажущуюся молекулярную массу уходящих газов.

Ответ: $r_{\text{N}_2} = 0,8$; $m_{\text{N}_2} = 0,749$; $m_{\text{CO}} = 0,009$; $m_{\text{CO}_2} = 0,189$; $m_{\text{O}_2} = 0,063$; $\mu_{\text{см}} = 30,32$; $R_{\text{см}} = 275$ Дж/(кг·К).

3.12. Природный газ, имеющий объемный состав $r_{\text{CH}_4} = 93\%$, $r_{\text{N}_2} = 5\%$, подается по трубопроводу в газгольдеры, в которых он сохраняется под давлением $0,12$ МПа при температуре $t = 25^\circ\text{C}$. Определите массу газа в газгольдерах и его плотность.

Ответ: $M = 208$ кг; $\rho_{\text{см}} = 0,830$ кг/м³.

3.13. Генераторный газ имеет следующий массовый состав: $m_{\text{N}_2} = 62\%$; $m_{\text{CO}} = 30\%$; $m_{\text{CO}_2} = 5,5\%$; $m_{\text{H}_2} = 2,5\%$. Определите парциальные давления компонентов смеси и ее плотность, если генераторный газ находится под давлением $p = 2,15$ МПа при температуре $t = 50^\circ\text{C}$.

Ответ: $p_{\text{N}_2} = 1,05$ МПа; $p_{\text{CO}} = 0,51$ МПа; $p_{\text{H}_2} = 0,58$ МПа; $p_{\text{CO}_2} = 0,06$ МПа; $\rho_{\text{см}} = 17,3$ кг/м³.

3.14. Определите газовую постоянную, плотность и удельный объем смеси газов при нормальных физических условиях, если кажущаяся молекулярная масса смеси $\mu_{\text{см}} = 20$.

Ответ: $\rho_{\text{см}} = 0,895$ кг/м³; $v_{\text{см}} = 1,12$ м³/кг.

3.15. До какого давления надо сжать смесь массой $M_{\text{см}} = 16$ кг смеси, имеющую объемный состав $r_{\text{CO}_2} = 6,0\%$, $r_{\text{O}_2} = 15\%$, $r_{\text{N}_2} = 79\%$, чтобы при температуре $t = 250^\circ\text{C}$ ее объем был $V = 6$ м³?

Ответ: $p_{\text{см}} = 0,392$ МПа.

3.16. Определите плотность и газовую постоянную сухих дымовых газов после котла при температуре $t = 300^\circ\text{C}$ и разрежении в газоходе $p_{\text{раз}} = 10$ мм рт. ст., если их объемный состав следующий: $r_{\text{CO}_2} = 13,5\%$; $r_{\text{CO}} = 1,5\%$; $r_{\text{O}_2} = 5,5\%$; $r_{\text{N}_2} = 79,5\%$. Барометрическое давление $p_{\text{раз}} = 745$ мм рт. ст. Найдите также плотность дымовых газов при нормальных физических условиях.

Ответ: $\rho_{\text{см}} = 0,63 \text{ кг/м}^3$; $\rho_{\text{H}} = 1,355 \text{ кг/м}^3$; $R_{\text{см}} = 274 \text{ Дж/(кг} \cdot \text{K)}$.

3.17. Газовая смесь, состоящая из углекислого газа и азота, имеет кажущуюся молекулярную массу $\mu_{\text{см}} = 34$. Определите массовый и объемный составы смеси, газовую постоянную и плотность смеси при давлении $p = 0,11$ МПа и температуре $t = 120^\circ\text{C}$.

Ответ: $m_{\text{CO}_2} = 0,485$; $m_{\text{N}_2} = 0,515$; $r_{\text{CO}_2} = 0,375$; $r_{\text{N}_2} = 0,625$; $R_{\text{см}} = 244 \text{ Дж/(кг} \cdot \text{K)}$; $\rho_{\text{см}} = 1,10 \text{ кг/м}^3$.

3.18. Смесь газов состоит по массе из четырех частей воздуха и одной части окиси углерода. Определите массовые и объемные доли, кажущуюся молекулярную массу, газовую постоянную, плотность и парциальные давления компонентов при давлении смеси $p_{\text{см}} = 0,15$ МПа и температуре $t = 25^\circ\text{C}$.

Ответ: $m_{\text{B}} = 0,8$; $m_{\text{CO}} = 0,2$; $r_{\text{B}} = 0,795$; $r_{\text{CO}} = 0,625$; $p_{\text{B}} = 0,12$ МПа; $p_{\text{CO}} = 0,03$ МПа; $\mu_{\text{см}} = 28,8$; $\rho_{\text{см}} = 1,705 \text{ кг/м}^3$; $R_{\text{см}} = 290 \text{ Дж/(кг} \cdot \text{K)}$.

3.19. Решите предыдущую задачу, если смесь состоит из трех частей водорода и двух частей метана.

Ответ: $m_{\text{H}_2} = 0,158$; $m_{\text{CH}_4} = 0,842$; $r_{\text{H}_2} = 0,6$; $r_{\text{CH}_4} = 0,4$; $p_{\text{H}_2} = 0,09$ МПа; $p_{\text{CH}_4} = 0,06$ МПа; $\mu_{\text{см}} = 7,6$; $\rho_{\text{см}} = 0,455 \text{ кг/м}^3$; $R_{\text{см}} = 1090 \text{ Дж/(кг} \cdot \text{K)}$.

3.20. Смесь азота и углекислого газа при нормальных физических условиях имеет удельный объем $v_{\text{см}} = 0,65 \text{ м}^3/\text{кг}$. Определите объемные и массовые доли компонентов, газовую постоянную и кажущуюся молекулярную массу смеси.

Ответ: $m_{\text{N}_2} = 0,486$; $m_{\text{CO}_2} = 0,514$; $r_{\text{N}_2} = 0,597$; $r_{\text{CO}_2} = 0,403$; $R_{\text{см}} = 242 \text{ Дж/(кг} \cdot \text{K)}$; $\mu_{\text{см}} = 34,4$.

3.21. Газовая смесь состоит из 2 молей углекислоты, 2 молей кислорода и 4 молей азота. Определите объемные и массовые компоненты, газовую постоянную и кажущуюся молекулярную массу смеси.

Ответ: $r_{\text{CO}_2} = 0,25$; $r_{\text{O}_2} = 0,25$; $r_{\text{N}_2} = 0,5$; $m_{\text{CO}_2} = 0,243$; $m_{\text{O}_2} = 0,424$; $m_{\text{N}_2} = 0,333$; $R_{\text{см}} = 252 \text{ Дж}/(\text{кг} \cdot \text{К})$; $\mu_{\text{см}} = 33,0$.

3.22. В цилиндр газового двигателя подается смесь газов, состоящая из $N_{\text{г}} = 1$ моля генераторного газа ($R_{\text{г}} = 315 \text{ Дж}/(\text{кг} \cdot \text{К})$) и $N_{\text{возд}} = 1,3$ моля воздуха. Давление в конце всасывания $p_{\text{см}} = 0,096 \text{ МПа}$, температура смеси $t = 80^\circ\text{C}$. Определить массу смеси, поданной в цилиндр, если диаметр цилиндра $D = 250 \text{ мм}$, ход поршня $H = 340 \text{ мм}$.

Ответ: $M = 0,0154 \text{ кг}$.

3.23. Газовая смесь, состоящая из углекислого газа, азота и кислорода, находится в резервуаре под давлением $p_{\text{см}} = 0,5 \text{ МПа}$ при температуре $t = 40^\circ\text{C}$. Парциальные давления компонентов смеси: $p_{\text{CO}_2} = 0,05 \text{ МПа}$, $p_2 = 0,38 \text{ МПа}$. Определите состав смеси в объемных и массовых долях и плотность смеси.

Ответ: $r_{\text{CO}_2} = 0,10$; $r_{\text{N}_2} = 0,76$; $r_{\text{O}_2} = 0,14$; $m_{\text{CO}_2} = 0,146$; $m_{\text{N}_2} = 0,706$; $m_{\text{O}_2} = 0,148$; $\rho_{\text{см}} = 5,8 \text{ кг}/\text{м}^3$.

3.24. До какого давления по манометру необходимо сжать газовую смесь, состоящую из кислорода массой $M_{\text{O}_2} = 20 \text{ кг}$, азота массой $M_{\text{N}_2} = 58 \text{ кг}$, углекислого газа массой $M_{\text{CO}_2} = 10 \text{ кг}$ и сернистого газа массой $M_{\text{SO}_2} = 2 \text{ кг}$, чтобы парциальное давление кислорода в смеси составило $p_{\text{O}_2} = 0,147 \text{ МПа}$? Каковы парциальные объемы компонентов при температуре смеси $t = 50^\circ\text{C}$? Барометрическое давление воздуха $p_{\text{бар}} = 750 \text{ мм рт. ст.}$

Ответ: $p_{\text{см}} = 0,595 \text{ МПа}$; $V_{\text{O}_2} = 2,42 \text{ м}^3$; $V_{\text{CO}} = 0,88 \text{ м}^3$; $V_{\text{N}_2} = 7,96 \text{ м}^3$; $V_{\text{SO}_2} = 0,12 \text{ м}^3$.

3.25. Определите плотность влажного воздуха, рассматривая его как смесь сухого воздуха и водяного пара, при температуре $t = 25^\circ\text{C}$ и давлении $p = 760 \text{ мм рт. ст.}$, если в объеме $V = 1 \text{ м}^3$ содержится водяной пар массой $V_{\text{H}_2\text{O}} = 8 \text{ г}$. Каково парциальное давление водяного пара во влажном воздухе? Водяной пар в данном случае можно считать идеальным газом.

Ответ: $\rho_{\text{см}} = 1,18 \text{ кг}/\text{м}^3$; $p_{\text{H}_2\text{O}} = 7,3 \text{ мм рт. ст.}$

3.26. В баллоне емкостью $V = 1 \text{ м}^3$ находится воздух при давлении $p_1 = 0,2 \text{ МПа}$ и температуре $t = 20^\circ\text{C}$. Сколько надо накачать в баллон азота, чтобы давление в нем достигло $p_2 = 1,0 \text{ МПа}$ при температуре $t = 20^\circ\text{C}$?

Ответ: $M_{\text{N}_2} = 9 \text{ кг}$.

3.27. Решите предыдущую задачу, если давление в баллоне $p_1 = 0,5 \text{ МПа}$ и температура $t = 60^\circ\text{C}$.

Ответ: $M_{\text{N}_2} = 4,3 \text{ кг}$.

3.28. Газовая смесь, состоящая из азота и кислорода, находится в баллоне под давлением $p = 0,25 \text{ МПа}$ при температуре $t = 27^\circ\text{C}$. Определите состав смеси в массовых долях и парциальные давления компонентов, если плотность смеси при заданных условиях $\rho_{\text{см}} = 2,91 \text{ кг}/\text{м}^3$.

Ответ: $m_{\text{N}_2} = 0,708$; $m_{\text{O}_2} = 0,292$; $p_{\text{N}_2} = 0,177 \text{ МПа}$; $p_{\text{O}_2} = 0,073 \text{ МПа}$.

3.29. Решите предыдущую задачу, если давление в баллоне $p = 0,5$ МПа, температура $t = 117^\circ\text{C}$ и удельный объем $v_{\text{см}} = 0,22$ м³/кг.

Ответ: $m_{\text{N}_2} = 0,6$; $m_{\text{O}_2} = 0,4$; $p_{\text{N}_2} = 0,3$ МПа; $p_{\text{O}_2} = 0,2$ МПа.

3.30. В сосуде объемом $V = 2$ м³ находится воздух массой $M_{\text{возд}} = 5$ кг при температуре $t = 40^\circ\text{C}$. В сосуд введен углекислый газ массой $M_{\text{CO}_2} = 2$ кг. Определите объемные и массовые доли компонентов газовой смеси после введения углекислого газа. Насколько возросло давление в сосуде?

Ответ: $m_{\text{O}_2} = 0,166$; $r_{\text{N}_2} = 0,548$; $m_{\text{CO}_2} = 0,286$; $r_{\text{O}_2} = 0,166$; $r_{\text{N}_2} = 0,626$; $r_{\text{CO}_2} = 0,208$; $\Delta p = 0,06$ МПа.

Указание к выполнению заданию.

Для решения задач нужно воспользоваться лекционным материалом и материалом, приведенным в источнике «Теплотехника. Практикум» под редакцией В. Л. Ерофеева, А. С. Пряхина, с. 30 – 31. Для помощи студенту ниже приводятся примеры решения задач.

Пример 3.1. Дымовые газы, уходящие из котла, имеют следующий состав по объему: $\text{CO}_2 = 14,5\%$; $\text{O}_2 = 4,5\%$; $\text{CO} = 2,0\%$; $\text{N}_2 = 79\%$.

Определите массовые доли, газовую постоянную, кажущуюся молекулярную массу и плотность дымовых газов при температуре $t = 220^\circ\text{C}$ и давлении $p = 716$ мм рт. ст.

Решение. Определяем кажущуюся молекулярную массу смеси по формуле

$$\mu_{\text{см}} = \sum(\mu_i r_i) = 44 \cdot 0,145 + 32 \cdot 0,045 + 28 \cdot 0,02 + 28 \cdot 0,79 = 30,5.$$

Определяем массовый состав дымовых газов:

$$m_{\text{CO}_2} = r_{\text{CO}_2} \frac{\mu_{\text{CO}_2}}{\sum(\mu_i r_i)} = 0,145 \cdot \frac{44}{30,5} = 0,209;$$

$$m_{\text{O}_2} = r_{\text{O}_2} \frac{\mu_{\text{O}_2}}{\sum(\mu_i r_i)} = 0,045 \cdot \frac{32}{30,5} = 0,047;$$

$$m_{\text{CO}} = r_{\text{CO}} \frac{\mu_{\text{CO}}}{\sum(\mu_i r_i)} = 0,02 \cdot \frac{28}{30,5} = 0,018;$$

$$m_{\text{N}_2} = r_{\text{N}_2} \frac{\mu_{\text{N}_2}}{\sum(\mu_i r_i)} = 0,79 \cdot \frac{28}{30,5} = 0,726.$$

Проверка:

$$m_{\text{CO}_2} + m_{\text{O}_2} + m_{\text{CO}} + m_{\text{N}_2} = 0,209 + 0,047 + 0,018 + 0,726 = 1,0.$$

Газовая постоянная дымовых газов определяется из уравнения

$$R_{\text{см}} = \frac{8314}{\mu_{\text{см}}} = \frac{8314}{30,5} = 273 \text{ (Дж/(кг} \cdot \text{K))}.$$

Плотность дымовых газов находим по формуле

$$\rho_{\text{см}} = \frac{p_{\text{см}}}{R_{\text{см}} T},$$

где $p_{\text{см}}$ — давление смеси, Па;

$$p_{\text{см}} = \frac{716 \cdot 1 \cdot 10^5}{750} = 0,96 \cdot 10^5 \text{ (Па)}.$$

$$\rho_{\text{см}} = \frac{0,96 \cdot 10^5}{273 \cdot 493} = 0,710 \text{ (кг/м}^3\text{)}.$$

Ответ: $m_{\text{CO}_2} = 0,209$; $m_{\text{O}_2} = 0,047$; $m_{\text{CO}} = 0,018$; $m_{\text{N}_2} = 0,726$; $R_{\text{см}} = 273 \text{ Дж/(кг} \cdot \text{К)}$; $\mu_{\text{см}} = 30,5$; $\rho_{\text{см}} = 0,710 \text{ кг/м}^3$.

Пример 3.2. Сухой генераторный газ из антрацита состоит из $N_{\text{CO}_2} = 12$ молей углекислого газа, $N_{\text{CO}} = 64$ молей окиси углерода, $N_{\text{H}_2} = 24$ молей водорода и $N_{\text{N}_2} = 120$ молей азота. Определите объемные и массовые доли и парциальные объемы компонентов при температуре $t = 27^\circ\text{C}$ и давлении $p = 0,118 \text{ МПа}$.

Решение. Число молей смеси определяется как сумма чисел молей компонентов:

$$N_{\text{см}} = N_{\text{CO}_2} + N_{\text{CO}} + N_{\text{H}_2} + N_{\text{N}_2} = 12 + 64 + 24 + 120 = 220.$$

Объемный состав генераторного газа:

$$r_{\text{CO}_2} = \frac{N_{\text{CO}_2}}{N_{\text{см}}} = \frac{12}{220} = 0,055;$$

$$r_{\text{CO}} = \frac{N_{\text{CO}}}{N_{\text{см}}} = \frac{64}{220} = 0,291;$$

$$r_{\text{H}_2} = \frac{N_{\text{H}_2}}{N_{\text{см}}} = \frac{24}{220} = 0,109;$$

$$r_{\text{N}_2} = \frac{N_{\text{N}_2}}{N_{\text{см}}} = \frac{120}{220} = 0,545.$$

Кажущаяся молекулярная масса смеси

$$\mu_{\text{см}} = \sum r_i \mu_i = 0,055 \cdot 44 + 0,291 \cdot 28 + 0,109 \cdot 2,016 + 0,545 \cdot 28 = 26,15.$$

Массовый состав генераторного газа:

$$m_{\text{CO}_2} = r_{\text{CO}_2} \frac{\mu_{\text{CO}_2}}{\sum (\mu_i r_i)} = 0,055 \cdot \frac{44}{26,15} = 0,096;$$

$$m_{\text{CO}} = r_{\text{CO}} \frac{\mu_{\text{CO}}}{\sum (\mu_i r_i)} = 0,291 \cdot \frac{28}{26,15} = 0,312;$$

$$m_{\text{H}_2} = r_{\text{H}_2} \frac{\mu_{\text{H}_2}}{\sum (\mu_i r_i)} = 0,109 \cdot \frac{2,016}{26,15} = 0,008;$$

$$m_{\text{N}_2} = r_{\text{N}_2} \frac{\mu_{\text{N}_2}}{\sum (\mu_i r_i)} = 0,545 \cdot \frac{28}{26,15} = 0,584.$$

Парциальные объемы компонентов смеси определяются из уравнения

$$p_{\text{см}} V_i = 8314 N_i T,$$

откуда

$$V_i = \frac{8314 N_i T}{p_{\text{см}}}.$$

Таким образом, получаем

$$V_{\text{CO}_2} = \frac{8314 N_{\text{CO}_2} T}{p_{\text{см}}} = \frac{8314 \cdot 12 \cdot 300}{1,18 \cdot 10^5} = 254 \text{ (м}^3\text{)};$$

$$V_{\text{CO}} = \frac{8314 N_{\text{CO}} T}{p_{\text{см}}} = \frac{8314 \cdot 64 \cdot 300}{1,18 \cdot 10^5} = 1360 \text{ (м}^3\text{)};$$

$$V_{\text{H}_2} = \frac{8314 N_{\text{H}_2} T}{p_{\text{см}}} = \frac{8314 \cdot 24 \cdot 300}{1,18 \cdot 10^5} = 508 \text{ (м}^3\text{)};$$

$$V_{\text{N}_2} = \frac{8314 N_{\text{N}_2} T}{p_{\text{см}}} = \frac{8314 \cdot 120 \cdot 300}{1,18 \cdot 10^5} = 2540 \text{ (м}^3\text{)}.$$

Ответ: $r_{\text{CO}_2} = 0,055$; $r_{\text{CO}} = 0,291$; $r_{\text{H}_2} = 0,109$; $r_{\text{N}_2} = 0,545$; $m_{\text{CO}_2} = 0,096$; $m_{\text{CO}} = 0,312$; $m_{\text{H}_2} = 0,008$; $m_{\text{N}_2} = 0,584$; $V_{\text{CO}_2} = 254 \text{ м}^3$; $V_{\text{CO}} = 1360 \text{ м}^3$; $V_{\text{H}_2} = 508 \text{ м}^3$; $V_{\text{N}_2} = 2540 \text{ м}^3$.

Пример 3.3. В сосуде находится смесь кислорода и азота при температуре $t = 50^\circ\text{C}$. Плотность кислорода в смеси $\rho = 1,81 \text{ кг/м}^3$. Определите плотность смеси газов и давление, под которым находится смесь, если ее объемный состав следующий: $r_{\text{O}_2} = 0,6$; $r_{\text{N}_2} = 0,4$.

Решение. Парциальное давление кислорода

$$p_{\text{O}_2} = \rho_{\text{O}_2} R_{\text{O}_2} T = 1,81 \cdot 259,8 \cdot 323 \cdot 10^{-5} = 1,52 \cdot 10^{-5} \text{ (МПа)}.$$

Давление смеси

$$p_{\text{см}} = \frac{p_{\text{O}_2}}{r_{\text{O}_2}} = \frac{1,52 \cdot 10^{-5}}{0,6} = 2,54 \cdot 10^{-5} \text{ (МПа)}.$$

Кажущаяся молекулярная масса смеси

$$\mu_{\text{см}} = \sum(r_i \mu_i) = r_{\text{O}_2} \mu_{\text{O}_2} + r_{\text{N}_2} \mu_{\text{N}_2} = 0,6 \cdot 32 + 0,4 \cdot 28 = 30,4.$$

Газовая постоянная смеси

$$R_{\text{см}} = \frac{8314}{\mu_{\text{см}}} = \frac{8314}{30,4} = 273,5 \text{ (Дж/(кг} \cdot \text{К))}.$$

Плотность смеси

$$\rho_{\text{см}} = \frac{p}{R_{\text{см}} T} \frac{2,54 \cdot 10^{-5}}{273,5 \cdot 323} = 2,88 \text{ (кг/м}^3\text{)}.$$

Ответ: $\rho_{\text{см}} = 2,88 \text{ кг/м}^3$; $p_{\text{см}} = 2,54 \cdot 10^{-5} \text{ МПа}$.

Пример 3.4. Газовая смесь, состоящая из двух компонентов, находится в сосуде объемом $V = 2 \text{ м}^3$ под давлением $p = 0,5 \text{ МПа}$ при температуре $t = 17^\circ\text{C}$. Определите массу смеси в сосуде. Определите также, из каких компонентов состоит смесь, если одним из компонентов является окись углерода. Парциальное давление окиси углерода $p_{\text{CO}} = 0,3 \text{ МПа}$. Кажущаяся молекулярная масса смеси $\mu_{\text{см}} = 17,6$.

Решение. Газовая постоянная смеси

$$R_{\text{см}} = \frac{8314}{\mu_{\text{см}}} = \frac{8314}{17,6} = 472,3 \text{ (Дж/(кг} \cdot \text{К))}.$$

Парциальное давление неизвестного газа

$$p_x = p_{\text{см}} - p_{\text{CO}} = 0,5 - 0,3 = 0,2 \text{ (МПа)}.$$

Объемные доли компонентов:

$$r_{\text{CO}} = \frac{p_{\text{CO}}}{p_{\text{см}}} = \frac{0,3}{0,5} = 0,6;$$

$$r_x = \frac{p_x}{p_{\text{см}}} = \frac{0,2}{0,5} = 0,4.$$

Молекулярная масса неизвестного газа

$$\mu_x = \frac{\mu_{\text{см}} - r_{\text{CO}}\mu_{\text{CO}}}{r_x} = \frac{17,6 - 0,6 \cdot 28}{0,4} = 2,0.$$

По значению молекулярной массы $\mu_x = 2,0$ определяем, что вторым компонентом является водород.

Масса смеси газов

$$M = \frac{p_{\text{см}} V_{\text{см}}}{R_{\text{см}} T} = \frac{5 \cdot 10^{-5} \cdot 2}{472,3 \cdot 290} = 7,3 \text{ (кг)}.$$

Ответ: $M = 7,3$ кг; смесь $\text{CO} + \text{H}_2$.

Занятие 4 (2 ч.) Тема «Теплоемкость газов и их смесей»

Задание. Решение задач.

4.1. Определите объемную теплоемкость азота при постоянном давлении, считая ее не зависящей от температуры.

Ответ: $c'_p = 1,2987 \text{ кДж/(м}^3 \cdot \text{К)}$.

4.2. Вычислите среднюю массовую теплоемкость кислорода в интервале температур от $t_1 = 500^\circ\text{C}$ до $t_2 = 1000^\circ\text{C}$ при постоянном объеме, считая зависимость теплоемкости от температуры криволинейной. Определите относительную погрешность, если считать теплоемкость не зависящей от температуры.

Ответ: $c_p = 0,8301 \text{ кДж/(кг} \cdot \text{К)}$; $\delta = 21,2\%$.

4.3. Вычислите среднюю массовую и среднюю объемную теплоемкости окиси углерода при постоянном объеме в интервале температур от $t_1 = 0^\circ\text{C}$ до $t_2 = 1200^\circ\text{C}$, если известно, что для окиси углерода $(\mu c_{pm})_0^{1200} = 32,192 \text{ кДж/(кмоль} \cdot \text{К)}$. Сопоставьте полученные результаты с данными прил. 4.

Ответ: $(c_{vm})_0^{1200} = 0,8566 \text{ кДж/(кмоль} \cdot \text{К)}$; $(c'_{pm})_0^{1200} = 1,0659 \text{ кДж/(м}^3 \cdot \text{К)}$.

4.4. Воспользовавшись формулой для линейной зависимости от температуры изобарной молярной теплоемкости азота, определите истинную массовую изобарную теплоемкость при температуре $t = 1000^\circ\text{C}$. Сравните полученное значение с табличным.

Ответ: $c_p = 1,1101 \text{ кДж/(кг} \cdot \text{К)}$.

4.5. Найдите объемную изохорную теплоемкость окиси углерода, считая ее не зависящей от температуры.

Ответ: $c_v = 0,9260 \text{ кДж/(м}^3 \cdot \text{К)}$.

4.6. Найдите изобарную массовую теплоемкость газа, если известна его газовая постоянная $R = 208,2 \text{ Дж/(кг} \cdot \text{К)}$ и изохорная молярная теплоемкость $\mu c_p = 12,55 \text{ кДж/(кмоль} \cdot \text{К)}$.

Ответ: $c_p = 0,522 \text{ кДж/(кг} \cdot \text{К)}$.

4.7. Вычислите значение истинной мольной теплоемкости кислорода при постоянном давлении для температуры $t = 1000^\circ\text{C}$, считая зависимость теплоемкости от температуры линейной. Найдите относительную погрешность по сравнению с табличными данными.

Ответ: $\mu_{c_p} = 36,55 \text{ кДж}/(\text{кмоль} \cdot \text{K})$; $\delta = 1,79\%$.

4.8. Определите среднюю массовую теплоемкость водяного пара при постоянном давлении в интервале температур $t_1 = 200^\circ\text{C}$ до $t_2 = 1000^\circ\text{C}$, считая зависимость теплоемкости от температуры: а) прямолинейной; б) криволинейной. Определите относительную погрешность.

Ответ: а) $c'_p = 2,261 \text{ кДж}/(\text{кг} \cdot \text{K})$; б) $c'_p = 2,276 \text{ кДж}/(\text{кг} \cdot \text{K})$; $\delta = 0,66\%$.

4.9. Используя формулу для средней мольной изобарной теплоемкости воздуха $\overline{\mu c_p}$, выведите зависимость объемной изохорной истинной теплоемкости от температуры и определите ее значение при $t = 1000^\circ\text{C}$.

Ответ: $\bar{c}_v = 0,915 + 0,0001209t$; $\bar{c}_v = 1,0359 \text{ кДж}/(\text{м}^3 \cdot \text{K})$.

4.10. Определите среднюю объемную теплоемкость окиси углерода в интервале температур от $t_1 = 300^\circ\text{C}$ до $t_2 = 900^\circ\text{C}$ при постоянном давлении, считая зависимость теплоемкости от температуры криволинейной. Вычислите погрешность определения теплоемкости, если: а) зависимость теплоемкости от температуры прямолинейная; б) теплоемкость не зависит от температуры.

Ответ: $\bar{c}'_p = 1,446 \text{ кДж}/(\text{м}^3 \cdot \text{K})$; а) $\delta = -0,12\%$; б) $\delta = 10,2\%$.

4.11. Определите среднюю массовую теплоемкость кислорода при постоянном давлении в интервале температур от $t_1 = 350^\circ\text{C}$ до $t_2 = 1000^\circ\text{C}$, считая зависимость теплоемкости от температуры: а) криволинейной; б) прямолинейной.

Ответ: а) $\bar{c}_p = 1,077 \text{ кДж}/(\text{кг} \cdot \text{K})$; б) $\bar{c}_p = 1,085 \text{ кДж}/(\text{кг} \cdot \text{K})$.

4.12. Найдите изобарную объемную теплоемкость и изохорную массовую теплоемкости аммиака, если задана его газовая постоянная $R = 488,3 \text{ кДж}/(\text{кг} \cdot \text{K})$.

Ответ: $\bar{c}_p = 1,511 \text{ кДж}/(\text{м}^3 \cdot \text{K})$; $c_v = 1,467 \text{ кДж}/(\text{кг} \cdot \text{K})$.

4.13. Определите среднюю изохорную массовую теплоемкость смеси газов в интервале температур от $t_1 = 0^\circ\text{C}$ до $t_2 = 300^\circ\text{C}$, считая зависимость теплоемкости от температуры криволинейной, если дан следующий объемный состав смеси: $r_{\text{CO}_2} = 0,13$; $r_{\text{O}_2} = 0,043$; $r_{\text{CO}} = 0,007$; $r_{\text{N}_2} = 0,82$.

Ответ: $\bar{c}'_v = 0,8122 \text{ кДж}/(\text{кг} \cdot \text{K})$.

4.14. Анализ продуктов сгорания топлива, произведенный с помощью химического газоанализатора, показал их следующий состав: $r_{\text{CO}_2} = 12,3\%$; $r_{\text{O}_2} = 7,2\%$; $r_{\text{N}_2} = 80,5\%$. Определите истинную изобарную теплоемкость 1 кмоль смеси при температуре $t = 600^\circ\text{C}$.

Ответ: $(\mu c_p)_{\text{см}} = 34,49 \text{ кДж}/(\text{кмоль} \cdot \text{K})$.

4.15. Для условий предыдущей задачи определите молярную изохорную теплоемкость продуктов сгорания.

Ответ: $(\mu c_v)_{\text{см}} = 26,18 \text{ кДж}/(\text{кмоль} \cdot \text{K})$.

4.16. Выхлопные газы двигателя внутреннего сгорания поступают в газосход утилизационного котла, имея температуру $t_1 = 500^\circ\text{C}$. Температура газов в котле уменьшается до $t_2 = 200^\circ\text{C}$. Объемный состав газов: $r_{\text{CO}_2} = 11\%$; $r_{\text{O}_2} = 6\%$; $r_{\text{H}_2\text{O}} = 8\%$; $r_{\text{N}_2} = 75\%$. Определите количество теплоты, отдаваемой выхлопными газами в течение 1 ч, если расход газа $M_{\text{г}} = 1,7 \text{ кг/с}$. Процесс передачи теплоты изобарный.

Ответ: $Q = 1\,251\,000 \text{ кДж/ч}$.

4.17. Вычислите количество теплоты, необходимой для изобарного подогрева воздуха массой $M_{\text{возд}} = 1 \text{ кг}$ от $t_1 = 300^\circ\text{C}$ до $t_2 = 1000^\circ\text{C}$, если считать зависимость теплоемкости от температуры: а) криволинейной; б) прямолинейной; в) не зависящей от температуры.

Ответ: а) $q = 785,5 \text{ кДж/кг}$; б) $q = 780,0 \text{ кДж/кг}$; в) $q = 702,0 \text{ кДж/кг}$.

4.18. Через воздухонагреватель, установленный на паровом котле, при нормальных физических условиях проходит воздух, часовой расход которого составляет $V_{\text{тв}} = 4500 \text{ м}^3/\text{ч}$. Температура воздуха на входе в воздухоподогреватель $t_{\text{в1}} = 20^\circ\text{C}$, на выходе $t_{\text{в2}} = 200^\circ\text{C}$. Определите расход газа, отдающего теплоту, если его температура уменьшается от $t_{\text{г1}} = 400^\circ\text{C}$ до $t_{\text{г2}} = 200^\circ\text{C}$, а объемный состав газов следующий: $r_{\text{CO}_2} = 12\%$; $r_{\text{O}_2} = 7\%$; $r_{\text{H}_2\text{O}} = 7\%$; $r_{\text{N}_2} = 74\%$. Давления газов и воздуха остаются неизменными.

Ответ: $V_{\text{г}} = 3900 \text{ м}^3/\text{ч}$.

4.19. Продукты сгорания бензина массой $M = 1 \text{ кг}$ имеют следующий состав: $N_1 = 0,464$ моля двухатомных газов, $N_2 = 0,071$ моля углекислого газа и $N_3 = 0,75$ моля паров воды. Определите среднюю молярную изохорную теплоемкость продуктов сгорания в интервале температур от $t_1 = 0^\circ\text{C}$ до $t_2 = 1500^\circ\text{C}$. Теплоемкость двухатомных газов принять равной теплоемкости азота.

Ответ: $\overline{\mu c_v} = 27,6 \text{ кДж/(кмоль} \cdot \text{K)}$.

4.20. В газовыхлопной тракт двигателей внутреннего сгорания судов на подводных крыльях подают воду с целью уменьшения температуры отработавших газов. Какое количество воды испарится при снижении температуры выпускных газов от $t_1 = 380^\circ\text{C}$ до $t_2 = 8^\circ\text{C}$, если для испарения воды массой $M = 1 \text{ кг}$ необходимо подвести теплоту $Q = 2260 \text{ кДж}$? Расход выхлопных газов $M_{\text{г}} = 1,5 \text{ кг/с}$, объемный состав по результатам газового анализа следующий: $r_{\text{CO}_2} = 0,13$; $r_{\text{O}_2} = 0,043$; $r_{\text{CO}} = 0,007$; $r_{\text{H}_2\text{O}} = 0,02$; $r_{\text{N}_2} = 0,80$. Процесс от-

вода теплоты происходит при постоянном давлении. Зависимость теплоемкости от температуры принять криволинейной.

Ответ: $M_{\text{воды}} = 76,5 \text{ кг/ч}$.

4.21. Баллон с кислородом массой $M = 5 \text{ кг}$ находился в помещении с температурой $t_1 = 20^\circ\text{C}$. При подведении теплоты температура кислорода повысилась до $t_2 = 380^\circ\text{C}$. Определите количество подведенной теплоты, считая зависимость теплоемкости от температуры криволинейной. До какого значения повысится температура кислорода в баллоне при подведении этого количества теплоты, если зависимость теплоемкости от температуры считать линейной?

Ответ: $Q = 1269 \text{ кДж}$; $t'_2 = 380,4^\circ\text{C}$.

4.22. Азот объемом $V = 0,4 \text{ м}^3$ нагревают от температуры $t_1 = 20^\circ\text{C}$ до температуры $t_2 = 470^\circ\text{C}$ при давлении $p = 0,245 \text{ МПа}$. Определите количество теплоты, затраченной на нагревание азота, считая зависимость теплоемкости от температуры криволинейной. Определите также погрешность при определении количества теплоты, если принять теплоемкость постоянной.

Ответ: $Q = 543,0 \text{ кДж}$; $Q' = 528,1 \text{ кДж}$; $\delta = -2,7\%$.

4.23. Углекислый газ объемом $V = 2,55 \text{ м}^3$ нагревают при давлении $p = 0,3 \text{ МПа}$ от температуры $t_1 = 20^\circ\text{C}$ до температуры $t_2 = 680^\circ\text{C}$. Определите количество теплоты, затраченной на нагревание, считая зависимость теплоемкости от температуры криволинейной. Определите также, до какой величины повысится температура газа при подводе того же количества теплоты, если считать теплоемкость: а) не зависящей от температуры; б) зависящей от температуры прямолинейно.

Ответ: $Q = 9360 \text{ кДж}$; а) $t'_2 = 884^\circ\text{C}$; б) $t'_2 = 697^\circ\text{C}$.

4.24. Решите предыдущую задачу при изохорном подводе теплоты.

Ответ: $Q = 7700 \text{ кДж}$; а) $t'_2 = 945^\circ\text{C}$; б) $t'_2 = 700^\circ\text{C}$.

4.25. Топочные газы поступают в газоход котла при температуре $t_1 = 1200^\circ\text{C}$, а выходят при температуре $t_2 = 700^\circ\text{C}$. Анализ продуктов сгорания, произведенный с помощью газоанализатора, показал следующий состав топочных газов: $r_{\text{CO}_2} = 12\%$; $r_{\text{O}_2} = 5\%$; $r_{\text{CO}} = 3\%$; $r_{\text{H}_2\text{O}} = 6\%$; $r_{\text{N}_2} = 74\%$. Определите количество теплоты, теряемой топочными газами объемом $V = 1 \text{ м}^3$ при нормальных физических условиях, считая зависимость теплоемкости от температуры криволинейной.

Ответ: $Q = 831,5 \text{ кДж/м}^3$.

4.26. Для условий предыдущей задачи вычислите погрешность при определении количества теплоты, теряемой при нормальных физических условиях топочными газами объемом $V = 1 \text{ м}^3$, если принять: а) зависимость теплоемкости от температуры прямолинейной; б) теплоемкость постоянной.

Ответ: а) $\delta = -0,75\%$; б) $\delta = 29,5\%$.

4.27. В составе топочных газов имеется азот, объемная доля которого $r_{\text{N}_2} = 0,75$. Количество теплоты, отдаваемой азотом в течение часа, составляет $Q = 1\,675\,000 \text{ кДж/ч}$. Температура топочных газов $t_r = 360^\circ\text{C}$, температура окружающей среды $t_0 = 20^\circ\text{C}$. Определите объемный расход топочных га-

зов, принимая теплоемкость: а) не зависящей от температуры; б) зависящей от температуры линейно; в) зависящей от температуры прямолинейно.

Ответ: а) $V_{\text{см}} = 5060 \text{ м}^3/\text{ч}$; б) $V_{\text{см}} = 5000 \text{ м}^3/\text{ч}$; в) $V_{\text{см}} = 4920 \text{ м}^3/\text{ч}$.

4.28. В идеальном компрессорном двигателе внутреннего сгорания подвод теплоты производится в процессе при постоянном давлении. При этом температура рабочего тела повышается от $t_1 = 350^\circ\text{C}$ до $t_2 = 1000^\circ\text{C}$. Расход рабочего тела $M_t = 0,5 \text{ кг/с}$, теплота сгорания топлива $Q_{\text{н}}^p = 41\,868 \text{ кДж/кг}$. Рабочее тело обладает свойствами воздуха. Определите часовой расход топлива, считая теплоемкость зависящей от температуры криволинейно. Установите погрешность вычислений часового расхода топлива в случае: а) линейной зависимости теплоемкости от температуры; б) постоянной теплоемкости.

Ответ: $B = 31,6 \text{ кг/ч}$; а) $\delta = 1,27\%$; б) $\delta = 11,1\%$.

4.29. Решите предыдущую задачу, считая процесс подвода теплоты изохорным.

Ответ: $B = 23,5 \text{ кг/ч}$; а) $\delta = 1,27\%$; б) $\delta = 14,9\%$.

4.30. В результате сжатия воздуха в первой ступени компрессора его температура повысилась от $t_1 = 20^\circ\text{C}$ до $t_2 = 260^\circ\text{C}$. В промежуточном холодильнике воздух изобарно охлаждается до первоначальной температуры, передавая теплоту охлаждающей воде, температура которой повышается на $\Delta t = 25^\circ\text{C}$. Определите часовой расход воды, если производительность компрессора при нормальных физических условиях $V_{\text{т}}^{\text{н}} = 650 \text{ м}^3/\text{ч}$. Зависимость теплоемкости от температуры принять прямолинейной. Теплоемкость воды $\rho_{\text{ж}} = 4,19 \text{ кДж}/(\text{кг} \cdot \text{K})$.

Ответ: $M = 1980 \text{ кг/ч}$.

Указание к выполнению заданию.

Для решения задач нужно воспользоваться лекционным материалом и материалом, приведенным в источнике «Теплотехника. Практикум» под редакцией В. Л. Ерофеева, А. С. Пряхина, с. 39 – 42. Для помощи студенту ниже приводятся примеры решения задач.

Пример 4.1. Определите значение объемной теплоемкости гелия при постоянном объеме, считая, что теплоемкость газа не зависит от температуры.

Решение. Для одноатомных газов $\mu c_v = 12,477 \text{ кДж}/(\text{кмоль} \cdot \text{K})$.

Следовательно,

$$c'_v = \frac{\mu c_v}{V_{\mu}} = \frac{12,477}{22,4} = 0,556 \text{ (кДж}/(\text{м}^3 \cdot \text{K})).$$

Ответ: $c'_v = 0,556 \text{ кДж}/(\text{м}^3 \cdot \text{K})$.

Пример 4.2. Определите количество теплоты, отдаваемой дымовым газом массой $M = 1$ кг при его изобарном охлаждении от $t_1 = 1300^\circ\text{C}$ до $t_2 = 300^\circ\text{C}$. Массовый состав газа: $m_{\text{CO}_2} = 18\%$; $m_{\text{O}_2} = 7\%$; $m_{\text{N}_2} = 74\%$; $m_{\text{H}_2\text{O}} = 1\%$. При расчете принять криволинейную зависимость теплоемкости от температуры.

Решение. Определяем количество теплоты по формуле

$$q = (\bar{c}_{p2})_{\text{см}} t_2 - (\bar{c}_{p1})_{\text{см}} t_1,$$

где $(\bar{c}_{p1})_{\text{см}}$ и $(\bar{c}_{p2})_{\text{см}}$ — средние массовые теплоемкости смеси газов соответственно в интервале температур от $t_1 = 0^\circ\text{C}$ до $t_2 = 300^\circ\text{C}$ и от $t_1 = 0^\circ\text{C}$ до $t_3 = 1300^\circ\text{C}$.

Теплоемкость смеси газов в интервале температур от 0 до 300°C

$$(\bar{c}_{p1})_{\text{см}} = \sum(m_i \bar{c}_{pi}) = 0,18 \cdot 0,9487 + 0,07 \cdot 0,9500 + 0,74 \cdot 1,0488 + \\ + 0,01 \cdot 1,9192 = 1,2074 \text{ (кДж/(кг} \cdot \text{K))}.$$

Теплоемкость смеси газов в интервале температур от 0 до 1300°C

$$(\bar{c}_{p2})_{\text{см}} = \sum(m_i \bar{c}_{pi}) = 0,18 \cdot 1,166 + 0,07 \cdot 1,0680 + 0,74 \cdot 1,1447 + \\ + 0,01 \cdot 2,2429 = 1,3528 \text{ (кДж/(кг} \cdot \text{K))}.$$

Количество отданной теплоты

$$|q| = 1,3528 \cdot 1300 - 1,2074 \cdot 300 = 1396 \text{ (кДж/кг)}.$$

Ответ: $|q| = 1396$ кДж/кг.

Пример 4.3. Используя формулу для средней молярной изобарной теплоемкости кислорода, найдите истинную изохорную массовую теплоемкость при 1000°C .

Решение. Если средняя молярная изобарная теплоемкость

$$\bar{\mu}c_p = 29,2080 + 0,0040717t,$$

то истинная изобарная теплоемкость будет

$$\mu c_p = 29,2080 + 0,0081434t.$$

Пользуясь формулой для теплоемкости, кДж/(кмоль $\cdot$ K),

$$\mu c_v = \mu c_p - 8,314 = 20,8940 + 0,0081434t,$$

найдем теплоемкость, кДж/(кг $\cdot$ K),

$$c_v = \frac{\mu c_v}{\mu} = \frac{20,8940 + 0,008143t}{3} = 0,6529 + 0,0002545t.$$

При $t = 1000^\circ\text{C}$ получим $c = 0,9074$ кДж/(кг $\cdot$ K).

Ответ: $c = 0,9074$ кДж/(кг $\cdot$ K).

Пример 4.4. В закрытом сосуде объемом $V = 100$ л находится воздух при давлении $p_1 = 0,5$ МПа и температуре $t_1 = 10^\circ\text{C}$. Какое количество теплоты необходимо подвести, чтобы температура воздуха поднялась до $t_2 = 200^\circ\text{C}$? Решите задачу, принимая теплоемкость воздуха постоянной, а также учи-

тая линейную зависимость теплоемкости от температуры. Определите относительную ошибку, получаемую в первом случае.

Решение. Определяем массу воздуха, находящегося в сосуде:

$$M = \frac{Vp}{RT} = \frac{100 \cdot 0,5 \cdot 10^6}{287 \cdot 283} = 0,616 \text{ (кг)}.$$

Считая теплоемкость постоянной, для двухатомных газов

$$\mu c_v = 20,93 \text{ кДж/(кг} \cdot \text{К)}.$$

Массовая изохорная теплоемкость воздуха

$$c_v = \frac{\mu c_v}{\mu} = \frac{20,93}{28,96} = 0,7226 \text{ (кДж/(кг} \cdot \text{К))}.$$

Количество подведенной теплоты

$$Q = Mc_v(t_2 - t_1) = 0,616 \cdot 0,7226 \cdot (200 - 10) = 84,6 \text{ (кДж)}.$$

Теплоемкость воздуха с учетом линейной зависимости теплоемкости от температуры (см. табл. 4.3)

$$\begin{aligned} \bar{c}_v &= 0,7084 + 0,00009349t = \\ &= 0,7084 + 0,00009349 \cdot (10 + 200) = 0,728033 \text{ (кДж/(кг} \cdot \text{К))}. \end{aligned}$$

Относительная ошибка

$$\delta = \frac{c_v - \bar{c}_v}{c_v} = \frac{0,7226 - 0,7280}{0,7226} = -0,007,$$

или

$$\delta = -0,7\%.$$

Ответ: $Q = 84,6 \text{ кДж}$; $\delta = -0,007$, или $\delta = -0,7\%$.

Занятие 5 (2 ч.) Тема «Первое начало термодинамики для закрытой и открытой систем»

Задание. Решение задач.

5.1. Пассажирский поезд, совершающий рейсы между Москвой и Санкт-Петербургом (расстояние — около 650 км), идет со средней скоростью 100 км/ч. Мощность энергетической установки $N = 1850 \text{ кВт}$, ее КПД $\eta_e = 30\%$. Какое количество топлива необходимо взять на тепловоз, чтобы его хватило на весь рейс? Теплота сгорания топлива $Q_n^p = 41\,800 \text{ кДж/кг}$.

Ответ: $M = 3462 \text{ кг}$.

5.2. При стендовых испытаниях двигателя внутреннего сгорания его приходится затормаживать. Для этого используется гидротормоз. Во избежание нагрева тормозного устройства его охлаждают водой. Определите, какая доля тепла уносится с охлаждающей водой, если мощность двигателя $N = 220 \text{ кВт}$, часовой расход воды $B = 3000 \text{ кг/ч}$. Теплоемкость воды $c_w =$

$= 4,186 \text{ кДж}/(\text{кг} \cdot \text{К})$. Начальная температура воды $t_1 = 15^\circ\text{C}$, конечная — $t_2 = 60^\circ\text{C}$.

Ответ: 71%.

5.3. Поезд массой $M = 2000 \text{ т}$ останавливается под действием тормозов при скорости 72 км/ч . Определите, какое количество теплоты выделилось при остановке поезда.

Ответ: $Q = 400 \cdot 10^3 \text{ кДж}$.

5.4. Определите КПД двигателя мощностью $N = 37 \text{ кВт}$, если расход бензина на 1 км пути составляет 320 г при скорости 40 км/ч . Теплота сгорания бензина $Q_{\text{н}}^{\text{р}} = 43\,000 \text{ кДж/кг}$.

Ответ: $\eta_e = 0,242$.

5.5. Двигателем автомобиля при скорости движения 50 км/ч расходует-ся на 1 км пути 500 г бензина. Определите мощность, развиваемую двигате-лем, если его КПД $\eta_e = 28\%$.

Ответ: $N = 81,5 \text{ кВт}$.

5.6. Определите количество воды, необходимое для охлаждения цилинд-ра двигателя внутреннего сгорания, если цилиндровая мощность $N = 73,5 \text{ кВт}$, КПД двигателя $\eta_e = 0,38$, относительная потеря теплоты с охлаждающей во-дой в тепловом балансе двигателя составляет $q_{\text{в}} = 0,28$. Температура охлаж-дающей воды на входе $t_1 = 15^\circ\text{C}$, на выходе $t_2 = 60^\circ\text{C}$. Теплоемкость воды $c_{\text{в}} = 4,186 \text{ кДж}/(\text{кг} \cdot \text{К})$.

Ответ: $M = 1035 \text{ кг/ч}$.

5.7. При испытании двигателя внутреннего сгорания было найдено, что удельный эффективный расход топлива $g_e = 231 \text{ г}/(\text{кВт} \cdot \text{ч})$. Определите эф-фективный КПД этого двигателя, если теплота сгорания топлива $Q_{\text{н}}^{\text{р}} = 41\,000 \text{ кДж/кг}$.

Ответ: $\eta_e = 0,38$.

5.8. В котельной электростанции за время $\tau = 10 \text{ ч}$ сожжено $M = 100 \text{ т}$ ка-менного угля с теплотой сгорания $Q_{\text{н}}^{\text{р}} = 29\,300 \text{ кДж/кг}$. Найдите количест-во выработанной тепловой энергии ($\text{кВт} \cdot \text{ч}$) и среднюю мощность станции, если КПД процесса преобразования тепловой энергии в электрическую со-ставляет $\eta = 20\%$.

Ответ: $Q = 8,145 \cdot 10^5 \text{ кВт} \cdot \text{ч}$; $N_{\text{эл}} = 16,29 \cdot 10^3 \text{ кВт}$.

5.9. За какое время объем воды $V = 2,5 \text{ л}$ нагреется до температуры ки-пения с помощью электрического кипятильника мощностью $N = 450 \text{ Вт}$? Теплообмен с внешней средой отсутствует. Начальная температура воды $t_1 = 20^\circ\text{C}$. Теплоемкость воды $c_{\text{в}} = 4,186 \text{ кДж}/(\text{кг} \cdot \text{К})$.

Ответ: $\tau = 31 \text{ мин}$.

5.10. Для нагревания воды объемом $V = 3 \text{ л}$ от температуры $t_1 = 10^\circ\text{C}$ до температуры $t_2 = 80^\circ\text{C}$ расходуется электроэнергия $Q = 1 \text{ кВт} \cdot \text{ч}$. Опре-делите долю потерь теплоты во внешнюю среду. Теплоемкость воды $c_{\text{в}} = 4,186 \text{ кДж}/(\text{кг} \cdot \text{К})$.

Ответ: $\eta_{\text{пот}} = 75,5\%$.

5.11. В газовой плите расход газа с теплотой сгорания $Q_p = 41\,800$ кДж/кг составляет $B = 6$ г/мин. За какое время можно нагреть объем воды $V = 5$ л до температуры кипения, если КПД плиты $\eta_{пл} = 50\%$? Начальная температура воды $t_1 = 10^\circ\text{C}$. Теплоемкость воды $c_v = 4,186$ кДж/(кг·К).

Ответ: $\tau = 15$ мин.

5.12. Вследствие плохой смазки машины происходит нагревание стали массой $M = 150$ кг за время $\tau = 30$ мин на температуру $\Delta t = 50^\circ\text{C}$. Определите вызванную этим потерю мощности машины. Теплоемкость стали $c_{ст} = 0,46$ кДж/(кг·К).

Ответ: $\Delta N = 1,92$ кВт.

5.13. Паровой молот массой $M_m = 2$ т падает на стальную болванку массой $M_b = 10$ кг со скоростью в момент удара 5 м/с. Сколько раз должен упасть молот, чтобы температура болванки поднялась на $\Delta t = 55^\circ\text{C}$? Принять, что вся теплота, выделившаяся при ударе, идет на нагрев болванки. Теплоемкость стали $c_{ст} = 0,46$ кДж/(кг·К).

Ответ: ≈ 6 раз.

5.14. Свинцовый шар падает с высоты $h = 100$ м на твердую поверхность. В результате падения кинетическая энергия шара полностью превращается в теплоту. Одна треть образовавшейся теплоты передается окружающей среде, а две трети расходуются на нагревание шара. Теплоемкость свинца $c_{св} = 0,126$ кДж/(кг·К). Определите, на какую величину повысилась температура шара.

Ответ: $\Delta t = 5,2^\circ\text{C}$.

5.15. В машине вследствие плохой смазки происходит нагревание стали массой $M = 200$ кг на $\Delta T = 40$ К в течение $\tau = 20$ мин. Определите вызванную этим потерю мощности машины. Теплоемкость стали принять $c_{ст} = 0,46$ кДж/(кг·К).

Ответ: $\Delta N = 3,07$ кВт.

5.16. Определите часовой расход масла, подаваемого на охлаждение подшипника скольжения, если температура масла повышается на $\Delta t = 35^\circ\text{C}$. Вал диаметром $d = 70$ мм вращается со скоростью $n_{вр} = 250$ об/мин и давит на подшипник с силой $F = 196\,000$ Н. Коэффициент трения $k_{тр} = 0,02$; теплоемкость масла $c_m = 2,1$ кДж/(кг·К).

Ответ: $M_\epsilon = 5,6$ кг/с.

5.17. На сколько градусов нагреется вода при падении с высоты $h = 214$ м, если вся работа при падении расходуется на ее нагревание? Теплоемкость воды $c_v = 4,186$ кДж/(кг·К).

Ответ: $\Delta t = 0,5^\circ\text{C}$.

5.18. Определите КПД водяной турбины, если высота падения воды $h = 300$ м, а все потери турбины затрачиваются на нагревание воды, которое составляет $\Delta t = 0,2^\circ\text{C}$. Теплоемкость воды $c_v = 4,186$ кДж/(кг·К).

Ответ: $\eta_{в.т} = 71,5\%$.

5.19. Через какое время в закрытом помещении объемом $V = 25$ м³ температура достигнет $t_2 = 25^\circ\text{C}$ в случае его отопления электронагревателем мощностью $N = 0,8$ кВт? Коэффициент использования нагревателя $k_u = 0,7$.

Начальная температура воздуха в помещении $t_1 = 15^\circ\text{C}$, доля потерь теплоты в окружающую среду составляет 20%. Начальное давление воздуха в помещении $p = 760$ мм рт. ст.

Ответ: $\tau = 12$ мин.

5.20. Какая температура воздуха была бы в герметически закрытом котельном отделении судна объемом $V = 420$ м³ через время $\tau = 1$ ч после начала работы котла при отсутствии вентиляции, если доля потерь теплоты котла от наружного ограждения составляет 1,6% от теплоты сжигания топлива? В топке сжигается 1000 кг топлива в час с теплотой сгорания $Q_n^p = 41\,800$ кДж/кг. Начальная температура воздуха в котельном отделении $t_1 = 5^\circ\text{C}$, давление $p_1 = 760$ мм рт. ст. Доля потерь теплоты котельным отделением в окружающую среду составляет 95%.

Ответ: $t_{\text{возд}} = 95^\circ\text{C}$.

5.21. Определите давление вала на подшипник, если часовой расход воды на его охлаждение составляет $M_\tau = 100$ кг/ч, а повышение температуры воды $\Delta t = 40^\circ\text{C}$. Частота вращения вала $n_v = 300$ об/мин, диаметр вала $d = 110$ м. Коэффициент трения $k_{\text{тр}} = 0,1$. Теплоемкость воды $c_v = 4,186$ кДж/(кг·К).

Ответ: $P = 26\,932$ Н.

5.22. При выходе на орбиту искусственный спутник Земли движется со скоростью 29 000 км/ч. Через некоторое время после запуска скорость спутника уменьшается, спутник входит в более плотные слои атмосферы и сгорает. Определите, какое количество теплоты выделяется на 1 кг массы спутника при снижении его скорости до 20 000 км/ч.

Ответ: $Q = 17\,000$ кДж/кг.

5.23. К окиси углерода массой $M = 3$ кг подведена теплота $Q = 41,8$ кДж, в результате чего совершена работа $L = 58,7$ кДж. Определите, как изменилась температура газа. Теплоемкость газа считать постоянной.

Ответ: $\Delta t = 7,5^\circ\text{C}$.

5.24. К кислороду массой $M = 2$ кг подведена теплота $Q = 290$ кДж. Определите, какое количество теплоты пошло на изменение внутренней энергии и на внешнюю работу, если в результате совершения термодинамического процесса температура газа возросла от $t_1 = 10^\circ\text{C}$ до $t_2 = 166^\circ\text{C}$.

Ответ: $\Delta U = 204$ кДж; $L = 86$ кДж.

5.25. Найдите изменение внутренней энергии 5 кг воздуха, если его начальное состояние $p_1 = 0,5$ МПа, $V_1 = 2$ м³, а конечное — $p_2 = 0,3$ МПа, $V_2 = 1,3$ м³.

Ответ: $\Delta U = 1490$ кДж.

5.26. На сжатие азота массой $M = 5$ кг затрачивается работа $L = -98$ кДж, при этом внутренняя энергия газа увеличилась на $\Delta U = 208$ кДж. Определите количество теплоты, изменение температуры и энтальпии в этом процессе.

Ответ: $Q = 110$ кДж; $\Delta t = 55,7^\circ\text{C}$; $\Delta I = 292$ кДж.

5.27. При движении газа через проточную часть турбины совершается техническая работа $l_\tau = 195$ кДж/кг, и в то же время от газа отведена удель-

ная теплота $q = -21$ кДж/кг. Определите снижение температуры газа в турбине. Работой сил тяжести и изменением скорости газа пренебречь. Теплоемкость газа считать постоянной и равной $c_r = 1,04$ кДж/(кг·К).

Ответ: $\Delta t = 208^\circ\text{C}$.

5.28. Определите изменение внутренней энергии и энтальпии азота массой $M = 5$ кг, если температура его возросла от $t_1 = 100^\circ\text{C}$ до $t_2 = 300^\circ\text{C}$. Зависимость теплоемкости от температуры криволинейная.

Ответ: $\Delta U = 750$ кДж; $\Delta I = 1040$ кДж.

5.29. Кислород массой $M = 10$ кг занимает объем $V_1 = 10$ м³ при давлении $p_1 = 0,2$ МПа. При сжатии кислорода объем уменьшается до $V_2 = 5$ м³, а давление возрастает до $p_2 = 0,8$ МПа. Определите изменение энтальпии и количество теплоты, если на сжатие затрачена работа $L = -880$ кДж.

Ответ: $Q = 3960$ кДж; $\Delta I = 6450$ кДж.

5.30. Центробежный вентилятор подает в топку парового котла воздух, часовой расход которого составляет $V_\tau = 6500$ м³/ч при температуре $t = 30^\circ\text{C}$ и давлении $p = 150$ мм рт. ст. Барометрическое давление $p_{\text{бар}} = 760$ мм рт. ст. Диаметр выходного патрубка вентилятора $d = 300$ мм. Определите мощность, потребляемую вентилятором, если его КПД $\eta = 0,7$.

Ответ: $N = 4,8$ кВт.

Указание к выполнению заданию.

Для решения задач нужно воспользоваться лекционным материалом и материалом, приведенным в источнике «Теплотехника. Практикум» под редакцией В. Л. Ерофеева, А. С. Пряхина, с. 49 – 51. Для помощи студенту ниже приводятся примеры решения задач.

Пример 5.1. Пассажирский поезд идет со скоростью 20 км/ч. Какова мощность его энергетической установки, если на 1 км пути расходуется $M = 25$ кг дизельного топлива с теплотой сгорания $Q_n^p = 42\,000$ кДж/кг? Коэффициент полезного действия энергетической установки $\eta_e = 40\%$.

Решение. Часовой расход топлива

$$B = 25 \cdot 20 = 500 \text{ (кг/ч)}.$$

Часовое количество теплоты, выделившейся от сгорания 500 кг топлива,

$$Q = BQ_n^p = 500 \cdot 42\,000 = 2,1 \cdot 10^7 \text{ (кДж/ч)}.$$

Мощность энергетической установки

$$N = \frac{Q\eta_e}{3600} = \frac{2,1 \cdot 10^7 \cdot 0,4}{3600} = 2333 \text{ (кВт)}.$$

Ответ: $N = 2333$ кВт.

Пример 5.2. К воздуху массой $M = 5$ кг подведена теплота $Q = 83$ кДж, в результате чего воздухом совершена работа $L = 49$ кДж. Как при этом изменилась удельная внутренняя энергия воздуха?

Решение. Изменение внутренней энергии 5 кг воздуха

$$\Delta U = Q - L = 83,5 - 49 = 34,5 \text{ (кДж)}.$$

Изменение удельной внутренней энергии

$$\Delta u = \frac{\Delta U}{M} = \frac{34,5}{5} = 6,9 \text{ (кДж/кг)}.$$

Ответ: $\Delta u = 6,9$ кДж/кг.

Пример 5.3. Определите техническую работу, которую может совершить поток (рис. 5.1), если к нему подводится удельная теплота $q = 21$ кДж/кг. Удельная энтальпия газа в результате процесса уменьшилась на $\Delta i = -62,5$ кДж/кг. Изменением скорости потока можно пренебречь.

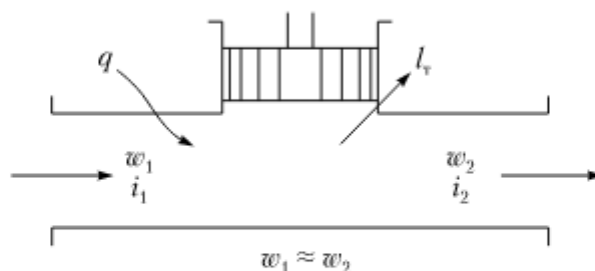


Рис. 5.1. Расчетная схема к примеру 5.3

Решение. Используя уравнение первого закона термодинамики для потока, определяется техническая работа

$$l_\tau = q - \Delta i = 21 - (-62,5) = 83,5 \text{ (кДж/кг)}.$$

Ответ: $l_\tau = 83,5$ кДж/кг.

Пример 5.4. В котельной электрической станции за время $\tau = 10$ ч сжигается $M = 30$ т каменного угля с теплотой сгорания $Q_n^p = 27\,800$ кДж/кг. Определите среднюю мощность электростанции, если 20% теплоты, выделившейся при сгорании угля, превращено в электрическую энергию.

Решение. Количество теплоты, превращенной в электрическую энергию за 10 ч работы, составит

$$Q = 30 \cdot 1000 \cdot 27\,800 \cdot 0,20 = 166\,800\,000 \text{ (кДж)}.$$

Эквивалентная данному количеству теплоты электрическая энергия или работа

$$L = Q/3600 = 166\,800\,000 : 3600 = 46\,333 \text{ (кВт} \cdot \text{ч)}.$$

Средняя электрическая мощность станции

$$N = L/10 = 46\,333 : 10 = 4633,3 \text{ (кВт)}.$$

Ответ: $N = 4633,3$ кВт.

Занятие 6 (2 ч.) Тема «Термодинамические процессы с идеальным газом»

Задание. Решение задач.

6.1. Углекислый газ массой $M = 0,2$ кг находится в герметическом сосуде емкостью $V = 120$ л при температуре $t_1 = -15^\circ\text{C}$. После нагревания давление газа в сосуде возросло до $p_2 = 1500$ мм рт. ст. Определите количество подведенной к газу теплоты. Изобразите процесс на диаграммах pV и Ts .

Ответ: $Q = 42,5$ кДж.

6.2. В воздухохранилище компрессорной станции емкостью $V = 10$ м³ содержится воздух при давлении $p = 0,665$ МПа. В течение дня в результате облучения солнцем температура воздуха возрастет от $t_1 = 20^\circ\text{C}$ до $t_2 = 32^\circ\text{C}$. Определите, на сколько изменится давление и количество воспринятой теплоты. Теплоемкость принять постоянной. Изобразите процесс на диаграммах pV и Ts .

Ответ: $\Delta p = 0,0264$ МПа; $Q = 655$ кДж.

6.3. Давление в кислородном баллоне, находящемся на складе при температуре $t_1 = 15^\circ\text{C}$, составляет $p_1 = 11,9$ МПа. Определите, какое давление покажет манометр, если баллон внести в помещение с температурой $t = 50^\circ\text{C}$, и какое количество теплоты будет подведено к кислороду. Емкость баллона $V = 40$ л. Теплоемкость принять постоянной. Изобразите процесс на диаграммах pV и Ts .

Ответ: $p_2 = 13,23$ МПа; $Q = 266$ кДж.

6.4. От 3 кг окиси углерода изохорно отводится теплота $Q = -448$ кДж. Определите конечное давление газа, если его начальная температура $t_1 = 400^\circ\text{C}$ и начальное давление $p_1 = 5,9$ МПа. Зависимость теплоемкости от температуры принять криволинейной. Изобразите процесс на диаграммах pV и Ts .

Ответ: $p_2 = 4,2$ МПа.

6.5. При изготовлении герметических резервуаров их подвергают испытаниям на действие внешнего давления, для чего воздух внутри резервуара нагревают, затем сосуд разобщают с атмосферой и дают воздуху охладиться. При этом давление в резервуаре установится ниже атмосферного. Определите, до какой температуры нужно нагреть воздух, какое количество теплоты будет отведено при охлаждении и изменении энтропии, если конечное давление $p_2 = 0,039$ МПа и температура окружающего воздуха $t = 4^\circ\text{C}$. Барометрическое давление $p_{\text{бар}} = 770$ мм рт. ст. Объем резервуара $V = 10$ м³. Теплоемкость принять постоянной. Изобразите процесс на диаграммах pV и Ts .

Ответ: $t_1 = 452^\circ\text{C}$; $Q = -1570$ кДж; $\Delta S = -3,4$ кДж/К.

6.6. В цилиндре карбюраторного двигателя в конце сжатия рабочая смесь имеет параметры $p_1 = 1,37$ МПа и $t_1 = 330^\circ\text{C}$. В процессе горения топлива выделяется теплота $Q_{\text{н}} = 586$ кДж/кг, которая передается рабочему телу, обладающему свойствами воздуха, при $v = \text{const}$. Определите параметры в конце подвода теплоты и изменение энтропии. Теплоемкость принять постоянной. Изобразите процессы на диаграммах pV и Ts .

Ответ: $p_2 = 3,24$ МПа; $v_2 = 1,26$ м³/кг; $t_2 = 1148^\circ\text{C}$; $\Delta s = 0,612$ кДж/(кг·К).

6.7. В закрытом резервуаре содержится углекислый газ массой $M = 1,5$ кг при температуре $t_1 = 22^\circ\text{C}$ и давлении $p_1 = 0,782$ МПа. После нагревания давление в резервуаре возросло в 4 раза. Определите объем резервуара, конечную температуру углекислого газа и подведенную теплоту. Теплоемкость принять постоянной. Изобразите процессы на диаграммах pV и Ts .

Ответ: $V = 0,106$ м³; $t_2 = 907^\circ\text{C}$; $Q = 755$ кДж.

6.8. В закрытом сосуде емкостью $V = 300$ л находится водород при нормальных физических условиях. Определите, какое количество теплоты должно быть сообщено газу, чтобы температура его возросла до $t_2 = 300^\circ\text{C}$, конечное давление и плотность. Принять криволинейную зависимость теплоемкости от температуры. Изобразите процесс на диаграммах pV и Ts .

Ответ: $Q = 83,1$ кДж; $p_2 = 0,213$ МПа; $\rho = 0,09$ кг/м³.

6.9. К рабочему телу в изохорном процессе подводится удельная теплота $q = 755$ кДж/кг. При этом давление рабочего тела возрастает от $p_1 = 2,94$ МПа до $p_2 = 6,86$ МПа. Определите конечную температуру рабочего тела, обладающего свойствами воздуха, и изменение энтропии. Теплоемкость считать постоянной. Изобразите процесс на диаграммах pV и Ts .

Ответ: $t_2 = 1559^\circ\text{C}$; $\Delta s = 0,612$ кДж/(кг·К).

6.10. К азоту, находящемуся в закрытом сосуде при температуре $t_1 = 25^\circ\text{C}$, подводится теплота $Q = 628$ кДж. В результате подвода теплоты давление возросло от $p_1 = 4,9$ МПа до $p_2 = 11,8$ МПа. Определите объем сосуда. Теплоемкость принять постоянной. Изобразите процесс на диаграммах pV и Ts .

Ответ: $V = 0,036$ м³.

6.11. В изохорном процессе удельная внутренняя энергия воздуха возросла на $\Delta u = 692$ кДж/кг, а давление увеличилось в 2,2 раза. Определите конечную температуру и изменение энтропии. Теплоемкость принять постоянной. Изобразите процесс на диаграммах pV и Ts .

Ответ: $t_2 = 1502^\circ\text{C}$; $\Delta s = 0,562$ кДж/(кг·К).

6.12. Удельная внутренняя энергия окиси углерода в процессе при $v = \text{const}$ увеличивается на $\Delta u = 188$ кДж/кг, энтальпия — на $\Delta I = 440$ кДж, а давление становится $p_2 = 0,196$ МПа. Начальная температура $t_1 = 15^\circ\text{C}$. Определите количество газа, участвующего в процессе, давление и объем сосуда. Изобразите процесс на диаграммах $p-v$ и $T-s$.

Ответ: $M = 1,66$ кг; $p_1 = 0,104$ МПа; $V = 1,36$ м³.

6.13. Удельная энтропия кислорода в изохорном процессе возросла на $\Delta s = 0,838$ кДж/(кг·К), а удельная внутренняя энергия — на $\Delta u = 336$ кДж/кг, начальное давление $p_1 = 0,1275$ МПа. Определите конечное давление и температуру. Теплоемкость принять постоянной. Изобразите процесс на диаграммах $p-v$ и $T-s$.

Ответ: $p_2 = 0,462$ МПа; $t_2 = 1329^\circ\text{C}$.

6.14. В изобарном процессе произведена работа $L = 235$ кДж, при этом внутренняя энергия рабочего тела изменилась на $\Delta u = 251$ кДж/кг, а его объем — в 2,2 раза. Давление $p = 0,49$ МПа. Рабочее тело — азот. Определите конечные параметры. Теплоемкость принять постоянной. Изобразите процесс на диаграммах $p-v$ и $T-s$.

Ответ: $t_2 = 350^\circ\text{C}$; $v_2 = 0,886$ м³/кг.

6.15. Удельная энтальпия углекислого газа в процессе при постоянном давлении $p = 0,293$ МПа уменьшилась на $\Delta i = -124$ кДж/кг, а внутренняя энергия — на $\Delta U = -628$ кДж. Температура при этом изменилась в 1,6 раза. Определите конечные параметры и изменение энтропии. Теплоемкость принять постоянной. Изобразите процесс на диаграммах $p-v$ и $T-s$.

Ответ: $t_2 = 22^\circ\text{C}$; $V_2 = 1,185$ м³; $\Delta S = 2,31$ кДж/К.

6.16. К гелию в процессе при постоянном давлении $p = 0,343$ МПа подведена теплота $Q = 923$ кДж, в результате чего совершена удельная работа $l = 165$ кДж/кг. Плотность гелия уменьшилась в 1,25 раза. Определите конечные параметры и изменение энтропии. Теплоемкость принять постоянной. Изобразите процесс на диаграммах $p-v$ и $T-s$.

Ответ: $t_2 = 127^\circ\text{C}$; $V_2 = 5,33$ м³; $\Delta S = 0,675$ кДж/К.

6.17. При изобарном сжатии азота массой $M = 1$ кг при давлении $p = 0,196$ МПа от газа отводится теплота $Q = -73,3$ кДж. Начальная температура газа $t_1 = 135^\circ\text{C}$. Определите конечную температуру и объем газа, а также изменение его внутренней энергии. Теплоемкость считать постоянной. Изобразите процесс на диаграммах $p-v$ и $T-s$.

Ответ: $t_2 = 65^\circ\text{C}$; $v_2 = 0,511$ м³/кг; $\Delta u = -52,3$ кДж/кг.

6.18. Одноатомный газ в процессе при $p = \text{const}$ совершил работу $L = 147$ кДж. Определите количество подведенной теплоты. Теплоемкость принять постоянной. Изобразите процесс на диаграммах $p-v$ и $T-s$.

Ответ: $Q = 368$ кДж.

6.19. В процессе при $p = \text{const}$ изменение энтальпии окиси углерода составило $\Delta I = 335$ кДж, удельной внутренней энергии $\Delta u = 104,5$ кДж/кг, а удельная энтропия возросла на $\Delta s = 1,045$ кДж/(кг·К). Определите начальную температуру газа и работу процесса. Теплоемкость принять постоянной. Изобразите процесс на диаграммах $p-v$ и $T-s$.

Ответ: $t_1 = -19^\circ\text{C}$; $L = 96$ кДж.

6.20. В промежуточный охладитель компрессора поступает сжатый до $p = 0,686$ МПа воздух, где охлаждается до $t_2 = 25^\circ\text{C}$. Производительность компрессора $V_\tau = 350$ м³/ч при $t = 0^\circ\text{C}$ и $p = 757$ мм рт. ст. Расход охлаждающей воды через охладитель $M_\tau = 1000$ кг/ч при перепаде температур $\Delta t = 15^\circ\text{C}$. Определите температуру воздуха на входе в охладитель, удельные объемы на входе и выходе из охладителя. Теплоемкость принять постоянной. Изобразите процесс на диаграммах $p\bar{v}$ и Ts .

Ответ: $t_1 = 176^\circ\text{C}$; $v_1 = 0,219$ м³/кг; $v_2 = 0,145$ м³/кг.

6.21. В газоходах парового котла движутся дымовые газы, имеющие следующий состав по объему: $\text{CO}_2 = 10,3\%$; $\text{O}_2 = 7,8\%$; $\text{N}_2 = 75,3\%$; $\text{H}_2\text{O} = 6,6\%$. Определите количество теплоты, отдаваемой 1 м³ дымового газа при нормальных условиях на участке газохода, на котором температура его снижается от $t_1 = 800^\circ\text{C}$ до $t_2 = 400^\circ\text{C}$. Определите, как изменится скорость газов, если сечение газохода по всему участку одинаково. Учесть зависимость теплоемкости от температуры, считая ее криволинейной. Изобразите процесс на диаграммах $p\bar{v}$ и Ts .

Ответ: $Q = -620$ кДж/м³; $w_1/w_2 = 0,625$.

6.22. Состав газа на выходе из двигателя внутреннего сгорания по объему: $\text{CO}_2 = 6\%$; $\text{O}_2 = 13\%$; $\text{CO} = 1,0\%$; $\text{N}_2 = 80\%$. Газы имеют температуру $t_1 = 375^\circ\text{C}$ при давлении (по манометру) $p_{\text{ман}} = 200$ мм вод. ст. Газ охлаждается в утилизационном водогрейном котле до температуры $t_2 = 175^\circ\text{C}$ при постоянном давлении. Определите количество переданной воде теплоты и диаметр газохода после котла, если скорость газов $w = 8$ м/с. Расход газа $M_\tau = 2500$ кг/ч. Теплоемкость принять постоянной. Барометрическое давление $p_{\text{бар}} = 750$ мм рт. ст. Изобразите процесс на диаграммах $p\bar{v}$ и Ts .

Ответ: $Q = 520\,000$ кДж/ч; $d_1 = 455$ мм; $d_2 = 380$ мм.

6.23. Кислород массой $M = 10$ кг сжат в цилиндре до $p = 0,98$ МПа при температуре $t = 20^\circ\text{C}$. После нагревания при постоянном давлении газ занимает объем $V = 1,94$ м³. Определите количество теплоты, полученной газом, изменение внутренней энергии и совершенную газом работу. Принять криволинейную зависимость теплоемкости от температуры. Изобразите процесс на диаграммах $p\bar{v}$ и Ts .

Ответ: $Q = 2650$ кДж; $\Delta U = 1930$ кДж; $L = 720$ кДж.

6.25. Начальные параметры рабочего тела, обладающего свойствами воздуха: $v_1 = 0,6 \text{ м}^3/\text{кг}$ и $t_1 = 500^\circ\text{С}$. Определите конечные параметры при подводе теплоты $Q = 754 \text{ кДж/кг}$, изменение внутренней энергии и работу, если теплота подводится изохорно, изобарно, а также если:

- а) 75% теплоты подводится при $v = \text{const}$, 25% — при $p = \text{const}$;
- б) 50% теплоты подводится при $v = \text{const}$, 50% — при $p = \text{const}$;
- в) 25% теплоты подводится при $v = \text{const}$, 75% — при $p = \text{const}$.

Теплоемкость принять постоянной. Изобразите процессы на диаграммах $p\text{--}v$ и $T\text{--}s$.

Ответ: см. табл. 6.1.

6.26. К азоту массой $M = 3 \text{ кг}$ подводится теплота сначала в процессе при $p = \text{const}$ и затем при $v = \text{const}$. Изменение внутренней энергии в каждом из процессов составляет 502 кДж . Определите общую подведенную теплоту и па-

Таблица 6.1

Ответ к задаче 6.25

Параметры	$v = \text{const}$	$p = \text{const}$	Варианты		
			а	б	в
$t_{\text{кон}}, ^\circ\text{С}$	1550	1250	1477	1401	1326
$p_{\text{кон}}, \text{МПа}$	87,0	—	74,8	62,0	49,6
$\Delta u, \text{кДж/кг}$	754	537	700	646	592
$l, \text{кДж/кг}$	—	217	54	108	162

раметры в конце изохорного процесса, если начальная температура $t_1 = 30^\circ\text{С}$, а объем в конце изобарного расширения $v_2 = 0,2 \text{ м}^3/\text{кг}$. Теплоемкость принять постоянной. Изобразите процессы на диаграммах $p\text{--}v$ и $T\text{--}s$.

Ответ: $Q_{1-3} = 1205 \text{ кДж}$; $p_3 = 1,114 \text{ МПа}$; $t_3 = 478^\circ\text{С}$.

6.27. В изохорном процессе к окиси углерода массой $M = 2,5 \text{ кг}$ подводится теплота $Q = 587 \text{ кДж}$, затем в изобарном процессе происходит увеличение энтальпии, равное изменению энтальпии в процессе при $v = \text{const}$. Определите подведенную теплоту и работу, а также начальные параметры, если в конце процесса при $p = \text{const}$ давление составляло $p_3 = 0,88 \text{ МПа}$ и объем $v_3 = 0,313 \text{ м}^3/\text{кг}$. Теплоемкость принять постоянной. Изобразите процессы на диаграммах $p\text{--}v$ и $T\text{--}s$.

Ответ: $Q_{1-3} = 1405 \text{ кДж}$; $L_{1-3} = 234 \text{ кДж}$; $p_1 = 0,426 \text{ МПа}$; $t_1 = 25^\circ\text{С}$; $v_1 = 0,131 \text{ м}^3/\text{кг}$.

6.28. При изобарном сжатии и последующем изохорном охлаждении внутренняя энергия кислорода массой $M = 2$ кг изменяется на $\Delta U = 920$ кДж и затрачивается работа 150 кДж. В конце процессов давление составляет $p_3 = 0,049$ МПа, удельный объем $v_3 = 0,53$ м³/кг. Определите количество теплоты, участвующей в процессе, и начальные параметры. Теплоемкость принять постоянной. Изобразите процессы на диаграммах $p-v$ и $T-s$.

Ответ: $Q_{1-3} = -1070$ кДж; $p_1 = 0,0945$ МПа; $t_1 = 725^\circ\text{C}$; $v_1 = 2,14$ м³/кг.

6.29. В процессе изобарного сжатия объем воздуха массой 1,945 кг уменьшается в 2 раза, затем в изохорном процессе давление уменьшается в 1,5 раза. Начальное давление $p_1 = 1,47$ МПа, конечная температура $t_3 = 20^\circ\text{C}$. Определите количество теплоты, участвующей в процессах, изменение внутренней энергии и конечный объем. Теплоемкость принять постоянной. Изобразите процессы на диаграммах $p-v$ и $T-s$.

Ответ: $Q_{1-3} = -1155$ кДж; $\Delta U = -908$ кДж; $v_3 = 0,086$ м³/кг.

6.30. К кислороду массой $M = 2$ кг подводится теплота сначала изохорно, затем изобарно, причем $p_2/p_1 = v_3/v_2 = 2$. Определите подведенную теплоту, совершенную работу и изменение внутренней энергии, а также начальные давление и температуру кислорода. В конце изохорного процесса $p_2 = 0,782$ МПа и $v_2 = 0,12$ м³/кг. Теплоемкость принять постоянной. Изобразите процессы на диаграммах $p-v$ и $T-s$.

Ответ: $Q_{1-3} = 1130$ кДж; $L_{1-3} = 188$ кДж; $\Delta U_{1-3} = 942$ кДж; $p_1 = 0,392$ МПа; $t_1 = 87^\circ\text{C}$.

Указание к выполнению заданию.

Для решения задач нужно воспользоваться лекционным материалом и материалом, приведенным в источнике «Теплотехника. Практикум» под редакцией В. Л. Ерофеева, А. С. Пряхина, с. 57 – 63. Для помощи студенту ниже приводятся примеры решения задач.

Пример 6.1. В герметическом сосуде емкостью $V = 3$ м³ содержится окись углерода при давлении $p_1 = 0,3$ МПа и температуре $t_1 = 25^\circ\text{C}$. В результате подвода теплоты температура возросла до $t_2 = 75^\circ\text{C}$. Определите конечное давление и подведенную теплоту. Теплоемкость принять постоянной. Изобразите процесс на диаграммах $p-v$ и $T-s$.

Решение. На рис. 6.2 изображен изохорный процесс на диаграммах $p-v$ и $T-s$.

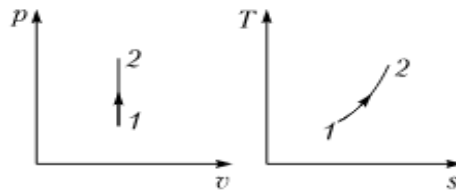


Рис. 6.2. Диаграммы $p-v$ и $T-s$ к примеру 6.1

Массу газа в сосуде определим по формуле

$$M = \frac{p_1 V_1}{RT_1},$$

где R — газовая постоянная окиси углерода (принимается по прил. 1);

$$M = \frac{3 \cdot 10^5 \cdot 3}{297 \cdot 298} = 10,15 \text{ (кг)}.$$

Изохорная массовая теплоемкость газа

$$c_v = \frac{\mu c_v}{\mu} = \frac{20,8}{28} = 0,75 \text{ (кДж/(кг} \cdot \text{К))}.$$

Конечное давление

$$p_2 = p_1 \frac{T_2}{T_1} = 0,3 \cdot \frac{348}{298} = 0,35 \text{ (МПа)}.$$

Количество подведенной теплоты

$$Q = Mc_v(t_2 - t_1) = 10,15 \cdot 0,745 \cdot (75 - 25) = 379 \text{ (кДж)}.$$

Ответ: $p_2 = 0,35$ МПа; $Q = 379$ кДж.

Пример 6.2. При нормальных физических условиях к азоту объемом $V = 3 \text{ м}^3$ изохорно подведена теплота $Q = 800$ кДж. Определите конечное давление азота, если его начальное давление $p_1 = 0,2$ МПа при температуре $t_1 = 40^\circ\text{C}$. Зависимость теплоемкости от температуры принять криволинейной.

Решение. Давление в конце процесса определяется по формуле

$$p_2 = p_1 \frac{T_2}{T_1},$$

конечная температура азота — из уравнения

$$Q = Vc'_v(t_2 - t_1).$$

Поскольку значение конечной температуры, необходимое также для нахождения средней теплоемкости, неизвестно, задачу следует решать методом последовательных приближений.

Принимая теплоемкость постоянной, в первом приближении, имеем

$$c'_v = \frac{\mu c_v}{22,4} = \frac{20,8}{22,4} = 0,935 \text{ (кДж/(м}^3 \cdot \text{K))}.$$

Тогда

$$t_2 = t_1 + \frac{Q}{Vc'_v} = 40 + \frac{800}{3 \cdot 0,935} = 325 \text{ (}^\circ\text{C)}.$$

По таблицам теплоемкости для азота при температуре t_2 определим значение средней объемной теплоемкости:

$$(\bar{c}'_v)_{t_1-t_2} = \frac{(\bar{c}'_v)_{0-t_2}t_2 - (\bar{c}'_v)_{0-t_1}t_1}{t_2 - t_1} = \frac{0,9423 \cdot 325 - 0,9285 \cdot 40}{325 - 40} = 0,946 \text{ (кДж/(м}^3 \cdot \text{K))}.$$

Температура t_2 во втором приближении

$$t_2 = t_1 + \frac{Q}{V(\bar{c}'_v)_{t_1-t_2}} = 40 + \frac{800}{3 \cdot 0,946} = 322 \text{ (}^\circ\text{C)}.$$

Так как погрешность при определении t_2 не превышает 3°C , т.е. около 1%, можно принять полученную температуру за расчетную. Если в результате определения температура отличалась бы более чем на 3%, то потребовалось бы по аналогичному методу находить t_2 в третьем приближении и т.д. До тех пор, пока погрешность между двумя последовательными приближениями не будет меньше 3%.

Конечное давление азота

$$p_2 = p_1 \frac{T_2}{T_1} = 0,2 \cdot \frac{595}{313} = 0,38 \text{ (МПа)}.$$

Ответ: $p_2 = 0,38 \text{ МПа}$.

Пример 6.3. В изохорном процессе удельная энтропия гелия увеличивается на $\Delta s = 1,26 \text{ кДж/(кг} \cdot \text{К)}$, а удельная энтальпия — на $\Delta i = 1560 \text{ кДж/кг}$. Конечное давление гелия $p_2 = 1,2 \text{ МПа}$. Определите количество подведенной удельной теплоты и начальные параметры. Теплоемкость считать не зависящей от температуры. Изобразите процесс на диаграммах $p-v$ и Ts .

Решение. Изобразим процесс на диаграммах $p-v$ и Ts (рис. 6.3).

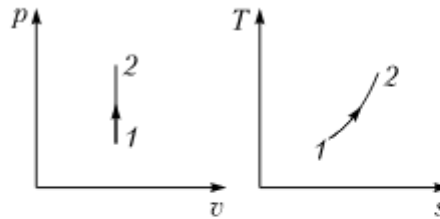


Рис. 6.3. Диаграммы $p-v$ и Ts к примеру 6.3

Теплоемкость гелия

$$c_v = \frac{\mu c_v}{\mu} = \frac{12,5}{4} = 3,13 \text{ (кДж/(кг} \cdot \text{К))}.$$

Разность температур в процессе определим из выражения

$$\Delta i = c_p(t_2 - t_1),$$

где

$$c_p = \frac{\mu c_p}{\mu} = \frac{20,8}{4} = 5,23 \text{ (кДж/(кг} \cdot \text{К))}.$$

Тогда

$$t_2 - t_1 = \frac{\Delta i}{c_p} = \frac{1560}{5,23} = 300 \text{ (}^\circ\text{C)}.$$

Отношение температур найдем из уравнения

$$\begin{aligned} \Delta s &= c_v \ln \frac{T_2}{T_1}; \\ \ln \frac{T_2}{T_1} &= \frac{\Delta s}{c_v} = \frac{1,26}{2,13} = 0,404; \\ \frac{T_2}{T_1} &= 1,5. \end{aligned}$$

Для определения значения конечной температуры следует решить систему уравнений

$$\begin{cases} \frac{T_2}{T_1} = 1,5, \\ T_2 - T_1 = 300. \end{cases}$$

Получим

$$1,5T_1 - T_1 = 300;$$

$$T_1 = \frac{300}{0,5} = 600 \text{ (К)};$$

$$T_2 = T_1 + 300 = 600 + 300 = 900 \text{ (К)}.$$

Давление в начале процесса

$$p_2 = p_1 \frac{T_2}{T_1} = 1,2 \cdot \frac{600}{900} = 0,8 \text{ (МПа)}.$$

Количество подведенной удельной теплоты

$$q = c_v(t_2 - t_1) = 3,13 \cdot 300 = 940 \text{ (кДж/кг)}.$$

Ответ: $q = 940 \text{ кДж/кг}$; $p_1 = 0,8 \text{ МПа}$.

Пример 6.4. Внутренняя энергия азота, занимающего объем $V = 3,2 \text{ м}^3$ при давлении $p = 0,3 \text{ МПа}$ и температуре $t = 37^\circ\text{C}$, в процессе при постоянном давлении возросла на $\Delta U = 755 \text{ кДж}$. Определите конечный объем азота. Теплоемкость считать постоянной.

Решение. Количество азота, участвующего в процессе, определим из уравнения состояния идеального газа:

$$M = \frac{pV_1}{RT_1} = \frac{3 \cdot 10^5 \cdot 3,2}{297 \cdot 310} = 10,4 \text{ (кг)}.$$

Температуру газа в конце процесса найдем из уравнения

$$\begin{aligned} \Delta U &= M \frac{\mu c_v}{\mu} (t_2 - t_1); \\ t_2 - t_1 + \frac{\Delta U \mu}{M \mu c_v} &= 37 + \frac{755 \cdot 28}{10,4 \cdot 20,8} = 135 \text{ (}^\circ\text{C)}. \end{aligned}$$

Работа в изобарном процессе

$$L = MR(t_2 - t_1) = 10,4 \cdot (135 - 37) = 297 \text{ 000 (кДж)}.$$

Конечный объем определим из формулы

$$\begin{aligned} L &= p(V_2 - V_1); \\ V_2 &= \frac{L}{p} + V_1 = \frac{297 \text{ 000}}{3 \cdot 10^5} + 3,2 = 4,19 \text{ (м}^3\text{)}. \end{aligned}$$

Ответ: $V_2 = 4,19 \text{ м}^3$.

Пример 6.5. Воздух массой $M = 3,24 \text{ кг}$ изобарно охлаждаются до объема вдвое меньше первоначального, а затем в изохорном процессе нагревают до начальной температуры. Минимальная температура $t_{\min} = 25^\circ\text{C}$. Максимальное давление $p_{\max} = 1,0 \text{ МПа}$. Определите начальные параметры, теплоту, работу, изменение внутренней энергии и энтропии. Изобразите процессы на диаграммах pV и Ts .

Решение. Изобразим процессы на диаграммах $p-v$ и $T-s$ (рис. 6.4).

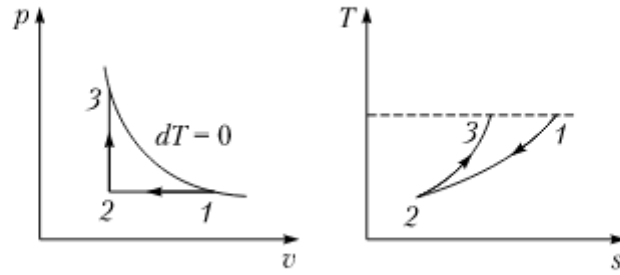


Рис. 6.4. Диаграммы $p-v$ и $T-s$ к примеру 6.5

В рассматриваемых процессах точка 2 общая и имеет минимальную температуру, т.е. $t_{\min} = t_2 = 25^\circ\text{C}$. Максимальное давление соответствует давлению в точке 3, т.е. $p_{\max} = p_3 = 1,0$ МПа.

Используя зависимость между параметрами в изохорном процессе, определим давление в точке 2:

$$p_2 = p_3 \frac{T_2}{T_3}.$$

Так как по условию $v_1/v_2 = 2$, а в изобарном процессе $v_1/v_2 = T_1/T_2 = 2$, то $T_3 = T_1$ и

$$p_1 = 1,0 \cdot \frac{1}{2} = 0,5 \text{ (МПа)}.$$

Удельный объем в точке 2

$$v_2 = \frac{RT_2}{p_2} = \frac{287 \cdot 298}{5 \cdot 10^5} = 0,172 \text{ (м}^3\text{/кг)}.$$

Так как процесс 1–2 изобарный, то

$$p_1 = p_2 = 0,5 \text{ (МПа)},$$

а температура в начале изобарного процесса

$$T_1 = T_2 \frac{v_1}{v_2} = 298 \cdot 2 = 596 \text{ (K)};$$

$$t_1 = 323 \text{ (}^\circ\text{C)}.$$

Изменение внутренней энергии в процессах 1–3

$$\Delta U_{1-3} = M\Delta u_{1-3} = M(\Delta u_{1-2} + \Delta u_{2-3}) = M[c_v(t_2 - t_1) + c_v(t_3 - t_2)] = 0.$$

Теплота, участвующая в процессе,

$$Q_{1-3} = Mq_{1-3} = M(q_{1-2} + q_{2-3}) = M[c_p(t_2 - t_1) + c_v(t_3 - t_2)] =$$

$$= M\left[\frac{\mu c_p}{\mu}(t_2 - t_1) + \frac{\mu c_v}{\mu}(t_3 - t_2)\right] = 3,24\left[\frac{29}{29}(25 - 323) + \frac{20,8}{29}(323 - 25)\right] =$$

$$= -278 \text{ (кДж)}.$$

Работа в процессах 1–3

$$L_{1-3} = M(l_{1-2} + l_{2-3}) = M[R(t_2 - t_1) + 0] = 3,24[0,287(25 - 323)] =$$

$$= -278 \text{ (кДж)}.$$

Изменение энтропии в процессах 1–3

$$\begin{aligned}\Delta S_{1-3} &= \Delta S_{1-2} + \Delta S_{2-3} = M \frac{\mu c_p}{\mu} \ln \frac{T_2}{T_1} + M \frac{\mu c_v}{\mu} \ln \frac{T_3}{T_2} \\ &= 3,24 \frac{29}{29} \ln \frac{298}{596} + 3,24 \frac{20,8}{29} \ln \frac{596}{298} = -0,635 \text{ (кДж/К)}.\end{aligned}$$

Ответ: $p_1 = 0,5 \text{ МПа}$; $t_1 = 323^\circ\text{C}$; $Q_{1-3} = -278 \text{ кДж}$; $L_{1-3} = -278 \text{ кДж}$; $\Delta U_{1-3} = 0$; $\Delta S_{1-3} = -0,635 \text{ кДж/К}$.

Пример 6.6. Какое количество теплоты необходимо отвести от массы $M = 3 \text{ кг}$ углекислого газа, чтобы его объем уменьшился в 5 раз, а температура осталась неизменной и равной $t = 30^\circ\text{C}$?

Решение. В изотермическом процессе теплота равна работе:

$$Q = L = MRT \ln \frac{v_2}{v_1} = 3 \cdot 0,189 \cdot 303 \cdot \ln \frac{1}{5} = -276 \text{ (кДж)}.$$

Ответ: $Q = -276 \text{ кДж}$.

Занятие 7 (2 ч.) Тема «Влажный воздух»

Задание. Решение задач.

7.1. Определите абсолютную влажность воздуха, если парциальное давление содержащегося в нем пара $p_n = 0,02 \text{ МПа}$, температура воздуха $t = 100^\circ\text{C}$. Атмосферное давление $p = 745 \text{ мм рт. ст.}$

Ответ: $\rho_n = 0,1165 \text{ кг/м}^3$.

7.2. С помощью психрометра при определении влажности воздуха зафиксировано, что «сухой» термометр показывает температуру $t = 20^\circ\text{C}$, а «мокрый» — $t = 15^\circ\text{C}$. Определите влагосодержание, относительную влажность, энтальпию и температуру точки росы для воздуха.

Ответ: $d = 9,2 \text{ г/кг}$; $\varphi = 62\%$; $i = 43 \text{ кДж/кг}$; $t_p = 12,6^\circ\text{C}$.

7.3. Температура влажного воздуха $t = 30^\circ\text{C}$, относительная влажность $\varphi = 0,8$. Барометрическое давление $p_{\text{бар}} = 745 \text{ мм рт. ст.}$ Определите парциальное давление пара в воздухе и его влагосодержание.

Ответ: $p_n = 0,0033 \text{ МПа}$; $d = 31 \text{ г/кг}$.

7.4. Каково состояние воздуха при температуре $t = 55^\circ\text{C}$ и парциальном давлении пара в нем $p_n = 70 \text{ мм рт. ст.}$?

Ответ: $p_s = 118 \text{ мм рт. ст.}$

7.5. Влажный воздух имеет следующие параметры: температуру $t = 25^\circ\text{C}$ и относительную влажность $\varphi = 0,8$. Атмосферное давление $p = 99\,325 \text{ Па}$ (745 мм рт. ст.). Определите парциальное давление пара в воздухе и его влагосодержание.

Ответ: $p_n = 0,0025 \text{ МПа}$; $d = 16,3 \text{ г/кг}$.

7.6. Определите относительную влажность, влагосодержание и плотность влажного воздуха при заданном состоянии: $t = 80^\circ\text{C}$, $p_n = 0,015\text{ МПа}$. Барометрическое давление $p_{\text{бар}} = 845\text{ мм рт. ст.}$

Ответ: $\phi = 31,7\%$; $d = 108\text{ г/кг}$; $\rho = 0,9\text{ кг/м}^3$.

7.7. Воздух, имеющий температуру $t_1 = 20^\circ\text{C}$ и влагосодержание $d = 6\text{ г/кг}$, подогревается до температуры $t_2 = 45^\circ\text{C}$. Определите относительную влажность наружного и подогретого воздуха. Барометрическое давление $p_{\text{бар}} = 0,1\text{ МПа}$.

Ответ: $\phi_1 = 41,7\%$; $\phi_2 = 10\%$.

7.8. Воздух, имеющий температуру $t_1 = 25^\circ\text{C}$ и влагосодержание $d = 6\text{ г/кг}$, нагревается до температуры $t_2 = 50^\circ\text{C}$. Определите значения начальной и конечной относительной влажности воздуха. Барометрическое давление $p_{\text{бар}} = 0,1\text{ МПа}$.

Ответ: $\phi_1 = 0,3$; $\phi_2 = 0,05$.

7.9. От материала, помещенного в сушилку, нужно отвести воду массой $M = 3000\text{ кг}$. Температура наружного воздуха $t_1 = 10^\circ\text{C}$, относительная влажность $\phi_1 = 0,4$. При входе в сушилку воздух подогревается и выходит из нее при температуре $t_2 = 40^\circ\text{C}$ и относительной влажности $\phi_2 = 0,85$. Определите количество воздуха, которое необходимо пропустить через сушилку.

Ответ: $V_n = 64\,500\text{ м}^3$.

7.10. Для сушки материала используется воздух при температуре $t_1 = 25^\circ\text{C}$ и относительной влажности $\phi_1 = 50\%$. В воздушном подогревателе воздух нагревают до температуры $t_2 = 90^\circ\text{C}$ и направляют в сушилку, откуда он выходит при температуре $t_3 = 35^\circ\text{C}$. Определите расходы теплоты и воздуха на 1 кг испаренной влаги.

Ответ: $q = 3070\text{ кДж/кг}$; $G = 45,5\text{ кг сух. возд.}$

7.11. Состояние влажного воздуха определено следующими параметрами: $t = 25^\circ\text{C}$, $\phi = 0,6$. Определите парциальное давление водяных паров в воздухе при помощи таблиц водяного пара.

Ответ: $p_n = 1,90\text{ кПа}$.

7.12. Температура точки росы влажного воздуха, находящегося при температуре $t = 20^\circ\text{C}$, составляет $t_p = 0^\circ\text{C}$. Определите относительную влажность, влагосодержание и энтальпию влажного воздуха.

Ответ: $\phi = 52\%$; $d = 7,8\text{ г/кг}$; $i = 40\text{ кДж/кг}$.

7.13. В сушильной установке производится подсушка твердого топлива с помощью воздуха при атмосферном давлении. Начальное состояние воздуха: температура $t_0 = 20^\circ\text{C}$, относительная влажность $\phi = 40\%$. Предварительно подогретый до температуры $t_1 = 80^\circ\text{C}$ воздух направляется в сушильную камеру, где в процессе высушивания топлива охлаждается до температуры $t_2 = 35^\circ\text{C}$. Рассчитайте необходимое количество теплоты q для нагревания 1 кг воздуха, параметры воздуха на выходе из сушильной камеры и количество воды, которое отбирает каждый килограмм воздуха от топлива. Считать, что тепловые потери отсутствуют.

Ответ: $q = 61\text{ кДж/кг сух. возд.}$. С каждым килограммом сухого воздуха уходит $18,0\text{ г}$ воды. На выходе из сушильной камеры параметры воздуха следующие: $d = 23,9\text{ г/кг сух. возд.}$, $\phi = 66\%$, $i = 96\text{ кДж/кг сух. возд.}$

7.14. Влажный воздух с параметрами начального состояния при атмосферном давлении $t_1 = 25^\circ\text{C}$, $\phi = 70\%$ охлаждается до температуры $t_2 = 15^\circ\text{C}$. Определите, сколько влаги выпадет из каждого килограмма воздуха.

Ответ: $\Delta d = 3,4 \text{ г/кг}$.

7.15. Параметры влажного воздуха: $t = 200^\circ\text{C}$, $p = 0,2 \text{ МПа}$, $d = 40 \text{ г/кг}$ сух. возд. Определите его удельный объем.

Ответ: $v = 0,695 \text{ м}^3/\text{кг}$.

7.16. Параметры влажного воздуха: $p = 0,4 \text{ МПа}$, $t = 70^\circ\text{C}$, $d = 20 \text{ г/кг}$. Определите его энтальпию.

Ответ: $I = 121 \text{ кДж/кг}$.

7.17. В процессе сжатия воздуха с параметрами $t_1 = 15^\circ\text{C}$, $p_1 = 0,1 \text{ МПа}$ и $d_1 = 10 \text{ г/кг}$ его параметры изменяются: $t_2 = 60^\circ\text{C}$, $p_2 = 0,7 \text{ МПа}$. Определите относительную влажность воздуха в конце процесса сжатия.

Ответ: $\phi_2 = 55\%$.

7.18. В зимнее время температура наружного воздуха $t_0 = -10^\circ\text{C}$, а степень его насыщения $\psi_0 = 0,8$. Перед подачей в жилое помещение наружный воздух нагревается, а затем, с целью создания комфортных условий, увлажняется путем впрыскивания воды, имеющей температуру $t_{\text{воды}} = 10^\circ\text{C}$. В результате этих двух процессов (нагрева и увлажнения) степень насыщения воздуха становится равной $\psi_2 = 0,8$, а температура — $t_2 = 20^\circ\text{C}$. Определите, до какой температуры должен быть нагрет воздух перед впрыскиванием воды, а также какое количество теплоты должно быть подведено на 1 кг сухого воздуха. Задачу решить при помощи I -диаграммы.

Ответ: $t = 43^\circ\text{C}$; $q = 51,1 \text{ кДж/кг}$.

7.19. Начальное состояние влажного воздуха — $t_1 = -40^\circ\text{C}$, $\psi_1 = 0,5$. Путем вдувания водяного пара при атмосферном давлении воздух доводится до состояния насыщения при той же температуре. Определите состояние водяного пара и количество пара, необходимого для насыщения 1 кг сухого воздуха. Задачу решить при помощи I -диаграммы.

Ответ: пар влажный со степенью сухости $x = 0,95$; $d = 25,3 \text{ г/кг}$.

7.20. В камере смешения установки для кондиционирования воздуха производится смешение воздуха, подводимого из помещения, имеющего температуру $t_{\text{п}} = 20^\circ\text{C}$ и относительную влажность $\phi_{\text{п}} = 40\%$, расходом $V_{\text{п}} = 3000 \text{ м}^3/\text{ч}$, и свежего воздуха с параметрами $t_{\text{св.в}} = 5^\circ\text{C}$, $\phi_{\text{св.в}} = 70\%$ и расходом $V_{\text{св.в}} = 7000 \text{ м}^3/\text{ч}$. Определите относительную влажность, влагосодержание и температуру воздуха, выходящего из камеры смешения, считая процесс смешения адиабатным. Давление принять равным $p = 745 \text{ мм рт. ст.}$

Ответ: $t = 9,3^\circ\text{C}$; $d = 4,4 \text{ г/кг}$; $\phi = 60\%$.

Указание к выполнению заданию.

Для решения задач нужно воспользоваться лекционным материалом и материалом, приведенным в источнике «Теплотехника. Практикум» под редакцией В. Л. Ерофеева, А. С. Пряхина, с. 91 – 98. Для помощи студенту ниже приводятся примеры решения задач.

Пример 7.1. Определите абсолютную влажность воздуха, если парциальное давление пара в нем $p_{\text{п}} = 0,014$ МПа, а температура $t = 80^\circ\text{C}$. Барометрическое давление $p_{\text{бар}} = 760$ мм рт. ст.

Решение. Температуре $t = 80^\circ\text{C}$ соответствует давление насыщения $p_s = 0,04736$ МПа. Следовательно, при парциальном давлении $p_{\text{п}} = 0,014$ МПа пар перегрет. По таблицам перегретого пара для $p = 0,014$ МПа при температуре $t = 80^\circ\text{C}$ удельный объем пара $v = 11,61$ м³/кг, тогда абсолютная влажность

$$\rho_{\text{п}} = \frac{1}{v} = \frac{1}{11,61} = 0,086 \text{ (кг/м}^3\text{)}.$$

Ответ: $\rho_{\text{п}} = 0,086$ кг/м³.

Пример 7.2. Определите влагосодержание воздуха с относительной влажностью $\phi = 60\%$ при температуре $t = 60^\circ\text{C}$ и атмосферном давлении $p = 750$ мм рт. ст.

Решение. Из формулы для определения относительной влажности

$$\phi = \frac{p_{\text{п}}}{p_{\text{н}}}$$

находим парциальное давление водяного пара:

$$p_{\text{п}} = p_{\text{н}} \phi,$$

где $p_{\text{н}}$ — давление насыщения водяного пара при температуре смеси при $t = 60^\circ\text{C}$ (прил. 10), $p_{\text{н}} = 0,02$ МПа;

$$p_{\text{п}} = 0,02 \cdot 10^6 \cdot 0,6 = 0,012 \text{ (МПа)}.$$

Данному состоянию соответствует удельный объем $v = 12,78$ м³/кг. Абсолютная влажность

$$\rho_{\text{п}} = \frac{1}{v} = \frac{1}{12,78} = 0,0783 \text{ (кг/м}^3\text{)}.$$

Парциальное давление сухого воздуха

$$p_{\text{с.в}} = p - p_{\text{п}} = \frac{750}{735,6} \cdot 9,81 \cdot 10^4 - 0,012 \cdot 10^6 = 0,088 \cdot 10^6 \text{ (МПа)}.$$

Плотность сухого воздуха

$$\rho_{\text{с.в}} = \frac{p_{\text{с.в}}}{RT} = \frac{0,088 \cdot 10^6}{287 \cdot 333} = 0,922 \text{ (кг/м}^3\text{)}.$$

Тогда

$$d = \frac{\rho_{\text{п}}}{\rho_{\text{с.в}}} = \frac{0,0783}{0,922} = 84,2 \text{ (г/кг)}.$$

Ответ: $d = 84,2$ г/кг.

Пример 7.3. Воздух с начальными параметрами $t_1 = 20^\circ\text{C}$, $d = 8$ г/кг, $p_1 = 993,3$ ГПа сжимается адиабатно до давления $p_2 = 0,6$ МПа и затем охлаждается. Определите, при какой температуре начнется выделение влаги из этого воздуха. Для решения задачи воспользуйтесь таблицами водяного пара (прил. 10).

Решение. По Id -диаграмме определим, что относительная влажность $\varphi = 54\%$. Следовательно, парциальное давление водяных паров

$$p_{\text{п}} = \varphi p_{\text{п}} = 0,54 \cdot 0,002345 = 0,001263 \text{ (МПа)},$$

где $0,54$ — значение относительной влажности (прил. 10); $0,002345$ — значение давления насыщения (прил. 10).

Так как парциальное давление водяных паров будет увеличиваться пропорционально общему давлению влажного воздуха, то парциальное давление водяного пара при $p = 0,6$ МПа составит

$$p = \frac{0,001263 \cdot 0,6}{0,09933} = 0,00763 \text{ (МПа)}.$$

Это давление водяного пара соответствует температуре насыщения $t_p = 40,6^\circ\text{C}$, при которой начнется выпадение воды из воздуха.

Ответ: $t_p = 40,6^\circ\text{C}$.

Пример 7.4. Определите плотность влажного воздуха при параметрах $t = 320^\circ\text{C}$, $p = 0,3$ МПа, $d = 30$ г/кг.

Решение. Находим газовую постоянную влажного воздуха:

$$\begin{aligned} R &= m_{\text{с.в}} R_{\text{с.в}} + m_{\text{п}} R_{\text{п}}; \\ m_{\text{с.в}} &= \frac{1}{1 + d} = \frac{1}{1 + 0,03} = 0,971; \\ m_{\text{п}} &= \frac{d}{1 + d} = \frac{0,03}{1 + 0,03} = 0,029; \end{aligned}$$

$$R = 0,971 \cdot 287 + 0,029 \cdot 461 = 292 \text{ (кДж/(кг} \cdot \text{K))}.$$

Плотность влажного воздуха определяем из уравнения состояния идеального газа:

$$\rho = \frac{p}{RT} = \frac{0,3 \cdot 10^6}{292 \cdot 593} = 1,733 \text{ (кг/м}^3\text{)}.$$

Ответ: $\rho = 1,733$ кг/м³.

Пример 7.5. Для сушки используют воздух при температуре $t_1 = 25^\circ\text{C}$ и $\varphi = 60\%$. Он предварительно подогревается в калорифере до температуры $t_2 = 90^\circ\text{C}$ и направляется в сушилку, откуда выходит при температуре $t_3 = 40^\circ\text{C}$. Определите конечное влагосодержание воздуха, расход воздуха и теплоты на испарение 1 кг влаги.

Решение. По диаграмме Id (рис. 7.6) определяем точку К на пересечении линии $t_1 = 25^\circ\text{C}$ и $\phi = 60\%$, а также $d_1 = 12 \text{ г/кг}$, $i = 56 \text{ кДж/кг}$.

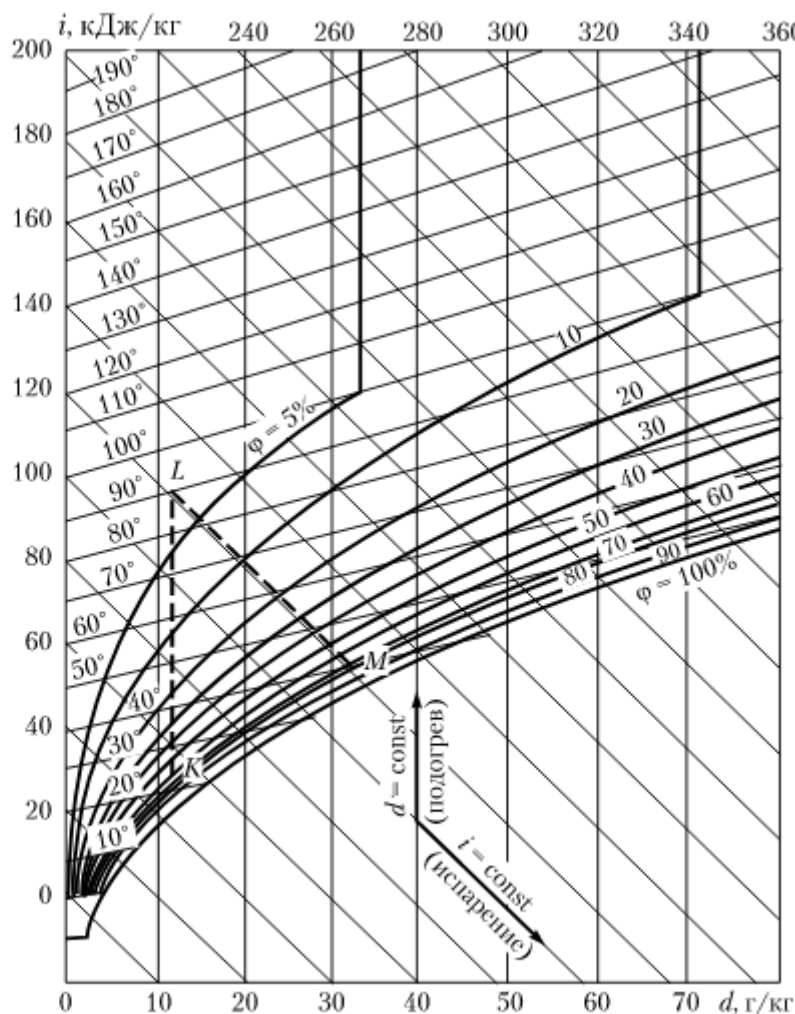


Рис. 7.6. Диаграмма Id к примеру 7.5

Проводим линию $d_1 = 12 \text{ г/кг}$ и находим на пересечении ее с изотермой $t_2 = 90^\circ\text{C}$ точку L , характеризующую состояние воздуха после выхода его из калорифера. Из точки L проводим линию $i = \text{const}$ до пересечения с изотермой $t_3 = 40^\circ\text{C}$, где находим точку M , характеризующую состояние воздуха на выходе из сушилки. Точке M соответствуют $d_3 = 32 \text{ г/кг}$, $i_3 = 124 \text{ кДж/кг}$.

Таким образом, на 1 кг сухого воздуха изменение влажности составляет

$$\Delta d = d_3 - d_1 = 32 - 12 = 20 \text{ (г/кг)}.$$

Для испарения 1 кг влаги потребуется

$$1000 : 20 = 50 \text{ (кг)}$$

сухого воздуха.

Расход теплоты в калорифере на 1 кг воздуха

$$\Delta i = i_3 - i_1 = 124 - 56 = 68 \text{ (кДж/кг)}.$$

Расход теплоты на 1 кг испарения влаги

$$q = 68 \cdot 50 = 3400 \text{ (кДж/кг)}.$$

Ответ: $d_3 = 32 \text{ г/кг}$; $\Delta i = 68 \text{ кДж/кг}$; $q = 3400 \text{ кДж/кг}$.

Занятие 8 (2 ч.) Тема «Круговые процессы (циклы). Цикл Карно»

Задание. Решение задач.

8.1. Чему равен термический КПД цикла, если рабочее тело совершает работу $L = 130$ кДж за цикл и от тела отводится теплота $|Q_2| = 40$ кДж.

Ответ: $\eta_t = 0,767$.

8.2. Определите параметры рабочего тела в характерных точках цикла Карно, а также работу и термический КПД, если максимальное давление $p_{\max} = 10$ МПа и температура $t_{\max} = 700^\circ\text{C}$, а минимальное давление $p_{\min} = 0,1$ МПа и температура $t_{\min} = 30^\circ\text{C}$. Рабочее тело — воздух.

Ответ: $p_1 = 10$ МПа; $v_1 = 0,0279$ м³/кг; $t_1 = 700^\circ\text{C}$; $p_2 = 6$ МПа; $v_2 = 0,0465$ м³/кг; $t_2 = 700^\circ\text{C}$; $p_3 = 0,1$ МПа; $v_3 = 0,87$ м³/кг; $t_3 = 30^\circ\text{C}$; $p_4 = 6,7$ МПа; $v_4 = 0,521$ м³/кг; $t_4 = 30^\circ\text{C}$; $l = 98$ кДж/кг; $\eta_t^K = 0,69$.

8.3. Постройте график зависимости термического КПД цикла Карно от температуры теплоотдатчика t_1 , которая изменяется в пределах $200\text{—}1200^\circ\text{C}$. Температура теплоприемника $t_2 = 20^\circ\text{C}$.

8.4. Постройте график зависимости термического КПД цикла Карно от температуры теплоприемника t_2 , которая изменяется в пределах $20\text{—}800^\circ\text{C}$. Температура теплоотдатчика постоянна и равна $t_1 = 1200^\circ\text{C}$.

8.5. Рабочее тело совершает цикл Карно, получая теплоту от теплоотдатчика, температура которого $t_1 = 650^\circ\text{C}$. Как изменится термический КПД цикла, если температура теплоотдатчика и теплоприемника понизится на 200°C ?

Ответ: увеличится в 1,28 раза.

8.6. В процессе адиабатного сжатия объем кислорода, совершающего цикл Карно, уменьшается в 5 раз. Определите термический КПД цикла.

Ответ: $\eta_t^K = 0,475$.

8.7. При изотермическом расширении воздуха, совершающего цикл Карно, объем возрастает в 4 раза, а в адиабатном процессе — еще в 8 раз. Определите КПД цикла Карно и работу, если температура теплоотдатчика $t_1 = 600^\circ\text{C}$.

Ответ: $\eta_t^K = 0,564$; $l = 195$ кДж/кг.

8.8. Определите работу и термический КПД цикла Карно, если температура теплоотдатчика равна $t_1 = 400^\circ\text{C}$. Объем рабочего тела, обладающего свойствами воздуха, в конце изотермического расширения и изотермического сжатия одинаков. Количество подведенной теплоты $q_1 = 376$ кДж/кг.

Ответ: $\eta_t^K = 0,54$; $l = 203$ кДж/кг.

8.9. Определите работу и термический КПД цикла Карно, если температура теплоприемника равна $t_2 = -13^\circ\text{C}$, а давление воздуха в начале адиабатного расширения и адиабатного сжатия одинаково. Количество отведенной теплоты $|q_2| = 62,9$ кДж/кг.

Ответ: $\eta_t^K = 0,215$; $l = 17,2$ кДж/кг.

8.10. Определите термический КПД и работу цикла Карно, если при подводе теплоты объем рабочего тела (азот) возрастает в 4 раза, а работа, затраченная при изотермическом сжатии, равна работе адиабатного сжатия. Минимальная температура в цикле $t_{\min} = 20^\circ\text{C}$.

Ответ: $\eta_t^K = 0,357$; $l = 66,5$ кДж/кг.

8.11. Термический КПД цикла Карно $\eta_t^K = 0,6$, удельная работа цикла составляет $l = 176$ кДж/кг. При изотермическом сжатии рабочего тела (кислород) давление возрастает в 6 раз. Определите начальную и конечную температуры.

Ответ: $t_1 = 358^\circ\text{C}$; $t_2 = -31^\circ\text{C}$.

8.12. Определите подведенную и отведенную теплоту, работу и КПД цикла Карно, если в процессе адиабатного расширения объем рабочего тела (воздух) возрастает в 7 раз. Наибольший объем цикла $v_{\max} = 1,1$ м³/кг, наименьшее давление $p_{\min} = 0,0785$ МПа.

Ответ: $q_1 = 408$ кДж/кг; $|q_2| = 187$ кДж/кг; $l = 221$ кДж/кг; $\eta_t^K = 0,54$.

8.13. Определите, на сколько увеличится работа в цикле Карно и КПД цикла, если в конце адиабатного сжатия рабочего тела (азот) давление возрастает с $p_1 = 1,175$ МПа до $p'_1 = 1,76$ МПа. В процессе изотермического расширения в обоих случаях объем возрастает в 4 раза. Количество отводимой теплоты $|q_2| = 104,5$ кДж/кг. Минимальный объем в цикле $v_{\min} = 0,12$ м³/кг.

Ответ: $\Delta l = 33,3$ кДж/кг; $\Delta \eta_t^K = 0,144$.

8.14. На сколько возрастает КПД цикла Карно и совершаемая в цикле работа, если наибольший объем рабочего тела (кислород) увеличивается с $v_{\max} = 0,6$ м³/кг до $v'_{\max} = 0,75$ м³/кг. В процессе изотермического расширения давление уменьшается в 5 раз. Наименьшее давление цикла $p_{\min} = 0,1$ МПа. Наибольшее давление $p_{\max} = 2,5$ МПа.

Ответ: $\Delta l = 112$ кДж/кг; $\Delta \eta_t^K = 0,06$.

8.15. Работа, получаемая при изотермическом расширении в цикле Карно, численно равна работе адиабатного расширения. Объем в конце изотермического сжатия $v_4 = 0,22$ м³/кг, давление в конце адиабатного расширения $p_3 = 0,113$ МПа. В процессе адиабатного расширения давление уменьшается в 12 раз. Определите термический КПД цикла Карно и совершаемую работу. Рабочее тело — окись углерода.

Ответ: $\eta_t^K = 0,51$; $l = 116,5$ кДж/кг.

8.16. Определите отношение максимальных и минимальных объемов и давлений в цикле Карно и КПД цикла, если в конце изотермического расширения объем возрастает в 5 раз и достигает значения $v_2 = 0,8$ м³/кг. В конце изотермического сжатия объем становится равным $v_4 = 0,4$ м³/кг. Рабочее тело, обладающее свойствами воздуха, отдает теплоприемнику теплоту $|q_2| = 125,5$ кДж/кг.

Ответ: $v_{\max}/v_{\min} = 12,5$; $p_{\max}/p_{\min} = 18$; $\eta_t^K = 0,31$.

8.17. Определите работу и термический КПД обобщенного цикла Карно, состоящего из двух изотерм и двух изобар, если известно, что температура теплоотдатчика $t_1 = 700^\circ\text{C}$, температура теплоприемника $t_2 = 50^\circ\text{C}$, а отношение максимального давления к минимальному $p_{\max}/p_{\min} = 16$. Рабочее тело — азот.

Ответ: $l = 534$ кДж/кг; $\eta_t^K = 0,668$.

8.18. Чему равна работа и термический КПД цикла Карно, если известно, что подведенная теплота составляет $q_1 = 168$ кДж/кг. При изотермическом

сжатии удельная энтропия рабочего тела изменится на $\Delta s = 0,356 \text{ кДж}/(\text{кг} \cdot \text{К})$ при постоянной температуре $t = 9^\circ\text{С}$.

Ответ: $l = 67 \text{ кДж}/\text{кг}$; $\eta_t^K = 0,4$.

8.19. Чему равна работа воздуха массой $M = 1 \text{ кг}$, совершающего цикл Карно, если температура теплоотдатчика $t_1 = 880^\circ\text{С}$, температура теплоприемника $t_2 = 20^\circ\text{С}$, а удельная энтропия в процессе изотермического расширения возрастает на $\Delta s = 0,306 \text{ кДж}/(\text{кг} \cdot \text{К})$.

Ответ: $l = 263 \text{ кДж}/\text{кг}$.

8.20. Определите работу и термический КПД обобщенного цикла Карно, состоящего из двух изохор и двух изотерм, если энтропия кислорода при изохорном подводе теплоты возрастает на $\Delta s_v = 0,314 \text{ кДж}/(\text{кг} \cdot \text{К})$, а при изотермическом подводе теплоты — на $\Delta s_t = 0,428 \text{ кДж}/(\text{кг} \cdot \text{К})$. Температура теплоприемника $t_2 = -10^\circ\text{С}$.

Ответ: $l = 69 \text{ кДж}/\text{кг}$; $\eta_t^K = 0,382$.

8.21. Определите работу и термический КПД цикла, состоящего из двух изотерм и двух изохор, если максимальная температура цикла $t_{\max} = 1400^\circ\text{С}$, минимальная — $t_{\min} = 30^\circ\text{С}$, а отношение максимального объема к минимальному $v_{\max}/v_{\min} = 6,5$. Рабочее тело — азот.

Ответ: $l = 760 \text{ кДж}/\text{кг}$; $\eta_t = 0,819$.

8.22. Определите работу и термический КПД цикла, состоящего из двух изотерм и двух политроп с показателями $n_1 = 1,3$ (политропа расширения) и $n_2 = 1,7$ (политропа сжатия), в интервале температур от $t_{\max} = 400^\circ\text{С}$ до $t_{\min} = 20^\circ\text{С}$ и давлений от $p_{\max} = 10 \text{ МПа}$ до $p_{\min} = 0,12 \text{ МПа}$. Чему будут равны термический КПД и работа цикла Карно в том же интервале температур и давлений? Рабочее тело — воздух. Изобразите циклы на диаграммах $p-v$ и $T-s$, совместив совпадающие точки.

Ответ: $l = 85,5 \text{ кДж}/\text{кг}$; $\eta_t = 0,147$; $l_K = 102 \text{ кДж}/\text{кг}$; $\eta_t^K = 0,58$.

8.23. Кислород массой $M = 1 \text{ кг}$ совершает цикл Карно между теплоотдатчиком с температурой $t_1 = 350^\circ\text{С}$ и теплоприемником с температурой $t_2 = -10^\circ\text{С}$. Наибольшее давление в цикле $p_{\max} = 9,0 \text{ МПа}$, наименьшее — $p_{\min} = 0,08 \text{ МПа}$. Определите работу и термический КПД цикла. Определите также работу и термический КПД цикла в том же интервале температур и давлений, в котором адиабатное расширение заменено политропным с показателем $n_1 = 1,25$ и адиабатное сжатие — политропным с показателем $n_2 = 1,55$. Изобразите циклы на диаграммах $p-v$ и $T-s$, совместив совпадающие точки.

Ответ: $l_K = 94 \text{ кДж}/\text{кг}$; $\eta_t^K = 0,56$; $l = 72 \text{ кДж}/\text{кг}$; $\eta_t = 0,38$.

8.24. Определите работу и термический КПД цикла Карно, если при изотермическом расширении объем рабочего тела (окись углерода) возрастает в 1,8 раза и при адиабатном расширении — в 9 раз. Наименьшая температура цикла $t_{\min} = 15^\circ\text{С}$. Чему будет равна работа цикла и термический КПД, если изотермические процессы заменить изобарными в том же интервале температур? Изобразите на диаграммах $p-v$ и $T-s$ отличие циклов, совместив совпадающие точки.

Ответ: $l_K = 55 \text{ кДж}/\text{кг}$; $\eta_t^K = 0,582$; $l = 41 \text{ кДж}/\text{кг}$; $\eta_t = 0,36$.

8.25. Определите работу и термический КПД цикла Карно, совершаемого гелием массой $M = 1$ кг. Объем рабочего тела в конце изотермического расширения и сжатия одинаков. Наименьшая температура цикла $t_{\min} = 25^\circ\text{C}$, количество отведенной теплоты $|q_2| = 120$ кДж/кг. Определите работу и термический КПД цикла при равенстве объемов и в том же интервале температур, если адиабаты заменить политропами расширения с показателем $n_1 = 1,5$ и сжатия с показателем $n_2 = 1,8$. Изобразите циклы на диаграммах $p-v$ и $T-s$, совместив совпадающие точки.

Ответ: $l_K = 67$ кДж/кг; $\eta_t^K = 0,48$; $l = 36$ кДж/кг; $\eta_t = 0,37$.

Указание к выполнению заданию.

Для решения задач нужно воспользоваться лекционным материалом и материалом, приведенным в источнике «Теплотехника. Практикум» под редакцией В. Л. Ерофеева, А. С. Пряхина, с. 104 – 105. Для помощи студенту ниже приводятся примеры решения задач.

Пример 8.1. Определите параметры рабочего тела в характерных точках цикла Карно (рис. 8.1), работу и термический КПД, если цикл совершается в интервале температур от $t_1 = 700^\circ\text{C}$ до $t_2 = 50^\circ\text{C}$; максимальное давление цикла $p_{\max} = 7,0$ МПа и минимальное — $p_{\min} = 0,06$ МПа. Рабочее тело — воздух.

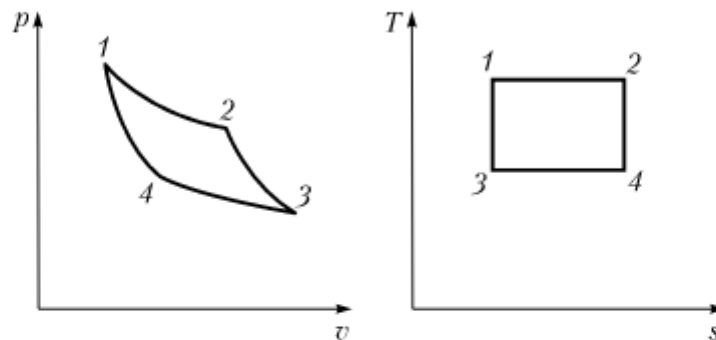


Рис. 8.1. Диаграммы $p-v$ и $T-s$ к примеру 8.1

Решение. Точки 1, 2, 3 и 4 на рис. 8.1 — это характерные точки цикла, т.е. точки пересечения кривых сопряженных процессов.

Из построения цикла на диаграммах $p-v$ и $T-s$ следует, что заданными являются следующие параметры: давления $p_1 = p_{\max}$ и $p_3 = p_{\min}$, а также температуры $T_1 = T_2$ и $T_3 = T_4$.

Поскольку цикл Карно ограничен двумя изотермами, обозначим температуру изотермы, по которой подводится теплота, через T_1 , а температуру изотермы, по которой теплота отводится, — через T_2 , вне зависимости от индексов, обозначающих точки.

Определим остальные параметры цикла в характерных точках.

Точка 1. Давление $p_1 = 7$ МПа, температура $t_1 = 700^\circ\text{C}$.

По уравнению состояния идеального газа находим удельный объем:

$$v_1 = \frac{RT_1}{p_1} = \frac{287 \cdot 973}{7 \cdot 10^6} = 0,0398 \text{ (м}^3\text{/кг)}.$$

Точка 2. Температура $t_2 = 700^\circ\text{C}$, так как точка 2 лежит на той же изотерме, что и температура t_1 .

Из соотношения параметров в адиабатном процессе 2—3 получаем давление:

$$p_2 = p_3 \left(\frac{T_1}{T_2} \right)^{\frac{k}{k-1}} = 0,06 \left(\frac{973}{323} \right)^{\frac{1,4}{1,4-1}} = 2,82 \text{ (МПа)}.$$

Удельный объем находим из соотношения параметров в изотермическом процессе 1–2:

$$v_2 = v_1 \frac{p_1}{p_2} = 0,0398 \cdot \frac{7 \cdot 10^6}{2,82 \cdot 10^6} = 0,099 \text{ (м}^3\text{/кг)}.$$

Точка 3. Давление $p_3 = 0,06$ МПа, температура $t_3 = 50^\circ\text{C}$.
Из уравнения состояния находим удельный объем:

$$v_3 = \frac{RT_3}{p_{13}} = \frac{287 \cdot 323}{0,06 \cdot 10^6} = 1,54 \text{ (м}^3\text{/кг)}.$$

Точка 4. По условию $t_4 = t_3$, т.е. минимальная температура в рассматриваемом цикле Карно $t_{\min} = 50^\circ\text{C}$.

Из соотношения параметров в адиабатном процессе 4–1 определим значение давления:

$$p_4 = p_1 \left(\frac{T_2}{T_1} \right)^{\frac{k}{k-1}} = 7 \left(\frac{323}{973} \right)^{\frac{1,4}{1,4-1}} = 0,149 \text{ (МПа)}.$$

Удельный объем находим из соотношения параметров в изотермическом процессе 3–4:

$$v_4 = v_3 \frac{p_3}{p_4} = 1,54 \cdot \frac{0,06 \cdot 10^6}{0,149 \cdot 10^6} = 0,618 \text{ (м}^3\text{/кг)}.$$

Параметры в характерных точках цикла Карно представлены в табл. 8.1.

Таблица 8.1

Параметры в характерных точках цикла Карно

Характерная точка цикла	p , МПа	v , м ³ /кг	t , °C
1	7,0	0,0398	700
2	2,82	0,099	700
3	0,06	1,54	50
4	0,149	0,618	50

Определяем количество подведенной теплоты:

$$q_1 = RT_1 \ln \frac{v_2}{v_1} = 0,287 \cdot 973 \ln \frac{0,099}{0,0398} = 254 \text{ (кДж/кг)}.$$

Находим количество отведенной теплоты:

$$|q_2| = RT_2 \ln \frac{v_3}{v_4} = 0,287 \cdot 323 \ln \frac{1,54}{0,618} = 84 \text{ (кДж/кг)}.$$

Работа цикла

$$L = q_1 - |q_2| = 254 - 84 = 170 \text{ (кДж/кг)}.$$

Термический КПД цикла

$$\eta_t^K = 1 - \frac{|q_2|}{q_1} = 1 - \frac{84}{254} = 0,668$$

или

$$\eta_t^K = 1 - \frac{T_2}{T_1} = 1 - \frac{323}{973} = 0,668.$$

Ответ: параметры в характерных точках цикла Карно см. в табл. 8.1; $l = 170$ кДж/кг; $\eta_t^K = 0,668$.

Пример 8.2. Определите термический КПД цикла Карно, в котором при адиабатном расширении давление изменяется в 10 раз. Рабочее тело — гелий.

Решение. Для определения термического КПД цикла Карно достаточно знать отношение абсолютных температур теплоотдатчика и теплоприемника, которое можно найти из соотношения между параметрами в адиабатном процессе:

$$\frac{T_2}{T_1} = \left(\frac{p_3}{p_2} \right)^{\frac{k}{k-1}} = \frac{1}{10^{\frac{1,67-1}{1,67}}} = 0,397.$$

Таким образом,

$$\eta_t^K = 1 - \frac{T_2}{T_1} = 1 - 0,397 = 0,603.$$

Ответ: $\eta_t^K = 0,603$.

Пример 8.3. Определите работу и термический КПД обобщенного цикла Карно, состоящего из двух изотерм и двух изобар, если известно, что удельная энтропия рабочего тела уменьшается при изобарном сжатии на $\Delta s = 0,5$ кДж/(кг·К), а при изотермическом сжатии — на $\Delta s = 0,9$ кДж/(кг·К). Температура теплоотдатчика равна $t_1 = 260^\circ\text{C}$. Рабочее тело — азот.

Решение. Изобразим цикл на диаграммах $p\bar{v}$ и Ts (рис. 8.2).

Так как изобары 4—1 и 2—3 являются эквидистантными кривыми, то заштрихованные на диаграмме Ts площадки 4—1—4' и 3—2—3' равны, а следовательно, площадь 1—2—3—4 равна площади 1—2—3'—4', т.е. работу цикла можем определить из выражения

$$l = q_1 - |q_2| = (T_1 - T_2)(s_2 - s_1).$$

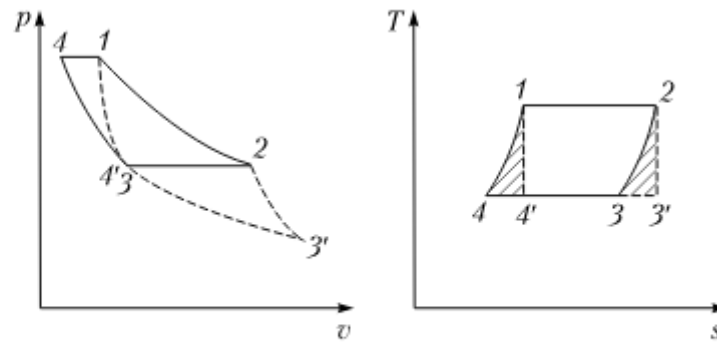


Рис. 8.2. Диаграммы $p-v$ и Ts к примеру 8.3

Вследствие эквидистантности изобар

$$s_2 - s_3 = s_1 - s_2,$$

т.е.

$$s_2 - s_1 = s_3 - s_4 = \Delta s_{2-1},$$

поэтому

$$l = (T_1 - T_2)\Delta s_{2-1}.$$

Температуру T_2 определим из уравнения изобары на диаграмме Ts :

$$\ln \frac{T_1}{T_2} = \frac{|\Delta s_{3-2}|}{\frac{\mu c_p}{\mu}} = \frac{0,5}{\frac{29,0}{28}} = 0,482;$$

$$\frac{T_1}{T_2} = 1,62.$$

Тогда

$$T_2 = \frac{T_1}{1,62} = \frac{533}{1,62} = 300 \text{ (K)}.$$

Удельная работа цикла

$$l = (T_1 - T_2)\Delta s_{2-1} = (533 - 300) \cdot 0,9 = 184 \text{ (кДж/кг)}.$$

Термический КПД обобщенного цикла Карно

$$\eta_t = 1 - \frac{T_2}{T_1} = 1 - \frac{300}{533} = 0,38.$$

Ответ: $l = 184$ кДж/кг; $\eta_t = 0,38$.

Пример 8.4. Определите термический КПД цикла, состоящего из изохоры $1-2$, адиабаты расширения $2-3$ и изотермы сжатия $3-1$ (рис. 8.3). Степень сжатия $\varepsilon = v_3/v_1 = 5$. Рабочее тело — воздух. Определите термический КПД цикла Карно, который совершается в том же интервале температур. Изобразите циклы на диаграммах $p-v$ и Ts .

Решение. По изохоре 1–2 подводится теплота

$$q_1 = c_v(T_2 - T_1),$$

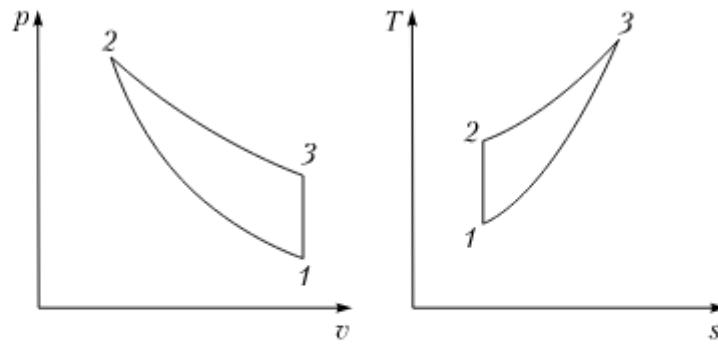


Рис. 8.3. Диаграммы $p-v$ и $T-s$ к примеру 8.4

по изотерме 3–1 отводится теплота

$$|q_2| = RT_3 \ln \frac{v_3}{v_1} = RT_1 \ln \frac{v_3}{v_1}.$$

Термический КПД цикла

$$\eta_t = 1 - \frac{|q_2|}{q_1} = 1 - \frac{RT_1 \ln \frac{v_3}{v_1}}{c_v(T_2 - T_1)} = 1 - \frac{R \ln \frac{v_3}{v_1}}{c_v \left(\frac{T_2}{T_1} - 1 \right)}.$$

Отношение температур можно определить из соотношения между параметрами в адиабатном процессе:

$$\frac{T_1}{T_2} = \left(\frac{v_3}{v_2} \right)^{k-1} = 5^{1,4-1} = 1,9.$$

Таким образом, термический КПД цикла

$$\eta_t = 1 - \frac{R \ln \frac{v_2}{v_1}}{\frac{\mu c_v}{\mu} \left(\frac{T_2}{T_1} - 1 \right)} = 1 - \frac{0,287 \cdot \ln 5}{\frac{20,8}{29} (1,9 - 1)} = 0,283.$$

Термический КПД цикла Карно

$$\eta_t^K = 1 - \frac{T_2}{T_1} = 1 - \frac{1}{1,9} = 0,474.$$

Ответ: $\eta_t = 0,283$; $\eta_t^K = 0,474$.

Пример 8.5. Цикл состоит из адиабаты сжатия 1–2, политропы расширения 2–3 и изохоры 3–1 (рис. 8.4). Определите термический КПД и работу цикла, если температура в начале сжатия $t_1 = 0^\circ\text{C}$, температура в конце расширения $t_3 = 400^\circ\text{C}$, степень сжатия $\epsilon = 5,5$. Рабочее тело — воздух. Изобразите цикл на диаграммах $p-v$ и $T-s$.

Решение. В диаграмме $p-v$ соединить точки 2 и 3 можно политропами I и II групп. В диаграмме $T-s$ эти же точки соединяются политропами I и III групп. Следовательно, можно применить политропу только I группы, что в дальнейшем можно проверить по найденному показателю политропы.

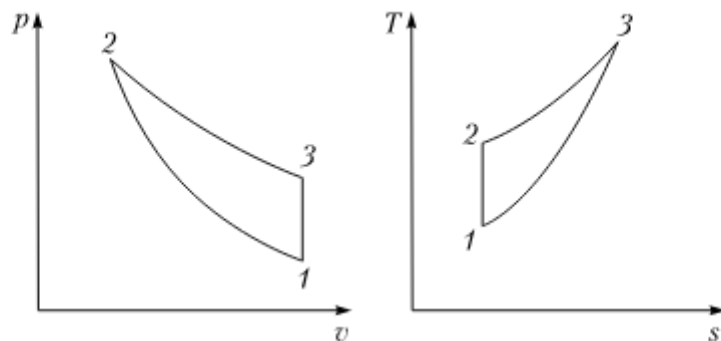


Рис. 8.4. Диаграммы $p-v$ и $T-s$ к примеру 8.5

Температуру в точке 2 определим из соотношения параметров в адиабатном процессе:

$$T_2 = T_1 \left(\frac{v_1}{v_2} \right)^{k-1} = T_1 \epsilon^{k-1} = 273 \cdot 5,5^{1,4-1} = 540 \text{ (К)}.$$

Показатель политропы найдем из соотношения параметров в процессе 2–3:

$$\frac{T_2}{T_3} = \left(\frac{v_3}{v_2} \right)^{n-1} = \epsilon^{n-1},$$

откуда

$$n = 1 + \frac{\ln \frac{T_2}{T_3}}{\ln \epsilon} = 1 + \frac{\ln \frac{540}{673}}{\ln 5,5} = 0,87,$$

т.е. как и предполагали, получили политропу I группы.

Поскольку теплота в цикле подводится в политропном процессе 2–3, определим ее по формуле

$$q_1 = c_v \frac{n-k}{n-1} (T_3 - T_2);$$

$$q_1 = \frac{20,8}{29} \cdot \frac{0,87 - 1,4}{0,87 - 1} (673 - 540) = 389 \text{ (кДж/кг)}.$$

Отведенная теплота (изохорный процесс)

$$|q_2| = c_v (T_3 - T_1) = \frac{20,8}{29} \cdot (673 - 273) = 286 \text{ (кДж/кг)}.$$

Работа цикла

$$l = q_1 - |q_2| = 389 - 286 = 103 \text{ (кДж/кг)}.$$

Термический КПД цикла

$$\eta_t = 1 - \frac{|q_2|}{q_1} = 1 - \frac{286}{389} = 0,265.$$

Ответ: $\eta_t = 0,265$; $l = 103 \text{ кДж/кг}$.

Занятие 9 (2 ч.) Тема «Второе начало термодинамики для необратимых процессов. Закон возрастания энтропии»

Задание. Решение задач.

9.1. Адиабатно изолированная система состоит из двух тел, имеющих разные температуры. От первого тела температурой $T_1 = 1500 \text{ К}$ передается теплота $Q = 600 \text{ кДж}$ телу температурой T_2 . Определите приращение энтропии системы вследствие термической необратимости, если $T_2 = 1200$; 900 ; 600 и 300 К .

Ответ: $\Delta S_c = 0,1$; $0,27$; $0,6$ и $1,6 \text{ кДж/(кг} \cdot \text{К)}$. Приращение энтропии системы тем больше, чем больше разность температур, а следовательно, и степень необратимости процесса.

9.2. В регенеративном воздухоподогревателе газотурбинной установки теплота в количестве $Q = 220 \text{ кДж/кг}$ передается от газов, отработавших в газовой турбине, к воздуху. Средняя температура газов $T_{г.ср} = 440 \text{ К}$, воздуха $T_{возд.ср} = 360 \text{ К}$. Определите приращение энтропии системы вследствие необратимости теплообмена при конечной разности температур.

Ответ: $\Delta s = 0,167 \text{ кДж/(кг} \cdot \text{К)}$.

9.3. Определите изменение энтропии системы, состоящей из двух однородных тел, в процессе выравнивания их температур. Первое тело массой $M_1 = 5 \text{ кг}$ имеет температуру $t_1 = 20^\circ\text{С}$, второе тело массой $M_2 = 2 \text{ кг}$ имеет температуру $t_2 = 1000^\circ\text{С}$. Массовая теплоемкость обоих тел $c = 0,1 \text{ кДж/(кг} \cdot \text{К)}$.

Ответ: $\Delta s = 0,114 \text{ кДж/(кг} \cdot \text{К)}$.

9.4. В цилиндре дизеля топливо сгорает при очень высокой температуре ($t_{ц} = 1800^\circ\text{С}$ и выше), поэтому стенки цилиндра охлаждаются с внешней стороны водой. Температура горячей воды на выходе из двигателя $t_{г.в} = 80^\circ\text{С}$, а при входе — $t_{см} = 70^\circ\text{С}$. Последняя получается путем подмешивания к горячей воде воды, охлажденной до температуры $t_{х.в} = 40^\circ\text{С}$. Определите требуемые соотношения между количеством горячей $M_{г.в}$ и охлажденной $M_{х.в}$ воды для получения заданной температуры смеси $t_{см}$ и возрастание энтропии ΔS_c от необратимости смешения при конечной разности температур в расчете на 1 кг холодной воды. Теплоемкость воды принять $c = 4,19 \text{ кДж/(кг} \cdot \text{К)}$.

Ответ: $M_{г.в} / M_{х.в} = 3 \text{ кг/кг}$; $\Delta S_c = 1872 \text{ кДж/К}$.

9.5. Два баллона соединены между собой трубкой с краном, предварительно закрытым. В первом баллоне, емкость которого в 2 раза больше второго, находится воздух при некотором произвольном давлении. Из второго баллона воздух удален до полного вакуума. После открытия крана воздух перетекает во второй баллон до полного выравнивания давлений. Определите приращение энтропии 1 кг воздуха от необратимости процесса расширения без производства работы. Теплообменом с окружающей средой пренебречь.

Ответ: $\Delta S = 0,1165 \text{ кДж}/(\text{кг} \cdot \text{К})$.

9.6. Углекислый газ массой $M_{\text{CO}_2} = 22 \text{ кг}$ и воздух массой $M_{\text{возд}} = 48 \text{ кг}$, находившиеся предварительно в одинаковом термодинамическом состоянии, смешиваются при постоянном давлении. Определите приращение энтропии от необратимости процесса смешения, считая оба газа идеальными.

Ответ: $\Delta s = 9,71 \text{ кДж}/(\text{кг} \cdot \text{К})$.

9.7. Вода массой $M_1 = 12 \text{ кг}$ температурой $t_1 = 90^\circ\text{C}$ смешивается с водой массой $M_2 = 8 \text{ кг}$ температурой $t_2 = 10^\circ\text{C}$. Определите приращение энтропии системы ΔS_c , принимая теплоемкость воды $c = 4,19 \text{ кДж}/(\text{кг} \cdot \text{К})$. Найдите приращения энтропии $\Delta S'_c$ и $\Delta S''_c$, получающиеся при передаче соответственно первой и второй половин теплоты. Объясните, почему последние две величины не оказались равными при условии, что количество передаваемой теплоты одно и то же.

Ответ: $S_c = 0,604 \text{ кДж}/\text{К}$; $\Delta S'_c = 0,458 \text{ кДж}/\text{К}$; $\Delta S''_c = 0,146 \text{ кДж}/\text{К}$.

9.8. В котельном воздухоподогревателе к воздуху подводится теплота от газообразных продуктов сгорания топлива. Температура воздуха изменяется от $t_{\text{возд. I}} = 25^\circ\text{C}$ до $t_{\text{возд. II}} = 125^\circ\text{C}$ при средней теплоемкости $c_p = 1,009 \text{ кДж}/(\text{кг} \cdot \text{К})$. Температура газов изменяется от $t_{\text{Г I}} = 400^\circ\text{C}$ до $t_{\text{Г II}} = 305^\circ\text{C}$. Определите средние температуры подвода и отвода теплоты и приращения энтропии вследствие необратимости процесса Δs_c для системы «воздух — продукты сгорания» в расчете на 1 кг воздуха. Потерями в окружающую среду пренебречь. Принять $q_{\text{возд}} = q_{\text{Г}}$.

Ответ: $T_{\text{возд}} = 347 \text{ К}$; $T_{\text{Г}} = 623 \text{ К}$; $\Delta s_c = 0,1291 \text{ кДж}/(\text{кг} \cdot \text{К})$.

9.9. Определите эксергию теплоты $Q = 1000 \text{ кДж}$ при различных температурных потенциалах: 2000, 1000 и 500 К. Температура окружающей среды $T_0 = 293 \text{ К}$. Представьте для всех случаев эксергию теплоты на диаграмме Ts в следующем масштабе: температура — 1 мм = 40 К; энтропия — 1 мм = 0,05 кДж/К.

Ответ: $Ex = 853,5 \text{ кДж}$; $Ex = 707 \text{ кДж}$; $Ex = 414 \text{ кДж}$.

9.10. Определите эксергию теплоты, выделяющейся при полном сгорании топлива массой $M = 1 \text{ кг}$, при следующих условиях: теплота сгорания $Q = 32000 \text{ кДж}/\text{кг}$, сгорание происходит при температуре $t_1 = 1100^\circ\text{C}$ в атмосферных условиях $p_0 = 0,1 \text{ МПа}$ и $t_0 = 27^\circ\text{C}$. Полную теплоемкость продуктов сгорания 1 кг топлива принять постоянной.

Ответ: $Ex = 18\,380 \text{ кДж}$ или 57,4% теплоты сгорания топлива. Остальные 42,6% представляют непревратимую теплоту, передаваемую окружающей среде.

9.11. Теплота $Q_1 = 600$ кДж передается от источника теплоты температурой $T_1 = 900$ К к телу температурой $T_2 = 600$ К. Температура окружающей среды $T_0 = 300$ К. Определите потерю эксергии и представьте величину потерь графически на диаграмме Ts .

Ответ: $\Delta Ex = 100$ кДж.

9.12. В двухконтурном котле с разными давлениями пар конденсируется при постоянной температуре $t_1 = 310^\circ\text{C}$, а вода второго контура испаряется при температуре $t_2 = 200^\circ\text{C}$. Количество переданной теплоты $Q = 1000$ кДж. Определите потерю эксергии теплоты, если температура окружающей среды $t_0 = 10^\circ\text{C}$. Потерями теплоты в окружающую среду пренебречь.

Ответ: $\Delta ex = 113,2$ кДж/кг.

9.13. Определите потери эксергии теплоты в паровом котле при следующих данных: средняя температура газов в котле $t_1 = 800^\circ\text{C}$; средняя температура воды и пара, получающих теплоту от продуктов сгорания, $t_2 = 250^\circ\text{C}$. Температура окружающей среды $t_0 = 17^\circ\text{C}$. Количество теплоты, подводимой к 1 кг нагреваемой среды, $q = 2800$ кДж/кг.

Ответ: $\Delta ex = 796$ кДж/кг.

9.14. Определите потери эксергии теплоты при конденсации пара, отработавшего в судовой турбине. Температура пара при конденсации $t_{\text{конд}} = 42^\circ\text{C}$, средняя температура охлаждающей воды $t_{\text{охл.ср}} = 20^\circ\text{C}$. Температура окружающей среды (заборной воды) $t_0 = 12^\circ\text{C}$. Количество отводимой теплоты $q = 2400$ кДж/кг.

Ответ: $\Delta ex = 160$ кДж/кг.

9.15. В топке парового котла теплота $Q = 1000$ кДж передается от газов температурой $T_g = 1500$ К к воде температурой $T_v = 500$ К. Температура окружающей среды $T_0 = 290$ К. Определите эксергию теплоты до перехода ее к воде, после перехода к воде и потерю эксергии вследствие необратимости теплообмена при конечной разности температур.

Ответ: $Ex_g = 806,7$ кДж; $Ex_v = 420$ кДж; $\Delta Ex = 386,7$ кДж.

9.16. Углекислый газ находится в потоке при давлении $p_1 = 1,0$ МПа при температуре $T_1 = 600$ К. Определите его эксергию (на 1 кг), если давление окружающей среды $p_0 = 0,1$ МПа и температура $T_0 = 293$ К. Представьте эксергию графически на диаграмме Ts .

Ответ: $ex = 212$ кДж/кг.

9.17. Воздух с параметрами окружающей среды $p_0 = 0,1$ МПа и $t_0 = 2^\circ\text{C}$ поступает в компрессор, где сжимается до абсолютного давления $p_{\text{абс}} = 1$ МПа. При этом его температура оказывается равной $t_1 = 200^\circ\text{C}$. Определите приращение эксергии потока воздуха в конце сжатия и в случае его охлаждения при постоянном давлении до начальной температуры. Представьте эксергию схематически на диаграмме Ts . Теплоемкость $c_p = 1,01$ кДж/(кг·К) считать постоянной.

Ответ: поскольку состояние перед сжатием отвечает состоянию окружающей среды, приращение эксергии равно эксергии воздуха в конце сжатия: $ex = ex = 234$ кДж/кг при $t = 200^\circ\text{C}$; $\Delta ex = ex = 194$ кДж/кг при $t_1 = 20^\circ\text{C}$.

9.18. Воздух, поступающий из окружающей среды при давлении $p_0 = 0,1$ МПа и температуре $t_0 = 20^\circ\text{C}$, адиабатно сжимается в компрессоре до абсолютного давления $p_{\text{абс}} = 0,6$ МПа. Определите приращение эксергии потока воздуха в процессе сжатия. Найдите потерю эксергии в процессе охлаждения сжатого воздуха до температуры окружающей среды. Каково соотношение между затраченной работой и величиной эксергии сжатого неохлажденного воздуха? Теплоемкость $c_p = 1,01$ кДж/(кг·К) считать постоянной.

Ответ: $ex = 196$ кДж/кг; после охлаждения $ex = 151$ кДж/кг; $\Delta ex = 45$ кДж/кг.

9.19. Отрабатывшие газы дизеля перед выпуском их из цилиндра имеют температуру $t_1 = 460^\circ\text{C}$ при давлении $p_1 = 0,4$ МПа. Определите их эксергию перед началом выпуска и потерю эксергии в процессе выпуска вследствие расширения без производства работы (дросселирование) до давления окружающей среды $p_0 = 0,1$ МПа. Температуру окружающей среды принять равной $t_0 = 20^\circ\text{C}$, $c_p = 1,02$ кДж/(кг·К). Представьте процесс на диаграмме Ts и покажите на ней эксергию перед началом выпуска, после выпуска и потерю эксергии.

Ответ: $ex = 291$ кДж/кг; $\Delta ex = 116$ кДж/кг.

9.20. В регенеративном воздухоподогревателе газотурбинной установки воздух нагревается от температуры $t_1 = 140^\circ\text{C}$ до температуры $t_2 = 270^\circ\text{C}$. Отрабатывшие газы, передающие теплоту воздуху, охлаждаются от температуры $t_3 = 340^\circ\text{C}$ до температуры $t_4 = 210^\circ\text{C}$. Газ обладает свойствами воздуха и имеет одинаковый с ним массовый расход. Определите потери эксергии на 1 кг газа и эксергетический КПД. Теплоемкость считать постоянной. Тепловыми и гидравлическими потерями пренебречь.

Ответ: $\Delta ex = 10,3$ кДж/кг; $\eta_{ex} = 0,83$.

Указание к выполнению заданию.

Для решения задач нужно воспользоваться лекционным материалом и материалом, приведенным в источнике «Теплотехника. Практикум» под редакцией В. Л. Ерофеева, А. С. Пряхина, с. 116 – 118. Для помощи студенту ниже приводятся примеры решения задач.

Пример 9.1. Необратимый цикл Карно (рис. 9.2) совершается в пределах температур $t_1 = 477^\circ\text{C}$ и $t_2 = 27^\circ\text{C}$. Теплообмен между рабочим телом и источниками теплоты совершается при конечной разности температур $t = 80^\circ\text{C}$. Изменение состояния рабочего тела происходит внутренне обратимо. В цикле подводится теплота $Q_1 = 600$ кДж. Определите: 1) значение интеграла Клаузиуса $\oint \frac{dQ}{T}$; 2) приращение энтропии системы.

Решение

1. Для цикла Карно интеграл Клаузиуса

$$\oint \frac{dQ}{T} = \frac{Q_1}{T_1} + \frac{Q_2}{T_2}.$$

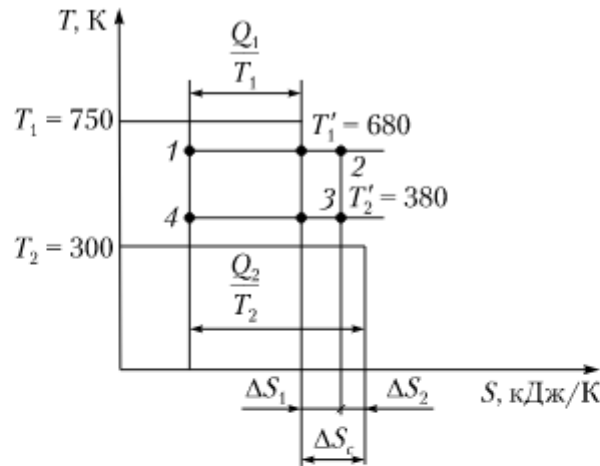


Рис. 9.2. Диаграмма Ts к примеру 9.1

Знаки Q_1 и Q_2 определяются здесь по отношению к рабочему телу, T_1 и T_2 существенно положительны, поэтому

$$\begin{aligned} Q_1/T_1 &> 0; \\ Q_2/T_2 &< 0. \end{aligned}$$

Сначала находим неизвестную величину Q_2 через КПД цикла. Для термически необратимого цикла, при том что рабочее тело изменяет свое состояние внутренне обратимо, КПД цикла η_t выражается через температуры рабочего тела T_1 и T_2 при подводе и отводе теплоты.

По условию задачи (рис. 9.2)

$$\begin{aligned} T'_1 &= T_1 - T = 750 - 80 = 670 \text{ (К)}; \\ T'_2 &= T_2 + T = 300 + 80 = 380 \text{ (К)}. \end{aligned}$$

Следовательно,

$$\eta_t = 1 - \frac{T'_1}{T'_2} = 1 - \frac{300}{670} = 0,433.$$

Количество отведенной теплоты (по абсолютной величине)

$$|Q_2| = Q_1(1 - \eta_t) = 600 \cdot (1 - 0,433) = 340 \text{ (кДж)}.$$

Значит,

$$Q_2 = -340 \text{ (кДж)}.$$

Тогда интеграл Клаузиуса

$$\oint \frac{dQ}{T} = \frac{600}{740} + \frac{340}{300} = -0,333 \text{ (кДж/К)}.$$

2. Энтропия есть функция состояния, поэтому ее приращение для рабочего тела, совершающего круговой процесс, равно нулю. Приращение энтропии теплоотдатчика, от которого теплота отводится ($Q_1 < 0$),

$$\Delta S_1 = \frac{Q_1}{T_1} = \frac{-600}{750} = -0,800 \text{ (кДж/К)}.$$

К теплоприемнику теплота подводится ($Q_2 > 0$), поэтому

$$\Delta S_2 = \frac{Q_2}{T_2} = \frac{340}{300} = 1,133 \text{ (кДж/К)}.$$

Приращение энтропии системы

$$\Delta S_c = \Delta S_1 - \Delta S_2 = -0,800 + 1,133 = 0,333 \text{ (кДж/К)}.$$

Таким образом установлено, что вследствие необратимости процесса, как и предполагалось,

$$\oint \frac{dQ}{T} < 0;$$

$$\Delta S_c > 0.$$

Ответ: $\oint \frac{dQ}{T} = -0,333 \text{ кДж/К}; \Delta S_c = 0,333 \text{ кДж/К}.$

Пример 9.2. Адиабатно изолированная система состоит из двух тел одинаковой массы $M = 10 \text{ кг}$, но разной температуры. От первого тела температурой $T'_1 = 1000 \text{ К}$ передается теплота $Q = 920 \text{ кДж}$ второму телу температурой $T''_1 = 500 \text{ К}$. Удельные теплоемкости одинаковы и равны $c = 0,46 \text{ кДж/(кг} \cdot \text{К)}$. Определите приращение энтропии системы вследствие термической необратимости. Каково было бы приращение энтропии, если бы тела обладали теплоемкостью $c \rightarrow \pm \infty$.

Решение. Температуру тел в конце процесса определяем по формуле (с соответствующими индексами)

$$T'_2 = T'_1 + \frac{Q}{Mc}.$$

Так как для первого тела $Q = -920 \text{ кДж}$, то

$$T'_2 = 1000 + \frac{-920}{10 \cdot 0,46} = 800 \text{ (К)}.$$

Для второго тела $Q = +920 \text{ кДж}$, и

$$T''_2 = 500 + \frac{920}{10 \cdot 0,46} = 700 \text{ (К)}.$$

Приращение энтропии первого тела

$$\Delta S' = Mc \ln \frac{T'_2}{T'_1} = 10 \cdot 0,46 \cdot \ln \frac{800}{1000} = -1,028 \text{ (кДж/К)}.$$

Приращение энтропии второго тела

$$\Delta S'' = Mc \ln \frac{T''_2}{T''_1} = 10 \cdot 0,46 \cdot \ln \frac{700}{500} = 1,549 \text{ (кДж/К)}.$$

Приращение энтропии системы

$$S_c = \Delta S' - \Delta S'' = -1,028 + 1,549 = 0,521 \text{ (кДж/К)}.$$

Если бы теплоемкости тел $c \rightarrow \pm\infty$, то температура тел при отводе и подводе теплоты не изменялась бы. В этом случае изменение энтропии определяется по формуле

$$\Delta S = \frac{Q}{T}.$$

Для первого и второго тела получили бы соответственно

$$\Delta S' = \frac{-920}{1000} = -0,92 \text{ (кДж/К)};$$

$$\Delta S'' = \frac{920}{500} = 1,84 \text{ (кДж/К)}.$$

Приращение энтропии системы

$$S_c = \Delta S' - \Delta S'' = -0,92 + 1,84 = 0,92 \text{ (кДж/К)}.$$

Ответ: $\Delta S_c = 0,521 \text{ кДж/К}$; $\Delta S_c = 0,92 \text{ кДж/К}$ при $c \rightarrow \pm\infty$.

4.5. Практические, их наименование, содержание и объем в часах
Учебным планом не предусмотрены.

4.6. Примерная тематика курсовых проектов (курсовых работ)
Учебным планом не предусмотрены.

5. Содержание и объем самостоятельной работы студентов

ТЕМЫ ДИСЦИПЛИНЫ ДЛЯ САМОСТОЯТЕЛЬНОГО ИЗУЧЕНИЯ

1. Критический режим течения, критические параметры. Сверхкритический режим истечения. Сопло Лавалья.
2. Реальные газы, их свойства. Уравнение состояния Ван-дер-Ваальса.
3. Цикл Ренкина, его термический КПД. Влияние основных параметров на КПД цикла Ренкина.
4. Методы анализа эффективности циклов теплосиловых установок.
5. 22. Конвективный теплообмен. Закон Ньютона-Рихмана.
6. Типы теплообменных аппаратов. Основные расчетные уравнения.
7. Виды и характеристики топлив. Основы теории горения.
8. Котельные установки. Охрана окружающей среды от выбросов котельных агрегатов.
9. Общие сведения о теплоснабжении.
10. Энергосберегающие технологии. Виды и использование вторичных теплоэнергетических ресурсов.

№ п/п	Разделы и темы РП самостоятель- ного изучения	Перечень домашних заданий и других вопросов для самостоятельного изучения	Объем в часах / трудоемкость в з.е.
1.	РАЗДЕЛ 1. ТЕРМОДИ- НАМИКА Тема 1. Тео- рия теплопро- водности.	Вопросы для самоконтроля 1. В чем заключается сущность термодинамического метода исследований? Каковы области его применения? 2. Какие существуют параметры состояния идеального газа? Запишите уравнения состояния. 3. Какие существуют виды взаимодействия? Какие физические величины относятся к потенциалам, а какие – к координатам? 4. Что такое теплоемкость рабочего тела? От каких факторов она зависит? 5. Какие существуют способы вычисления теплоемкости? Дайте пояснения к каждому способу. 6. Назовите термодинамические потенциалы, их физический смысл, возможности использования. 7. Какие существуют функции состояния и функции процесса? 8. Поясните, что включается в понятия «рабочая» и «тепловая» диаграммы. 9. В чем заключается сущность первого начала термодинамики? запишите его выражение для закрытой системы. 10. В чем заключается физический смысл первого начала термодинамики для открытой системы? Укажите силы и составляющие работы потока. 11. Укажите качественные характеристики энергии. 12. Какие три рода превращения энергии существуют? 13. В чем заключается физический смысл второго начала термодинамики?	4

2.	Тема 2. Термодинамические процессы.	1. Укажите условия протекания равновесных и неравновесных процессов. В чём заключается целесообразность подобного разделения? 2. Каковы общие принципы и этапы исследования частных термодинамических процессов? 3. Запишите уравнение адиабатного процесса в системах координат PV и TS. 4. . Что такое политропные процессы? В чём заключается смысл их логарифмического представления? 5. Укажите три группы политропных процессов. Каков порядок их исследования? Приведите схемы преобразования энергии, а также рабочую и тепловую диаграмму этих процессов. 6. Дайте определение терминам «статическое равновесие» и «динамическое равновесие». Изобразите фазовую диаграмму для воды. 7. Изобразите is-диаграмму для воды и водяного пара. Как показать на диаграмме частные процессы с водой и водяным паром? 8. Дайте определение терминам «температура точки росы», «абсолютная влажность воздуха» и «относительная влажность воздуха». 9. Какова физика процессов смешения, охлаждения и подогрева влажного воздуха.	4
3.	Тема 3. Рабочий процесс в турбине и компрессоре	1. Объясните природу преобразование энергии в турбине (на базе анализа первого начала термодинамики для открытой системы). 2. Объясните природу преобразования энергии в компрессоре. 3. В каких случаях и с какой целью применяют одноступенчатые и многоступенчатые компрессоры? 4. В чём заключается различие между адиабатном и изотермическом КПД? 5. Изобразите принципиальную схему газотурбинные установки.	4

4.	Тема 4. Термодинамика газовых потоков.	1. Объясните преобразование энергии в потоке упругой жидкости без производство технической работы. 2. Какие существуют параметры торможения? 3. Дайте объяснение природе преобразования энергии в соплах и диффузорах (на примере исследования первого закона термодинамики для открытой системы). 4. Какие известные типы энергетических воздействий на поток упругой жидкости? 5. Какие существуют формы каналов сопел и диффузоров при геометрическом воздействии на поток? 6. Каково назначение сопла Лаваля? 7. Дайте определение закона обращения воздействия на поток. Приведите схемы составляющих сопел. В чём заключаются особенности работы сопел при нерасчетных параметрах? 8. Что такое скачки уплотнения?	4
5.	Тема 5. Циклы теплоэнергетических установок.	1. Что такое цикл теплоэнергетических установок? Что является показателем их энергетической эффективности? 2. Что понимают под обратными циклами холодильных машин и тепловых насосов? Как они представляются в рабочей и тепловой системах координат? 3. Что такое цикл Карно? Как он представляется в системах координат PV и Ts? Укажите основные свойства цикла Карно и его назначение. 4. Что такое индикаторные диаграммы двигателей внутреннего сгорания и индикаторный КПД? Запишите формулу для определения индикаторного КПД. 5. Каким образом осуществляется переход от реальных индикаторных диаграмм к идеальным циклам ДВС? Какие допущения и какой КПД, учитывающий этот переход, принимаются? 6. Изобразите схему и запишите КПД, учитывающие преобразование энергии от первичного источника (топлива) до конечного потребителя. 7. Выполните вывод формулы термических КПД идеальных циклов (Отто, Дизеля, Тринклера, Стирлинга). 8. Какие существуют циклы газотурбинных установок? Что такое регенерация теплоты, её назначение? 9. Выполните сравнительный анализ идеальных циклов ДВС и ГТУ при постоянной степени сжатия и в заданном интервале температур. 10. Изобразите идеальный цикл парозергетической установки – цикл Ренкина. Дайте его описание. 11. Какие существуют направления повышения КПД цикла Ренкина? Что такое теплофикационный цикл? 12. Каковы пределы повышения энергетической эффективности теплового двигателя в заданном интервале температур и давлений?	4

6.	Тема 6. Термодинамический анализ теплотехнических устройств.	1. Как формулируется Закон возрастания энтропии в следствие необратимости любого реального процесса? 2. Какова связь между необратимостью и производством работы: причины, мера, следствие? 3. Запишите формулу Гюи – Стодола. 4. Объясните природу энтропийного и энергетического методов анализа необратимости. 5. В чём заключается разница между тепловым и эксергетическим балансами теплоэнергетических установок? 6. Что такое «вторичные энергетические ресурсы»? В чём заключается их влияние на повышение энергетической эффективности теплового двигателя?	4
7.	РАЗДЕЛ 2. ТЕОРИЯ ТЕПЛОПРОВОДНОСТИ. Тема 1. Теория теплопроводности.	1. Какими способами может передаваться теплота? 2. В чем состоит физическая сущность процесса теплопроводности? 3. Напишите уравнение стационарного одномерного температурного поля. 4. Что называется температурным градиентом? 5. В какую сторону направлен вектор градиента температур? 6. На что указывает знак «минус» в уравнении Фурье? 7. что называют коэффициентом теплопроводности? 8. Какие допущения приняты при выводе дифференциального уравнения теплопроводности? 9. Зачем нужны условия однозначности? 10. Какие величины задаются при граничных условиях первого рода? 11. Что включают в себя граничные условия? 12. Запишите закон охлаждения Ньютона. 13. Дайте математическую формулировку граничных условий третьего рода.	4
8.	Тема 2. Конвективный теплообмен.	1. В чём разница между конвекцией и конвективным теплообменом? 2. Что называется теплоотдачей? 3. Что влияет на распределение температур в потоке? 4. Что такое пограничный слой жидкости? 5. Запишите основное расчетное уравнение конвективного теплообмена. 6. Что называется коэффициентом теплоотдачи? 7. От каких основных факторов зависит коэффициент теплоотдачи? 8. Какие уравнения входят в систему дифференциальных уравнений, описывающих конвективный теплообмен? 9. Что является теоретической базой современного эксперимента? 10. При каких условиях понятие о подобии может быть распространено на физические процессы?	4

		11. Что необходимо знать при проведении эксперимента? 12. Каковы практические следствия из трех теорем подобия? 13. Приведите основные критерии гидромеханического подобия. 14. Приведите основные критерии теплового подобия. 15. Объясните физический смысл критериев Рейнольдса и Грасгофа. 16. Почему критерий Нуссельта является определяемым? 17. Запишите общий вид критериального уравнения для свободной конвекции в стационарном режиме. 18. Что называется определяющей температурой? 19. Что называется определяющим геометрическим размером?	
9.	Тема 3. Теплообмен при вынужденном и свободном движении теплоносителей.	1. Что называется участком гидродинамической стабилизации? 2. Чему равна длина участка тепловой стабилизация при движении потока в прямых гладких трубах? 3. Назовите два режима течения при ламинарном потоке жидкости. 4. Изобразите распределение скоростей по сечению при турбулентном режиме течения жидкости в трубе. 5. Что учитывает в критериальных уравнениях отношение критериев Прандтля, взятых при температурах потока и стенки? 6. Как учитывается изменение температуры для коротких труб по сравнению со стабилизированным потоком? 7. Изобразите изменение локального α и среднего $\bar{\alpha}$ коэффициентов теплоотдачи по длине трубы. 8. Что необходимо учитывать при температурном расчёте змеевиков? 9. В каких случаях проводят расчет эквивалентного диаметра? 10. Почему в лобовой точке трубы при поперечном обтекании коэффициента теплоотдачи максимален? 11. Изобразите изменение коэффициента теплоотдачи по окружности цилиндра при различных числах Рейнольдса. 12. За счёт чего при поперечном обтекании возрастает коэффициент теплоотдачи на тыльной стороне трубы? 13. Изобразите схему расположения труб в коридорных и шахматных пучках. 14. Почему для шахматного пучка труб теплоотдача выше, чем для коридорного? 15. В чём состоит основное преимущество коридорного пуска труб? 16. Как рассчитывается скорость потока для пучков труб? 17. Что является определяющим геометрическим размером при свободном движении потока вдоль вертикальной стенки? 18. Чем объясняется высокая теплоотдача при кипении жидкости?	4

		19. В чём заключается особенность пленочного режима кипения? 20. Назовите особенности конвективного теплообмена при конденсации пара.	
10.	Тема 4. Тепловое излучение.	1. Какие преобразования энергии происходят при тепловом излучении? 2. Назовите основное преимущество лучистого теплообмена. 3. Что такое диатермическое тела? 4. Какие реальные тела близких абсолютно черному телу? 5. Какие тела называют серыми? 6. Назовите основные законы излучения. 7. Что устанавливает закон Кирхгофа? 8. Все ли газы способны излучать и поглощать тепловую энергию? 9. Что такое линейчатый спектр поглощения? 10. В чём состоит механизм парникового эффекта? 11. Во сколько раз уменьшается тепловое излучение при установке защитных экранов?	6
11.	Тема 5. Теплопередача	1. Что называется процессом теплопередачи? 2. Что является качественной характеристикой процесса теплопередачи? 3. Какие величины задаются при граничных условиях третьего рода для процесса теплопередачи через стенку? 4. В чём разница между коэффициентами теплоотдачи и теплопередачи? 5. Запишите формулу коэффициента теплопередачи для многослойной плоской плёнки. 6. Какая величина называется полным термическим сопротивлением? 7. Проанализируйте формулу коэффициента теплопередачи для однослойной плоской стенки с целью определения путей его увеличения повышение (интенсивности теплообмена). 8. Какие материалы используют для теплоизоляции? 9. От чего зависит критический диаметр изоляции? 10. К чему может привести использование увлажненного изоляционного материала?	6
12.	Тема 6. Теплообменные аппараты.	1. Каким способом классифицируются теплообменные аппараты по способу передачи теплоты? 2. Какие уравнения лежат в основе теплового расчета теплообменных аппаратов? 3. Приведите основные схемы тока теплоносителей. 4. Для какой схемы тока средний логарифмический температурный напор максимальный?	6

	5. В каких теплообменных аппаратах схема тока не имеет принципиального значения? 6. С какой стороны поверхности теплообмена устанавливается ребрение? 7. Как повысить скорость течения теплоносителя в межтрубном пространстве? 8. К чему приводит повышение рекомендуемых значений скоростей движения теплоносителя? 9. Каковы особенности расчета теплопередачи при сложных схемах движения теплоносителей? 10. В результате чего интенсифицируется процесс переноса теплоты в термосифонах и тепловых трубах? 11. В чём состоит принципиальное отличие термосифона от тепловой трубы?	
Итого		54

6. Образовательные технологии.

№ п/п	Наименование раздела	Виды учебных занятий	Образовательные технологии
1.	Раздел 1. Термодинамика	Лекция Лабораторное занятие Самостоятельная работа	Лекция с использованием видеоматериалов Развернутая беседа с обсуждением доклада Консультирование и проверка домашних заданий посредством электронной почты
2.	Раздел 2. Теория теплообмена	Лекция Лабораторное занятие Самостоятельная работа	Лекция с использованием видеоматериалов Развернутая беседа с обсуждением доклада Консультирование и проверка домашних заданий посредством электронной почты

7. Оценочные средства для текущего контроля успеваемости, промежуточной аттестации по итогам освоения

7.1. Пример теста для текущего контроля успеваемости студента

- Термодинамический метод исследования заключается в установлении наиболее общих свойств материальных тел в процессе...
 - физических превращений;
 - химических превращений;
 - преобразование одного вида энергии в другой.
- Энергетическое взаимодействие термодинамической системы происходит между...
 - системой и окружающей средой;
 - системой и рабочим телом;
 - элементами системы.
- В открытой термодинамической системе отсутствует обмен...
 - теплотой;

- б) массой;
- в) работой.

4. Адиабатно изолированная система – это система, где нет обмена с окружающей средой...

- а) массой;
- б) теплотой;
- в) механической энергией.

5. Параметром состояния является функция, не зависящая от вида процесса – это:

- а) удельная работа;
- б) удельная теплота;
- в) удельный объем.

6. Параметром состояния является:

- а) удельный объем;
- б) давление;
- в) температура;
- г) газовая постоянная.

7. Энтальпия – это сумма потенциальной энергии давления и ...

- а) газовой постоянной;
- б) температуры;
- в) внутренней энергии.

8. Уравнение состояния связывает газовую постоянную..

- а) с работой;
- б) с теплотой;
- в) с параметрами состояния.

9. Формула Майера определяет газовую постоянную в связи с изохорной и изобарной теплоемкостями как их...

- а) сумму;
- б) разность;
- в) отношение.

10. Первое начало термодинамики для закрытой системы устанавливает баланс между...

- а) давлением, температурой, энтальпией;
- б) теплотой, работой и изменением внутренней энергии;
- в) газовой постоянной и параметрами состояния.

7.2. Текущий контроль знаний студентов: примерные индивидуальные задания.

1. Тепловые свойства пласта: теплоемкость, теплопроводность, температуропроводность. От чего зависят данные процессы и как влияют на процессы фильтрации в пласте.
2. Расскажите о тепловых методах обработки пласта и призабойной зоны, а именно о методах удаления парафина и асфальто-смолистых веществ с помощью закачки горячей нефти, пара, применения электронагревателей и термоакустического воздействия.
3. Повышения нефтеотдачи пласта применением внутрипластового горения.
4. Общие характеристики твёрдого и жидкого топлива, основные положения теории горения, определение энтальпии продуктов сгорания.
5. Системы сбора продукции, зависящие от физико-химических свойств скважинной продукции, применение подогрева для транспортировки продукции.
6. Путьевые подогреватели нефти: устройство, принцип работы, задачи расчета путьевых подогревателей.
7. Неизотермическое течение скважинной жидкости в системах сбора продукции скважин, задачи расчета неизотермического движения нефти в трубопроводе.
8. Термохимические установки для подготовки продукции скважин. Описание процесса и изменение параметров продукции в ходе подготовки.
9. Применение теплообменников для подготовки эмульсии скважинной продукции. Описание процесса и изменение параметров продукции в ходе подготовки.
10. Теплообменные аппараты прямоточные и противоточные. Сравнительная характеристика и описание процесса работы теплообменника.
11. Тепловой расчет магистрального нефтепровода: назначение, порядок расчета, изменение параметров продукции в ходе транспортировки.
12. Применение тепловой изоляции. Определение оптимальной толщины изоляции магистрального нефтепровода.
13. Перекачка высоковязких и застывающих нефтей по магистральному трубопроводу, описание необходимого оборудования для перекачки нефти и изменение параметров продукции в ходе перекачки.
14. Транспортирование нефти и нефтепродуктов в железнодорожных цистернах с паровой «рубашкой». Схема, описание процесса.
15. Подогрев нефти в товарных резервуарах, описание оборудования и процесса подогрева, изменение параметров продукции при подогреве.
16. Операции, по предварительному прогреву магистрального трубопровода перед заполнением его нефтью. Описание схем подогрева, изменение параметров системы «трубопровод-грунт» в ходе подогрева.
17. Необходимость охлаждения газа на компрессорной станции. Описание процесса, изменение параметров продукции при охлаждении.
18. Особенности трубопроводного транспорта сжиженных углеводородных газов. Описание процесса транспортировки и изменение параметров продукции при транспортировании.
19. Пластовые давление и температура, как они изменяются в ходе разработки месторождения и как при этом изменяются характеристики пластовых флюидов.
20. Изменение давления природного газа по длине газопровода, описание процесса падения давления, определение среднего давления по длине трубопровода.
21. Изменение температуры природного газа по длине трубопровода, описание процесса изменения температуры.

22. Технология изотермического хранения сжиженных газов, описание необходимого оборудования и показателей процесса.
23. Хранение нефти и нефтепродуктов в льдогрунтовых резервуарах, показатели процесса хранения.
24. Процесс сжижения природного газа (СПГ), описание процесса и изменения параметров продукции при сжижении.
25. Процесса сжижения углеводородных газов (СУГ), описание процесса и изменения параметров продукции при сжижении.
26. Компримирование природного газа, описание процесса компримирования и изменения параметров природного газа.
27. Редуцирование природного газа, необходимость редуцирования, описание изменения параметров природного газа.
28. Аппараты для охлаждения газа на компрессорных станциях, описание конструкции охлаждающего аппарата, и изменения параметров природного газа.
29. Процессы первичной переработки нефти, описание процессов переработки и изменения параметров нефти.
30. Процессы вторичной переработки нефти, описание процессов переработки и изменения параметров нефти.

Контрольные вопросы для проведения итоговой аттестации (экзамена):

1. Понятие о рабочем теле (РТ). Термодинамическая система. Основные параметры. Удельный объем РТ. Единицы измерения. Давление избыточное, вакуумное, атмосферное давление. Температура. Шкалы температур.
2. Понятие об идеальном газе. Реальный газ. Законы Бойля-Мариотта, Гей-Люссака, Шарля. Закон Авогадро. Уравнение состояния идеального газа. Газовая постоянная, ее физический смысл и единицы измерения.
3. Понятие о термодинамическом процессе, внутренней энергии, работе, теплоте. Первый закон термодинамики. Аналитическое выражение первого закона термодинамики. Понятие об энтальпии. Обратимые и необратимые процессы.
4. Исследование изохорного процесса: уравнение, графическое изображение в диаграмме V-P, соотношение между параметрами, определение изменения внутренней энергии, работы, определение количества теплоты, применение первого закона термодинамики.
5. Исследование изобарного процесса: уравнение, графическое изображение в диаграмме V-P, соотношение между параметрами, определение изменения внутренней энергии, работы, определение количества теплоты, применение первого закона термодинамики.
6. Исследование изотермического процесса: уравнение, графическое изображение в диаграмме V-P, соотношение между параметрами, определение изменения внутренней энергии, работы, определение количества теплоты, применение первого закона термодинамики.
7. Исследование адиабатного процесса: уравнение, графическое изображение в диаграмме V-P, соотношение между параметрами, определение изменения внутренней энергии, работы, определение количества теплоты, применение первого закона термодинамики.
8. Исследование политропного процесса: уравнение, графическое изображение в

диаграмме V-P, соотношение между параметрами, определение изменения внутренней энергии, работы, определение количества теплоты, применение первого закона термодинамики.

9. Формулировки второго закона термодинамики. Круговые термодинамические процессы: прямой и обратный. Прямой цикл теплового двигателя. Термический коэффициент полезного действия цикла теплового двигателя.

10. Обратные циклы. Холодильный и отопительный коэффициенты обратных циклов.

11. Прямой и обратный циклы Карно. Энтропия. Диаграмма S-T. Основные термодинамические процессы в диаграмме S-T. Прямой и обратный циклы Карно в диаграмме S-T, теплота, работа, коэффициенты термодинамической эффективности циклов в диаграмме S-T.

12. Назначение, принцип действия и классификация компрессоров. Понятие об идеальном компрессоре. Термодинамические процессы в идеальном поршневом одноступенчатом компрессоре. Принцип работы многоступенчатого компрессора. Изображение процессов многоступенчатого компрессора в диаграмме V-P.

13. Понятие о холодильных машинах. Диаграмма i-lg p, S-T холодильных агентов. Основные термодинамические процессы в диаграмме i-lg p и S-T.

14. Паровая холодильная машина: принципиальная схема установки, работающей по циклу Карно, изображение цикла в диаграммах V-P, S-T, i-lg p, холодильный коэффициент. Теоретический цикл паровой холодильной машины: схема, изображение в диаграммах V-P, S-T, i-lg p, холодопроизводительность цикла.

15. Понятие ДВС. Их классификация. Двухтактные, четырехтактные ДВС, теоретические циклы ДВС. Основные узлы и системы.

16. Виды передачи теплоты и их общая характеристика. Понятие о механизме процесса.

17. Основные понятия. Закон Фурье. Коэффициент теплопроводности, его физический смысл, численные значения для различных тел и зависимость от различных факторов. Передача теплоты через плоскую однослойную и многослойную стенки. Теплопроводность цилиндрической однослойной и многослойной стенки.

18. Физическая сущность теплообмена конвекции. Закон Ньютона - Рихмана. Коэффициент теплоотдачи, его численные значения. Факторы, влияющие на коэффициент теплоотдачи.

19. Понятие о теплопередаче. Передача теплоты через плоскую однослойную и многослойные стенки. Коэффициент теплопередачи, его физическая сущность. Теплопередача через цилиндрическую однослойную и многослойные стенки. Тепловая изоляция. Критический диаметр изоляции. Теплопередача через ребреные поверхности.

20. Теплообменные аппараты, их классификация, устройство и принцип действия. Определение теплоперерабатывающей поверхности теплообменных аппаратов. Вычисление конечных температур теплоносителей.

Примечания: В приведенные контрольные вопросы могут быть внесены некоторые изменения, при условии, что они не будут противоречить содержанию дисциплины.

8. Система оценивания планируемых результатов обучения

Форма контроля	За одну работу		Всего
	Миним. баллов	Макс. баллов	
Текущий контроль:			
<i>подготовка к лекционным занятиям</i>	<i>0,5 балла</i>	<i>1 балл</i>	<i>9 баллов</i>
<i>выполнение и защита лабораторных работ</i>	<i>1 балл</i>	<i>4 баллов</i>	<i>36 баллов</i>
<i>промежуточная аттестация (тестирование с собеседованием по итогам теста)</i>	<i>1 балл</i>	<i>7 баллов</i>	<i>7 баллов</i>
Итоговая аттестация	1 балл	48	48 баллов
Итого за семестр (экзамен по дисциплине)	52	100	100 баллов

9. Учебно-методическое и информационное обеспечение дисциплины

а) основная литература:

1. Ляшков В. И. Теоретические основы теплотехники: Учеб. пособие. 2-е изд., стер. М.: Изд-во Машиностроение-1, 2005. 260 с. Режим доступа: <http://www.energyland.info/files/library/425bbbaac7eeac6849aaf03ce5395198.pdf>
2. Теплотехника. Учебник для вузов. Баскаков А.П. (ред.), Берг Б.В., Витт О.К., Кузнецов Ю.В., Филипповский Н.Ф. Энергоатомиздат. Москва. 1991. – 224 с. Режим доступа: <http://books.totalarch.com/n/1315>
3. Брюханов О.Н. Основы гидравлики, теплотехники и аэродинамики / О.Н. Брюханов, В.И. Коробко, А.Т. Мелик – Аракелян: Учебник. – М.: ИНФРА – М, 2005. – 254 с. Режим доступа: <http://znanium.com/catalog/product/1004670>

б) дополнительная литература:

- Лашутина Н.Г. Техническая термодинамика с основами теплопередачи и гидравлики: Учебное пособие для учащихся техникумов / Н.Г. Лашутина, О.В., О.В. Макашова, Р. М. Медведев; под общ. ред. Р. М. Медведева. – Л.: Машиностроение. Ленингр. Отд-ние, 1988. – 336 с. Режим доступа: <http://padabum.com/d.php?id=35250>.
2. Хрусталева Б.М. Техническая термодинамика: Учебн. в 2-х ч., ч.1 / Б.М. Хрусталева, А.П. Несенчук, В.Н. Романюк и др. – Мн.: УП «Технопринт», 2004 – 487 с. Режим доступа: https://www.studmed.ru/download/hrustalev-bm-nesenchuk-ap-romanyuk-vn-tehnicheskaya-termodinamika_5959b449e42.html

в) периодические издания:

1. Онлайн-журнал «Сибирская нефть». Режим доступа: <https://www.gazprom-neft.ru/press-center/sibneft-online>
2. Научно-технический журнал «Геология нефти и газа». Режим доступа: <https://www.oilandgasgeology.ru>
3. Аналитический журнал «Нефтегазовая Вертикаль». Режим доступа: <http://ngv.ru>
4. Информационно-аналитический бюллетень «Вестник ТЭК». Режим доступа: <https://media.lawtek.ru/media/vestnik>
5. Научно-технический и производственный журнал «Газовая Промышленность». Режим доступа: <http://neftegas.info/gasindustry>

6. Научно-технический и производственный журнал «Нефтяное хозяйство». Режим доступа: <http://www.oil-industry.ru>
7. Научно-технический журнал «Мир нефтепродуктов. Вестник Нефтяных Компаний». Режим доступа: <http://neftemir.ru>
8. Журнал «Нефть России». Режим доступа: <http://www.oilru.com>
9. Журнал «Экономика и ТЭК сегодня». Режим доступа: <http://www.rusoil.ru>
10. Журнал «Oil & Gas Journal Russia». Режим доступа: <http://ogjrussia.com>
11. Научно-технический журнал «Геология нефти и газа». Режим доступа: <http://www.geoinform.ru>
12. Аналитический журнал «Нефть и Капитал». Режим доступа: <http://www.oilcapital.ru>
13. Журнала Gasworld.ru. Режим доступа: <http://www.gasworld.ru>
14. Деловой журнал Neftegaz.RU. Режим доступа: <http://www.neftegaz.ru>
15. Информационно-аналитический журнал «Нефть, газ и бизнес». Режим доступа: <http://ngb.gubkin.ru>
16. Научно-технический журнал «Нефть. Газ. Новации». Режим доступа: <http://neft-gaz-novacii.ru/ru>. Архив журналов «Нефть. Газ. Новации» научно-технический журнал. Режим доступа: <http://neft-gaz-novacii.ru/ru/archive>
17. Электронный научный журнал «Нефтегазовое дело». Режим доступа: <http://www.ogbus.ru>
18. Журнал «Нефть и газ Евразия». Режим доступа: <https://www.oilandgaseurasia.com/ru>. Архив журнала «Нефть и газ Евразия» Режим доступа: https://www.oilandgaseurasia.com/ru/oge_pdf_archive
19. Журнал «Бурение и нефть». Режим доступа: <http://burneft.ru/archive/issues>
20. Журнал «Нефтегазовые технологии». Режим доступа: <http://ogt.promzone.ru>
21. Научно-технический журнал «Технологии нефти и газа». Режим доступа: <http://www.nitu.ru>
22. Журнал «Инженерная Практика». Режим доступа: <http://glavteh.ru/mag>
23. Журнал «Территория НЕФТЕГАЗ». Режим доступа: <http://www.neftegas.info/neftegas.html>
24. Журнал «Нефтесервис». Режим доступа: <http://www.indpg.ru/oilfieldservice>
25. Отраслевой информационно-технический журнал «Сфера нефть и газ». Режим доступа: <http://www.s-ng.ru/magazin/0>
26. Научно-технический журнал «Экспозиция нефть и газ». Режим доступа: <http://runeft.ru/archive>
27. Научно-технический и производственный «Журнал нефтегазового строительства». Режим доступа: <http://mag.npngs.ru>
28. Журнал «Нефтегаз International». Режим доступа: <http://neftegazint.ru/node/10>
29. Журнал «ROGTEC» Russian Oil & Gas Technologies. Режим доступа: <http://www.rogtectmagazine.com/about-us-russian.php>
30. Журнал «Нефтегазовая геология. Теория и практика». Режим доступа: <http://www.ngtp.ru/jornal.html>

г) программное обеспечение:

1. Windows 10 Pro
2. WinRAR
3. Microsoft Office Professional Plus 2013

4. Microsoft Office Professional Plus 2016
5. Microsoft Visio Professional 2016
6. Visual Studio Professional 2015
7. Adobe Acrobat Pro DC
8. ABBYY FineReader 12
9. ABBYY PDF Transformer+
10. ABBYY FlexiCapture 11
11. Программное обеспечение «interTESS»
12. Справочно-правовая система «КонсультантПлюс», версия «эксперт»
13. ПО Kaspersky Endpoint Security
14. «Антиплагиат.ВУЗ» (интернет - версия)
15. «Антиплагиат- интернет»

д) профессиональные базы данных и информационные справочные системы современных информационных технологий:

1. Справочно-правовая система «Консультант Плюс» (<http://www.consultant.ru>);
2. Электронная библиотечная система eLIBRARY.RU (<http://www.elibrary.ru>);
3. Электронная библиотечная система «Университетская библиотека онлайн» (<https://biblioclub.ru>);
4. Электронно-библиотечная система BIBLIO-ONLINE.RU (<https://www.biblio-online.ru>);
5. Электронно-библиотечная система IPRBOOKS (<http://www.iprbookshop.ru>).
6. Сайт Petrolibrary.ru. Книги и статьи посвящены геологии, бурению скважин, разработке месторождений, добыче и транспорту нефти и газа, технологиям нефтегазовой отрасли.
7. Основным зарубежным источником информации по курсу являются статьи и ресурсы Общества инженеров-нефтяников (SPE) - <https://www.spe.org/en/> (JPT, Oil and gas facilities и др).
8. Библиотека <https://www.onepetro.org/> (доступ к библиотеке студентов и членство в SPE бесплатное).
9. Бесплатная библиотека технической литературы «Нефть и газ – избранное». Режим доступа: <http://nglib-free.ru>.
10. Ресурс studmed.ru является общедоступным для всех пользователей. здесь находятся книги, статьи, конспекты лекций, методические пособия и указания и многое другое, посвященные информации по различным разделам нефтегазовой отрасли.
11. Ресурс <http://www.edu.ru/> - федеральный портал российского образования. Нормативные материалы по образованию, учебно-методические материалы и ресурсы по всем направлениям, специальностям.

10. Обеспечение образовательного процесса для лиц с ограниченными возможностями здоровья и инвалидов

Учебные и учебно-методические материалы для самостоятельной работы обучающихся из числа инвалидов и лиц с ограниченными возможностями здоровья (ОВЗ) предоставляются в формах, адаптированных к ограничениям их здоровья и восприятия информации:

Для слепых и слабовидящих:

- лекции оформляются в виде электронного документа, доступного с помощью компьютера со специализированным программным обеспечением;
- письменные задания выполняются на компьютере со специализированным программным обеспечением, или могут быть заменены устным ответом;
- обеспечивается индивидуальное равномерное освещение не менее 300 люкс;
- для выполнения задания при необходимости предоставляется увеличивающее устройство; возможно также использование собственных увеличивающих устройств;
- письменные задания оформляются увеличенным шрифтом;
- экзамен и зачёт проводятся в устной форме или выполняются в письменной форме на компьютере.

Для глухих и слабослышащих:

- лекции оформляются в виде электронного документа, либо предоставляется звукоусиливающая аппаратура индивидуального пользования;
- письменные задания выполняются на компьютере в письменной форме;
- экзамен и зачёт проводятся в письменной форме на компьютере; возможно проведение в форме тестирования.

Для лиц с нарушениями опорно-двигательного аппарата:

- лекции оформляются в виде электронного документа, доступного с помощью компьютера со специализированным программным обеспечением;
- письменные задания выполняются на компьютере со специализированным программным обеспечением;
- экзамен и зачёт проводятся в устной форме или выполняются в письменной форме на компьютере.

При необходимости предусматривается увеличение времени для подготовки ответа.

Процедура проведения промежуточной аттестации для обучающихся устанавливается с учётом их индивидуальных психофизических особенностей. Промежуточная аттестация может проводиться в несколько этапов.

При проведении процедуры оценивания результатов обучения предусматривается использование технических средств, необходимых в связи с индивидуальными особенностями обучающихся. Эти средства могут быть предоставлены университетом, или могут использоваться собственные технические средства.

Проведение процедуры оценивания результатов обучения допускается с использованием дистанционных образовательных технологий.

Обеспечивается доступ к информационным и библиографическим ресурсам в сети Интернет для каждого обучающегося в формах, адаптированных к ограничениям их здоровья и восприятия информации:

Для слепых и слабовидящих:

- в печатной форме увеличенным шрифтом;
- в форме электронного документа;
- в форме аудиофайла.

Для глухих и слабослышащих:

- в печатной форме;
- в форме электронного документа.

Для обучающихся с нарушениями опорно-двигательного аппарата:

- в печатной форме;

- в форме электронного документа;
- в форме аудиофайла.

Учебные аудитории для всех видов контактной и самостоятельной работы, научная библиотека и иные помещения для обучения оснащены специальным оборудованием и учебными местами с техническими средствами обучения:

Для слепых и слабовидящих:

для глухих и слабослышащих:

– автоматизированным рабочим местом для людей с нарушением слуха и слабослышащих;

– акустический усилитель и колонки;

Для обучающихся с нарушениями опорно-двигательного аппарата:

– передвижными, регулируемые эргономическими партами СИ-1;

– компьютерной техникой со специальным программным обеспечением.

11. Материально-техническое обеспечение дисциплины

Преподаватель должен иметь возможность легко управлять оборудованием аудитории, что позволит проводить лекции, практические и лабораторные занятия, презентации, конференции и другие виды аудиторной нагрузки обучающихся в удобной и доступной для них форме с применением современных интерактивных средств обучения, в том числе с использованием в процессе обучения всех корпоративных ресурсов. Мультимедийная аудитория также должна быть оснащена доступом в сеть интернет. Компьютерное оборудование должно иметь соответствующее лицензионное программное обеспечение.

Технические средства обеспечения дисциплины для проведения аудиторных занятий:

- интерактивная доска с лицензионным программным обеспечением и мультимедиа-проектором;
- маркерная доска;
- учебные материалы (учебные фильмы, презентации);
- акустическая система;
- средства управления оборудованием.

УТВЕРЖДЕНО
Протокол заседания кафедры

№ _____ от « _____ » _____ наименование 20 ____ г.

ЛИСТ ИЗМЕНЕНИЙ

(Изменения и дополнения в РПД вносятся ежегодно и оформляются в данной форме. Изменения вносятся заменой отдельных листов (старый лист при этом цветным маркером перечеркивается, а новый лист с изменением степлером прикалывается к рабочей программе (хранится на кафедре), в электронной форме РПД должна быть актуализированной всегда, т.е. с внесенными изменениями.

При наличии большого количества изменений и поправок, затрудняющих понимание, возникших в связи с изменением нормативной базы ВО и другим причинам, проводится полный пересмотр РПД (т.е. выпускается новая РПД), которая проходит все стадии проверки и утверждения).

в рабочей программе (модуле) дисциплины _____ *шифр «Название дисциплины»*

по направлению подготовки (специальности) _____

на 20 ____ / 20 ____ учебный год

1. В _____ вносятся следующие изменения:
(элемент рабочей программы)

1.1.;

1.2.;

...

1.9.

2. В _____ вносятся следующие изменения:
(элемент рабочей программы)

2.1.;

2.2.;

...

2.9.

3. В _____ вносятся следующие изменения:
(элемент рабочей программы)

3.1.;

3.2.;

...

3.9.

Составитель _____ *(подпись, расшифровка подписи)* Фамилия И.О.

" _____ " _____ 20 ____ г.

Зав. кафедрой _____ *(подпись, расшифровка подписи)* Фамилия И.О.