

Министерство сельского хозяйства
Российской Федерации

Федеральное государственное бюджетное
образовательное учреждение высшего образования
«Дальневосточный государственный аграрный университет»

С. В. Щитов
Е. В. Панова
Е. С. Поликутина

ТЕПЛОТЕХНИКА.
РЕШЕНИЕ
ПРАКТИЧЕСКИХ ЗАДАЧ

Практикум

Благовещенск
Дальневосточный ГАУ
2023

УДК 621.1
ББК 31.3
Щ90

Рецензент

*Зоя Федоровна Кривуца, доктор технических наук,
доцент, заведующая кафедрой физики, математики и информатики
Дальневосточного государственного аграрного университета*

*Рекомендовано к использованию в учебном процессе
методическим советом факультета механизации сельского хозяйства
Дальневосточного государственного аграрного университета*

Щитов, С. В. Теплотехника. Решение практических задач :
Щ90 практикум / С. В. Щитов, Е. В. Панова, Е. С. Поликутина ;
Дальневост. гос. аграр. ун-т. – Благовещенск : Дальневосточный
ГАУ, 2023. – 100 с.

ISBN 978-5-9642-0512-8

Практикум подготовлен в соответствии с требованиями федеральных государственных образовательных стандартов высшего образования и основных профессиональных образовательных программ высшего образования, реализуемых Дальневосточным ГАУ по техническим направлениям бакалавриата. Авторами кратко рассматривается теоретический материал и приводятся алгоритмы решения типовых задач по дисциплине «Теплотехника» по основным разделам технической термодинамики.

Практикум предназначен для студентов, обучающихся по техническим направлениям бакалавриата.

УДК 621.1
ББК 31.3

ISBN 978-5-9642-0512-8

© Щитов С. В., Панова Е. В., Поликутина Е. С., 2023
© ФГБОУ ВО Дальневосточный
государственный аграрный университет, 2023

ОГЛАВЛЕНИЕ

Общие методические указания	6
Основные обозначения	7
1 Параметры состояния термодинамической системы	9
1.1 Основные понятия и определения.....	9
1.2 Практические задачи	13
1.3 Методические рекомендации по решению задач	14
2 Газовые смеси	17
2.1 Смесь идеальных газов.....	17
2.2 Практические задачи	18
2.3 Методические рекомендации по решению задач	19
3 Теплоемкость газов	22
3.1 Теплоемкость газа	22
3.2 Практические задачи	24
3.3 Методические рекомендации по решению задач	25
4 Первый закон термодинамики	29
4.1 Теплота, работа, внутренняя энергия. Первый закон термодинамики. Энтальпия газов.....	29
4.1.1 Теплота, работа, внутренняя энергия	29
4.1.2 Первый закон термодинамики.....	31
4.1.3 Энтальпия газов	32
4.2 Практические задачи	33
4.3 Методические рекомендации по решению задач	34
5 Основные газовые процессы.....	36
5.1 Термодинамические процессы идеальных газов	36
5.2 Практические задачи	41
5.3 Методические рекомендации по решению задач	42

6	Водяной пар	46
6.1	Водяной пар	46
6.2	Практические задачи.....	48
6.3	Методические рекомендации по решению задач	49
7	Круговые процессы	52
7.1	Циклы поршневых четырехтактных двигателей внутреннего сгорания	52
7.2	Циклы газотурбинных установок.....	56
7.3	Циклы паротурбинных установок.....	58
7.2	Практические задачи.....	60
7.3	Методические рекомендации по решению задач	61
8	Истечение газов и паров	64
8.1	Первый закон термодинамики для потока	64
8.2	Критическое давление и скорость. Сопло Лаваля	65
8.3	Истечения идеального газа из суживающегося сопла и сопла Лаваля..	66
8.4	Дросселирование газов	68
8.2	Практические задачи.....	71
8.3	Методические рекомендации по решению задач	72
9	Циклы холодильных установок	76
9.1	Циклы холодильных установок	76
9.2	Практические задачи.....	78
9.3	Методические рекомендации по решению задач	79
	Список рекомендуемой литературы.....	83
	Приложение А. Соотношения между единицами давления	85
	Приложение Б. Молекулярные массы, плотности и объемы киломолей при нормальных условиях и газы постоянных важнейших газов	86
	Приложение В. Формулы для расчета газовых смесей	87
	Приложение Г. Приближенные значения молярных теплоемкостей при постоянном объеме и постоянном давлении.....	88

Приложение Д. Интерполяционные формулы для истинных и средних мольных теплоемкостей газов	89
Приложение Е. Интерполяционные формулы для средних массовых и объемных теплоемкостей газов	90
Приложение Ж. Теплоемкость кислорода (O_2)	91
Приложение И. Теплоемкость азота (N_2)	92
Приложение К. Теплоемкость окиси углерода (CO)	93
Приложение Л. Теплоемкость водорода (H_2)	94
Приложение М. Теплоемкость углекислого газа (CO_2)	95
Приложение Н. Теплоемкость воздуха	96
Приложение П. Насыщенный водяной пар (по давлениям)	97
Приложение Р. Насыщенный водяной пар (по температурам)	99

ОБЩИЕ МЕТОДИЧЕСКИЕ УКАЗАНИЯ

Каждому студенту на практическом занятии выдается свой вариант.

При выполнении практических заданий необходимо соблюдать следующие требования:

- 1) решение выполнять в тетрадях для практических занятий;
- 2) указать номер варианта;
- 3) обязательно записать условие задачи;
- 4) решение сопровождать кратким пояснительным текстом, в котором должно быть указано, какая величина определяется и по какому уравнению; какие величины подставляются в уравнение (из условия задачи, из справочника, определено ранее и т. д.);
- 5) вычисления давать в развернутом виде;
- 6) обязательно проставлять размерность всех заданных и расчетных величин;
- 7) внимательно читать пояснения к решению задач.

После решения задач, полученные результаты (ответы с обозначением величин) переписываются на отдельный лист и отдаются на проверку преподавателю. Оценочный ценз указан в каждой из рассмотренных тем. После получения оценки необходимо провести работу над ошибками.

По окончании изучения курса практических занятий по дисциплине «Теплотехника» проводится контрольное решение задач по всем темам.

ОСНОВНЫЕ ОБОЗНАЧЕНИЯ

- a – коэффициент изобарной (изохорной) температуропроводности, м²/с
- A – поглощательная способность, м²
- C – истинная теплоемкость, Дж/К; скорость распространения электромагнитного излучения, м/с
- d – диаметр, м
- D – коэффициент молекулярной диффузии, м²/с
- E – интегральная плотность излучения, Вт/м²
- E_λ – плотность монохроматического излучения, Вт/м²
- J_λ – спектральная плотность излучения, Вт/м³
- g – ускорение свободного падения, м/с²
- h – удельная энтальпия, Дж/кг
- m – массовая доля в газовой смеси
- M – масса, кг
- f – площадь, м²
- k – коэффициент теплопередачи, Вт/(м²·К); показатель адиабаты;
- l – длина, м; удельная работа, Дж/кг;
- n – молярная доля компонента в газовой смеси; показатель политропы; нормаль к поверхности;
- P – давление, Па
- q – плотность теплового потока, Вт/м²; удельная теплота, Дж/кг
- q_τ – удельный тепловой поток, Дж/м²
- Q – количество теплоты, Дж; тепловой поток, Вт
- r – скрытая теплота парообразования, Дж/кг; объемная доля компонента в газовой смеси;
- R – термическое сопротивление, (м²·К)/Вт; отражательная способность; радиус, м; газовая постоянная, Дж/(кг·К)

Основные обозначения

R_y – универсальная газовая постоянная, Дж/(кмоль·К)

t – температура, °С

T – абсолютная температура, К

ΔT – средний температурный напор, К

v – удельный объем, м³/кг

V – объем, м³

ω – скорость, м/с

x – степень сухости;

α – коэффициент конвективной теплоотдачи, Вт/(м²·К)

β – коэффициент конвективной массоотдачи, м/с; коэффициент термического расширения, К⁻¹; отношение давлений

δ – толщина стенки, м

ε – степень черноты, степень сжатия;

λ – коэффициент теплопроводности, Вт/(м·К); длина волны излучения, м

φ – химический потенциал;

μ – динамическая вязкость, Па·с; молярная масса, кг/кмоль

ν – кинетическая вязкость, м²/с; частота излучения, с⁻¹

ξ – коэффициент гидравлического сопротивления

ρ – плотность, кг/м³

σ_0 – постоянная Стефана-Больцмана, Вт/(м²·К⁴)

σ – коэффициент поверхностного натяжения, Н/м

τ – время, с

s – энтропия, Дж/(кг·К)

u – внутренняя энергия, Дж

1 ПАРАМЕТРЫ СОСТОЯНИЯ ТЕРМОДИНАМИЧЕСКОЙ СИСТЕМЫ

1.1 Основные понятия и определения

Теплотехника – наука, которая изучает методы получения, преобразования, передачи и использования теплоты, а также принципы действия и конструктивные особенности тепловых машин, аппаратов и устройств.

Существуют два направления использования теплоты – энергетическое и технологическое.

При **энергетическом направлении использования теплоты**, теплота преобразуется в механическую работу, с помощью которой в генераторах создается электрическая энергия, удобная для передачи на расстояние. Теплоту при этом получают сжиганием топлива в котельных установках или в двигателях внутреннего сгорания.

При **технологическом направлении использования теплоты**, теплота используется для направленного изменения свойств различных тел (расплавления, затвердевания, изменения структуры, механических, физических, химических свойств).

Техническая термодинамика рассматривает закономерности взаимного превращения теплоты в работу. Она устанавливает взаимосвязь между тепловыми, механическими и химическими процессами, которые совершаются в тепловых и холодильных машинах; изучает процессы, происходящие в газах и парах, а также свойства этих тел при различных физических условиях.

Термодинамика базируется на двух основных законах. **Первый закон термодинамики** – закон превращения и сохранения энергии.

Второй закон термодинамики устанавливает условия протекания и направленность макроскопических процессов в системах, состоящих из большого количества частиц.

Объектом исследования является термодинамическая система, которой могут быть группа тел, тело или часть тела.

Совокупность тел, находящихся за пределами термодинамической системы, называется окружающей средой.

Термодинамическая система – это совокупность макроскопических тел, обменивающихся энергией друг с другом и окружающей средой.

Изолированная система – это система, не взаимодействующая с окружающей средой.

Адиабатная (теплоизолированная) система – система, имеющая адиабатную оболочку, которая исключает обмен теплотой (теплообмен) с окружающей средой.

Однородная система – система, имеющая во всех своих частях одинаковый состав и физические свойства.

Гомогенная система – однородная по составу и физическому строению система, внутри которой нет поверхностей раздела (лед, вода, газы).

Гетерогенная система – система, состоящая из нескольких гомогенных частей (фаз) с различными физическими свойствами, отделенных одна от другой видимыми поверхностями раздела (лед и вода, вода и пар).

В тепловых машинах (двигателях) механическая работа совершается с помощью **рабочих тел** – газ, пар.

Величины, которые характеризуют физическое состояние тела, называются **термодинамическими параметрами состояния** (*удельный объем, абсолютное давление, абсолютная температура, внутренняя энергия, энтальпия, энтропия, концентрация, теплоемкость и т. д.*).

Различают **термические** и **калорические параметры состояния**. К первым относят удельный объем, абсолютное давление и абсолютную температуру; ко вторым – внутреннюю энергию, энтальпию, энтропию.

Если изменение параметра состояния не зависит от вида процесса, а определяется начальным и конечным состояниями, то параметры состояния называются **функцией состояния**. Такими параметрами являются внутренняя энергия, энтальпия, энтропия и др.

Интенсивные параметры – параметры, не зависящие от массы системы (давление, абсолютная температура).

Аддитивные (экстенсивные) параметры – параметры, значения которых пропорциональны массе системы (удельный объем, энтальпия и т. д.).

При отсутствии внешних силовых полей (гравитационного, электромагнитного и др.) термодинамическое состояние однофазного тела можно однозначно определить тремя параметрами: удельным объемом (v), температурой (T), давлением (P).

Удельный объем – величина, определяемая отношением объема (V) вещества к его массе (M), $\text{м}^3/\text{кг}$:

$$v = \frac{V}{M} \quad (1.1)$$

Плотность вещества – величина, определяемая отношением массы к объему вещества, $\text{кг}/\text{м}^3$:

$$\rho = \frac{1}{v} = \frac{M}{V}; \rho \cdot v = 1 \quad (1.2)$$

Давление, с точки зрения молекулярно-кинетической теории, есть *средний результат ударов молекул газа, находящихся в непрерывном хаотическом движении, о стенку сосуда, в котором заключен газ*.

Внесистемные единицы давления:

$$1 \text{ кгс}/\text{см}^2 = 98,1 \text{ кПа} = 10^4 \text{ мм. вод. ст.}$$

$$1 \text{ ат. (техн. атмосфера)} = 1 \text{ кгс/см}^2 = 98,1 \text{ кПа}$$

$$1 \text{ атм. (физическая атмосфера)} = 101,325 \text{ кПа} = 760 \text{ мм. рт. ст.}$$

$$1 \text{ ат.} = 0,968 \text{ атм.}$$

$$1 \text{ мм. рт. ст.} = 133,32 \text{ Па}$$

$$1 \text{ бар} = 0,1 \text{ МПа} = 100 \text{ кПа} = 10^5 \text{ Па}$$

Различают **абсолютное** (P или P_a), **избыточное** ($P_{\text{изб}}$), **атмосферное** или **барометрическое** (P_b) и **вакууметрическое** (P_v) давления.

Атмосферное, избыточное, вакууметрическое давления измеряются с помощью приборов, а абсолютное давление определяется из выражений (1.3):

$$P_a = P_b + P_{\text{изб}} \text{ или } P_a = P_b - P_v \quad (1.3)$$

В термодинамике параметром состояния рабочего тела является только абсолютное давление.

Температура характеризует степень нагретости тел, и представляет собой меру средней кинетической энергии поступательного движения его молекул. Чем больше средняя скорость движения, тем выше температуры тела.

За термодинамический параметр состояния системы принимают **абсолютную температуру** (T , Кельвин). При температуре абсолютного нуля ($T = 0$) тепловые движения прекращаются. Температура может быть выражена в градусах Цельсия.

Связь между температурами, выраженными в Кельвинах и градусах Цельсия, имеет следующее соотношение:

$$T = t + 273,15\text{К} \quad (1.4)$$

Равновесным состоянием называется состояние тела, при котором во всех его точках объема P , v , T и все другие физические свойства одинаковы.

Совокупность изменений состояния термодинамической системы при переходе из одного состояния в другое называется **термодинамическим процессом**.

Если процесс проходит через равновесные состояния, то он называется **равновесным**. В реальных случаях все процессы являются **неравновесными**.

1.2 Практические задачи

Каждая задача оценивается в 0,5 балла.

1. В сосуде объемом 1 м^3 находится $0,7 \text{ кг}$ окиси углерода. Определите удельный объем и плотность окиси углерода при указанных условиях.

Ответ: $v = 1,429 \text{ м}^3/\text{кг}$; $\rho = 0,7 \text{ кг}/\text{м}^3$.

2. Найдите абсолютное давление пара в котле, если манометр показывает избыточное давление равное $0,13 \text{ МПа}$, а атмосферное давление составляет 680 мм рт. ст.

Ответ: $P_a = 0,221 \text{ МПа}$.

3. Какой удельный объем занимает 1 кг азота при температуре $70 \text{ }^\circ\text{C}$ и давлении $0,2 \text{ МПа}$?

Ответ: $v = 0,509 \text{ м}^3/\text{кг}$.

4. Давление воздуха по ртутному барометру равно 770 мм рт. ст. Выразите это давление в Паскалях.

Ответ: $P = 102\,641 \text{ Па}$.

5. Тягометр показывает разрежение в газоходе 42 мм вод. ст. Атмосферное давление равно 757 мм рт. ст. Определите абсолютное давление дымовых газов.

Ответ: $P_a = 100\,496 \text{ Па}$.

6. Во сколько раз изменится плотность газа в сосуде, если при постоянной температуре показание манометра уменьшится от $P_1 = 1,8 \text{ МПа}$ до $P_2 = 0,3 \text{ МПа}$? Барометрическое давление примите равным $0,1 \text{ МПа}$.

Ответ: $\rho_2 = 0,2\rho_1$.

7. В цилиндре диаметром 0,6 м содержится 0,41 м³ воздуха при температуре 35 °С. До какой температуры должен нагреваться воздух при постоянном давлении, чтобы движущийся без трения поршень поднялся на 0,4 м.

Ответ: $T = 391$ К.

8. Масса пустого баллона для кислорода емкостью 0,051 м³ равна 80 кг. Определите массу баллона после заполнения его кислородом при температуре 20 °С до давления 10 МПа.

Ответ: $M = 86,57$ кг.

9. В воздухоподогреватель парового котла подается при постоянном давлении вентилятором 130 000 м³/ч воздуха при температуре 30 °С. Определите объемный расход воздуха на выходе из воздухонагревателя, если он нагревается до 400 °С.

Ответ: $V = 288\,746$ м³/ч.

10. Баллон с кислородом емкостью 20 л находится под давлением 10 МПа при температуре 15 °С. После расходования части кислорода давление понизилось до 7,6 МПа, а температура упала до 10 °С. Определите массу израсходованного кислорода.

Ответ: $M = 0,606$ кг.

1.3 Методические рекомендации по решению задач

При решении задач обязательно переводить все данные в систему СИ: давление в паскалы (Па); температуру в Кельвины (К); объем в кубические метры (м³).

Задача 1. 1. Удельный объем газа определяем по уравнению (1.1).

2. Плотность – есть обратная величина удельного объема, которая находится из выражения (1.2).

Задача 2. Определяем абсолютное давление по уравнению (1.3).

Задача 3. 1. Переводим температуру из градусов Цельсия в Кельвины по уравнению (1.4).

2. Переводим давление в паскалы ($1 \text{ Мпа} = 10^6 \text{ Па}$).

3. Удельный объем газа определяем из характеристического уравнения:

$$Pv = RT$$

где R – газовая постоянная газа (приложение Б).

Задача 4. Для того чтобы перевести давление из одних единиц в другие используем приложением А.

Задача 5. Определяем абсолютное давление по уравнению (1.3).

Задача 6. 1. Абсолютное давление находим по уравнению (1.3).

2. Для определения отношения плотностей газа воспользуемся объединенным законом Бойля-Мариотта и Гей-Люссака:

$$\frac{P_{a1}v_1}{T_1} = \frac{P_{a2}v_2}{T_2}$$

Принимая во внимание, что плотность есть обратная величина удельного объема $\rho = \frac{1}{v}$, и процесс происходит при постоянной температуре ($T_1 = T_2$), получаем:

$$\frac{P_{a1}}{\rho_1} = \frac{P_{a2}}{\rho_2} \text{ или } \rho_2 = \frac{P_{a2}}{P_{a1}} \rho_1$$

Задача 7. 1. Переводим температуру из градусов Цельсия в Кельвины.

2. Определяем приращение объема в цилиндре при поднятии поршня:

$$\Delta V = \frac{\pi \cdot d^2}{4} \cdot h$$

где d – диаметр поршня, м; h – высота, на которую поршень поднялся, м.

3. Конечный объем газов находим по уравнению:

$$V_2 = V_1 + \Delta V$$

где V_1 – начальный объем газа, м³.

4. Конечную температуру газа определяем из уравнения:

$$\frac{P_1 V_1}{T_1} = \frac{P_2 V_2}{T_2}$$

При этом принимаем во внимание, что давление есть величина постоянная ($P_1 = P_2$).

Задача 8. 1. Переводим температуру из градусов Цельсия в Кельвины.

2. Переводим давление в паскалы (1 Мпа = 10^6 Па).

3. Определяем массу газа в баллоне по характеристическому уравнению:

$$PV = MRT$$

4. Масса баллона после заполнения его кислородом составит:

$$M_{\text{общ}} = M_{\text{баллона}} + M$$

Задача 9. 1. Переводим температуру из градусов Цельсия в Кельвины.

2. Объемный расход воздуха на выходе из воздухонагревателя определяем из уравнения:

$$\frac{P_1 V_1}{T_1} = \frac{P_2 V_2}{T_2}$$

где V_1 – объемный расход воздуха на входе в воздухонагреватель, м³/ч.

Принимаем во внимание, что давление есть величина постоянная ($P_1 = P_2$).

Задача 10. 1. Переводим температуру из градусов Цельсия в Кельвины.

2. Переводим давление в паскалы (1 МПа = 10^6 Па).

3. Переводим объем из литров в кубические метры (1 л = 10^{-3} м³).

4. Определяем массу газа первоначальную M_1 , а затем конечную M_2 по уравнению:

$$PV = MRT$$

5. Масса израсходованного газа составит:

$$\Delta M = M_1 - M_2.$$

2 ГАЗОВЫЕ СМЕСИ

2.1 Смесь идеальных газов

Под газовой смесью понимается смесь отдельных газов, не вступающих между собой ни в какие химические реакции.

Каждый газ (компонент) в смеси независимо от других газов полностью сохраняет все свои свойства и ведет себя так, как если бы он один занимал весь объем смеси.

Парциальное давление – это давление, которое имел бы каждый газ, входящий в состав смеси, если бы этот газ находился один в том же количестве, в том же объеме и при той же температуре, что и в смеси.

Газовая смесь подчиняется **закону Дальтона**: общее давление смеси газов равно сумме парциальных давлений отдельных газов, составляющих смесь:

$$P_{\text{см}} = P_1 + P_2 + P_3 + \dots + P_n = \sum P_i \quad (2.1)$$

где $P_1, P_2, P_3 \dots P_n$ – парциальные давления.

Состав смеси задается **объемными (r)**, **массовыми (m)** и **молярными (n) долями**, которые определяются соответственно по формулам (2.2), (2.3), (2.4):

$$r_1 = \frac{V_1}{V}, r_2 = \frac{V_2}{V}, r_3 = \frac{V_3}{V} \dots r_n = \frac{V_n}{V}, \quad (2.2)$$

$$m_1 = \frac{M_1}{M}, m_2 = \frac{M_2}{M}, m_3 = \frac{M_3}{M} \dots m_n = \frac{M_n}{M}, \quad (2.3)$$

$$n_1 = \frac{\mu_1}{\nu}, n_2 = \frac{\mu_2}{\nu}, n_3 = \frac{\mu_3}{\nu} \dots n_n = \frac{\mu_n}{\nu} \quad (2.4)$$

где $V_1, V_2, V_3 \dots V_n, V$ – объемы компонентов и смеси;

$M_1, M_2, M_3 \dots M_n, M$ – массы компонентов и смеси;

$\mu_1, \mu_2, \mu_3 \dots \mu_n, \nu$ – количество вещества компонентов и смеси, кмоль.

Для идеального газа по закону Дальтона:

$$r_1 = r'_1, r_2 = r'_2, r_3 = r'_3 \dots r_n = r'_n$$

Так как $V_1 + V_2 + \dots + V_n = V$ и $M_1 + M_2 + \dots + M_n = M$, получим:

$$r_1 + r_2 + \dots + r_n = 1, m_1 + m_2 + \dots + m_n = 1 \quad (2.5)$$

Связь между объемными и массовыми долями определяем из выражения (2.6):

$$r_i = \frac{\frac{m_i}{\mu_i}}{\sum_1^n \frac{m_i}{\mu_i}}; m_i = \frac{r_i \mu_i}{\sum_1^n r_i \mu_i} \quad (2.6)$$

где μ_i – молекулярная масса компонентов.

Газовая постоянная смеси, определяемая через массовые и объемные доли, составит:

$$R_{см} = \sum_1^n m_i R_i, \quad (2.7)$$

$$R_{см} = \frac{8314}{\sum_1^n r_i \mu_i}$$

2.2 Практические задачи

Каждая задача оценивается в один балл.

1. Анализ продуктов сгорания топлива, произведенный с помощью аппарата Орска, показал следующий их состав:

$$r_{CO_2} = 12\%; r_{O_2} = 79\%; r_{CO} = 0,5\%; r_{N_2} = 8,5\%$$

Найдите массовый состав входящих в смесь газов.

Ответ: $m_{CO_2} = 0,160; m_{O_2} = 0,764; m_{CO} = 0,004; m_{N_2} = 0,072.$

2. Массовый состав смеси следующий: $CO_2 = 18,5 \%$; $O_2 = 11,5 \%$ и $N_2 = 70 \%$. До какого давления нужно сжать эту смесь, находящуюся при нормальных условиях, чтобы при температуре $175 \text{ }^\circ\text{C}$, $7,5 \text{ кг}$ ее массы занимали объем равный $3,5 \text{ м}^3$?

Ответ: $P = 0,262$ МПа.

3. Определите массовый состав газовой смеси, состоящей из углекислого газа и азота, если известно, что парциальное давление углекислого газа $P_{CO_2} = 120,5$ кПа, а давление смеси $P_{см} = 299$ кПа.

Ответ: $m_{CO_2} = 0,515$; $m_{N_2} = 0,485$.

4. Определите объемный состав, плотность, удельный объем, молекулярную массу, газовую постоянную смеси и парциальное давление каждого газа, если масса отдельных газов следующая: $CO_2 = 60$ кг; $O_2 = 95$ кг; $N_2 = 101$ кг.

Ответ: $r_{CO_2} = 0,171$; $r_{O_2} = 0,374$; $r_{N_2} = 0,455$; $\rho_{см} = 1,44 \frac{кг}{м^3}$;

$$v_{см} = 0,69 \frac{м^3}{кг}; \mu_{см} = 32,25 \frac{кг}{моль}; R_{см} = 257,8 \frac{Дж}{(кг \cdot К)};$$

$$P_{CO_2} = 0,017 \text{ МПа}; P_{O_2} = 0,038 \text{ МПа}; P_{N_2} = 0,046 \text{ МПа}.$$

5. В резервуаре емкостью $126,9$ м³ находится коксовый газ при давлении $0,49$ МПа и температуре 18 °С. Объемный состав газа следующий:

$$r_{H_2} = 0,4; r_{CH_4} = 0,3; r_{CO} = 0,2; r_{N_2} = 0,1$$

После израсходования некоторого количества газа давление его понизилось до $0,35$ МПа, а температура – до 12 °С. Определите массу израсходованного газа.

Ответ: $\Delta M = 119,796$ кг.

2.3 Методические рекомендации по решению задач

При решении задач все данные необходимо перевести в систему СИ: давление в паскалы (Па); температуру в Кельвины (К); объем в кубические метры (м³). Для решения задач используем уравнения, приведенные в приложении В, а также данные приложения Б.

Задача 1. 1. Объемный состав смеси необходимо перевести в безразмерную величину: например, $r_{CO_2} = 63,2\% = 0,632$.

2. Определяем массовый состав смеси (приложение В):

$$m_{CO_2} = \frac{r_i \mu_i}{\sum_1^n r_i \mu_i} = \frac{r_{CO_2} \cdot \mu_{CO_2}}{r_{CO_2} \cdot \mu_{CO_2} + r_{O_2} \cdot \mu_{O_2} + r_{CO} \cdot \mu_{CO} + r_{N_2} \cdot \mu_{N_2}}$$

$$m_{O_2} = \frac{r_{O_2} \cdot \mu_{O_2}}{r_{CO_2} \cdot \mu_{CO_2} + r_{O_2} \cdot \mu_{O_2} + r_{CO} \cdot \mu_{CO} + r_{N_2} \cdot \mu_{N_2}} \text{ и т. д.}$$

где r – объемный состав газа; μ – молекулярная масса газа (приложение Б).

Задача 2. 1. Массовый состав смеси необходимо перевести в безразмерную величину: например, $m_{CO_2} = 63,2\% = 0,632$.

2. Определяем газовую постоянную смеси (приложение В):

$$R_{см} = \sum_1^n m_i R_i = m_{CO_2} R_{CO_2} + m_{O_2} R_{O_2} + m_{N_2} R_{N_2}$$

Газовые постоянные находим из приложения Б.

3. Определяем давление по уравнению:

$$PV = MR_{см}T$$

Задача 3. Из приложения В определяем следующие величины:

$$P_{CO_2} = r_{CO_2} P_{см};$$

$$r_{N_2} = 1 - r_{CO_2};$$

$$m_i = \frac{r_i \mu_i}{\sum_1^n r_i \mu_i};$$

$$m_{N_2} + m_{CO_2} = 1$$

Задача 4. Из приложения В определяем следующие величины:

$$M_1 + M_2 + \dots + M_n = \sum_1^n M_i = M;$$

$$m_1 = \frac{M_1}{M}; \quad r_i = \frac{\frac{m_i}{\mu_i}}{\sum_1^n \frac{m_i}{\mu_i}};$$

$$\rho_{\text{см}} = \sum_1^n r_i \rho_i; \quad v_{\text{см}} = \frac{1}{\sum_1^n r_i \rho_i};$$

$$\mu_{\text{см}} = \sum_1^n r_i \mu_i; \quad R_{\text{см}} = \frac{8314}{\sum_1^n r_i \mu_i};$$

$$P_i = r_i P_{\text{см}}$$

где $\rho_{\text{см}}$ – плотность смеси; ρ_i – плотность газа (приложение Б); $P_{\text{см}}$ – общее давление смеси (101 325 Па).

Задача 5. 1. Определяем газовую постоянную смеси по формуле (2.7).

2. Определяем массу коксового газа до и после выпуска из резервуара по характеристическому уравнению:

$$PV = MRT$$

3. Определяем массу израсходованного газа:

$$\Delta M = M_1 - M_2$$

3 ТЕПЛОЕМКОСТЬ ГАЗОВ

3.1 Теплоемкость газа

Под теплоемкостью газа (удельной теплоемкостью) понимают количество тепла, необходимое для нагревания (охлаждения) количественной единицы газа (одного килограмма, одного кубического метра или одного киломоля) на один Кельвин (градус Цельсия).

Истинная теплоемкость рабочего тела определяется отношением бесконечно малого количества подведенной (отведенной) к рабочему телу теплоты δQ в данном термодинамическом процессе к бесконечно малому изменению температуры тела dT :

$$C = \frac{\delta Q}{dT} \quad (3.1)$$

Различают следующие удельные теплоемкости:

1) массовая (кДж/(кг · К)):

$$c = \frac{C}{M} \quad (3.2)$$

2) мольная (кДж/(кмоль · К)):

$$\mu c = \frac{C}{\nu} \quad (3.3)$$

где ν – количество вещества, кмоль.

3) объемная (кДж/(м³ · К)):

$$c' = \frac{C}{V} \quad (3.4)$$

Связь между этими теплоемкостями выражается равенствами (3.5):

$$c' = c \cdot \rho, c = c' \cdot v = \frac{\mu c}{\mu}, c' = \frac{\mu c}{22,4} \quad (3.5)$$

где ρ – плотность газа при нормальных условиях, кг/м³;

22,4 м³/кмоль – объем киломоля газа при нормальных условиях.

Теплоемкость газов в большой степени зависит от тех условий, при которых происходит процесс их нагревания или охлаждения. Различают удельные теплоемкости при постоянном давлении (изобарные) и при постоянном объеме (изохорные): c_p, c_v – массовые изобарные и изохорные теплоемкости; $\mu c_p, \mu c_v$ – мольные изобарные и изохорные теплоемкости; c'_p, c'_v – объемные изобарные и изохорные теплоемкости.

Между изобарными и изохорными теплоемкостями существует следующая зависимость – уравнение Майера:

$$c_p - c_v = R, \mu c_p - \mu c_v = \mu R = R_y \quad (3.6)$$

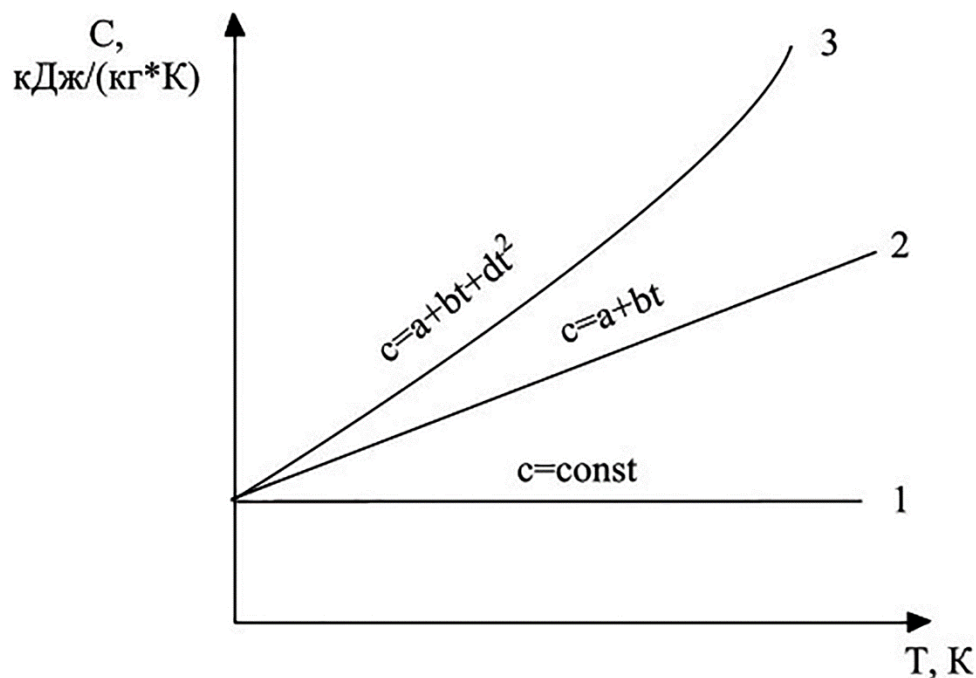


Рисунок 3.1 – Зависимость теплоемкости от температуры

Теплоемкость газов изменяется с изменением температуры (зависимость изображена на рисунке 1 в координатах T_c). Для упрощения теплотехнических расчетов, не требующих большой точности (при невысоких температурах

газов), иногда пользуются **постоянными теплоемкостями** (прямая линия 1 рисунка 1).

В тепловых расчетах котельного агрегата, двигателей внутреннего сгорания иногда приходится считаться с зависимостью теплоемкости от температуры и в этой связи используются **переменные теплоемкости**. Теплоемкость, зависящая от температуры тела прямолинейно, изображается на рисунке 1 линией 2, а криволинейная зависимость изображается линией 3.

Теплоемкости, зависящие от температуры, даются в справочной литературе в виде таблиц с интервалом температур (обычно 50 или 100 °С).

Для определения **средней теплоемкости** в интервале температур от t_1 до t_2 можно использовать формулу (3.7):

$$c_m|_{t_1}^{t_2} = \frac{c_{m_2}t_2 - c_{m_1}t_1}{(t_2 - t_1)} \quad (3.7)$$

При расчете тепловой аппаратуры наиболее важным моментом является определение количества теплоты, участвующего в процессе.

Количество тепла для одного килограмма газа может быть выражено через **истинную удельную теплоемкость** формулой (3.8):

$$q = \int_{t_1}^{t_2} c dt \quad (3.8)$$

где $c = f(t)$ – истинная удельная теплоемкость.

3.2 Практические задачи

Каждая задача оценивается в один балл.

1. Определите значения объемной, массовой и мольной теплоемкостей метана при постоянном давлении, считая теплоемкость постоянной.

Ответ: $\mu C_p = 37,68$ кДж/(кмоль·К); $C_p = 2,35$ кДж/(кг·К);

$C'_p = 1,68$ кДж/(м³·К).

2. Определите среднюю массовую теплоемкость при постоянном давлении для воздуха в пределах температуры от 1 до 890 °С, считая зависимость теплоемкости от температуры линейной.

Ответ: $C_{mp} = 1,39$ кДж/(кг·К).

3. Определите среднюю массовую теплоемкость при постоянном объеме для кислорода при температуре 362 °С, считая зависимость теплоемкости от температуры нелинейной.

Ответ: $C_{mv} = 0,6994$ кДж/(кг·К).

4. Определите среднюю массовую теплоемкость для кислорода при постоянном объеме в пределах температуры от 355 до 600 °С, считая зависимость теплоемкости от температуры нелинейной.

Ответ: $C_{mv} = 0,7825$ кДж/(кг·К).

5. Газовая смесь имеет следующий состав по объему: $\text{CO}_2 = 0,32$; $\text{O}_2 = 0,45$; $\text{N}_2 = 0,23$. Определите, какое количество тепла было затрачено на нагрев одного килограмма смеси и среднюю массовую теплоемкость газовой смеси, если она нагревается от 100 до 400 °С. Теплоемкость считать при постоянном давлении; зависимость от температуры: а) нелинейная и б) $C = \text{const}$.

Ответ: а) $q_p = 303,5$ кДж; $C_{mp_{см}} = 1,0117$ кДж/(кг·К);

б) $q_p = 307,1$ кДж; $C_{mp_{см}} = 1,0236$ кДж/(кг·К).

3.3 Методические рекомендации по решению задач

При решении задач внимательно определяем, какую теплоемкость следует найти и для какого газа:

C_{mp} – средняя массовая теплоемкость при постоянном давлении;

C'_{mp} – средняя объемная теплоемкость при постоянном давлении;

μC_{mp} – средняя киломолярная теплоемкость при постоянном давлении;

C_{mv} – средняя массовая теплоемкость при постоянном объеме;

C'_{mv} – средняя объемная теплоемкость при постоянном объеме;

μC_{mv} – средняя киломолярная теплоемкость при постоянном объеме.

Задача 1. 1. Определяем какой задан газ: одноатомный (Ar), двухатомный (O₂) или трехатомный (CO₂). Воздух считается двухатомным.

2. По приложению Г определяем киломолярную теплоемкость при заданном постоянном значении давления или объема.

3. Определяем массовую теплоемкость:

$$C_p = \frac{\mu C_p}{\mu}$$

$$\text{или } C_v = \frac{\mu C_v}{\mu}$$

Для определения молекулярной массы воспользуемся приложением Б.

4. Определяем объемную теплоемкость:

$$C'_p = \frac{\mu C_p}{22,4}$$

$$\text{или } C'_v = \frac{\mu C_v}{22,4}$$

Задача 2. Определяем уравнения для нахождения теплоемкостей при линейной зависимости от температуры по приложениям Д и Е. При этом учитываем, что $t = t_1 + t_2$.

Задача 3. 1. Определяем теплоемкости при нелинейной зависимости от температуры по приложениям Ж, И, К, Л, М, Н.

2. Для температур, не кратных 100, величины теплоемкостей находят методом интерполирования. Например, определим среднюю массовую теплоемкость (C_{mv}) для кислорода при постоянном объеме для температуры 362 °С, считая зависимость теплоемкости от температуры нелинейной. Так как данное

значение теплоемкости лежит в интервале температур 300–400 °С, то принимаем из приложения Ж для кислорода:

$$C_{mv300^{\circ}\text{C}}=0,69 \text{ кДж}/(\text{кг}\cdot\text{К}) \text{ и } C_{mv400^{\circ}\text{C}}=0,7051 \text{ кДж}/(\text{кг}\cdot\text{К}).$$

Тогда:

$$\begin{aligned} C_{mv362^{\circ}\text{C}} &= C_{mv300^{\circ}\text{C}} + \frac{C_{mv400^{\circ}\text{C}} - C_{mv300^{\circ}\text{C}}}{100} \cdot 62 = \\ &= 0,69 + \frac{0,7051 - 0,69}{100} \cdot 62 = 0,6994 \text{ кДж}/(\text{кг}\cdot\text{К}) \end{aligned}$$

Задача 4. 1. Определяем теплоемкости при нелинейной зависимости для каждой температуры по приложениям Ж, И, К, Л, М, Н.

2. Для нахождения теплоемкости для интервала температур воспользуемся уравнением:

$$C_m = \frac{q}{t_2 - t_1} = \frac{C_{m2} \cdot t_2 - C_{m1} \cdot t_1}{t_2 - t_1}$$

Задача 5. Для определения нелинейной зависимости теплоемкости от температуры:

1. Определяем массовую теплоемкость (приложения Ж, И, К, Л, М, Н) смеси при задании смеси объемными долями отдельно для температуры t_1 и температуры t_2 по уравнению:

$$C_{\text{см}} = \frac{\sum_{i=1}^n r_i \mu_i C_i}{\sum_{i=1}^n r_i \mu_i}$$

2. Количество теплоты составит:

$$q = C_{\text{см}2} \cdot t_2 - C_{\text{см}1} \cdot t_1$$

3. Для нахождения теплоемкости для интервала температур воспользуемся уравнением:

$$C_{\text{см}} = \frac{q}{t_2 - t_1}$$

Для определения линейной зависимости теплоемкости от температуры и теплоемкости постоянной:

1. Определяем массовую теплоемкость смеси при задании смеси объемными долями для температуры t_1 и температуры t_2 по уравнению:

$$c_{\text{см}} = \frac{\sum_{i=1}^n r_i \mu_i c_i}{\sum_{i=1}^n r_i \mu_i}$$

Для *линейной зависимости теплоемкости от температуры* используем приложения Д и Е, где $t = t_1 + t_2$.

Для *постоянной теплоемкости* по приложению Г определяем киломолярную теплоемкость при заданном постоянном значении давления или объема, а далее по уравнениям:

$$C_p = \frac{\mu C_p}{\mu}$$

$$\text{или } C_v = \frac{\mu C_v}{\mu}$$

2. Количество теплоты составит:

$$q = C_{\text{см}}(t_2 - t_1)$$

4 ПЕРВЫЙ ЗАКОН ТЕРМОДИНАМИКИ

4.1 Теплота, работа, внутренняя энергия.

Первый закон термодинамики. Энтальпия газов

4.1.1 Теплота, работа, внутренняя энергия

Тела, участвующие в термодинамических процессах, обмениваются энергией, и ее передача от одного тела к другому происходит двумя способами.

Первый способ реализуется при непосредственном контакте тел, имеющих различную температуру, путем обмена кинетической энергией между молекулами соприкасающихся тел либо лучистым переносом внутренней энергии излучающих тел путем электромагнитных волн. При этом энергия передается от более нагретого тела к менее нагретому телу – это передача энергии в форме теплоты.

Количество энергии, переданной первым способом от одного тела к другому, называется количеством теплоты (Q , Дж). Теплота представляет собой совокупность микрофизических процессов передачи энергии.

Второй способ передачи энергии связан с наличием силовых полей или внешнего давления. Передачу энергии от одного тела к другому, связанную с изменением объема рабочего тела, с перемещением его во внешнем пространстве или с изменением его положения, называют **работой** (L , Дж). В производстве работы всегда участвуют два или более тела. Первое тело, производящее работу, отдает энергию, а второе тело получает энергию.

Работа – это совокупность макрофизических процессов передачи энергии.

Количество работы для одного килограмма и для определенной массы рабочего тела определится соответственно:

$$l = \int_{v_1}^{v_2} P dv, \quad (4.1)$$

$$L = M \int_{V_1}^{V_2} P dV$$

Количество теплоты, полученное (отданное) телом, и работа, совершенная (затраченная) над телом, зависят от условий перехода тела из начального состояния в конечное, то есть зависят от характера термодинамического процесса.

Внутренняя энергия реальных газов – это совокупность всех видов энергий молекул (кинетической и потенциальной), заключенной в теле или системе тел.

Внутренняя энергия для идеальных газов включает кинетическую энергию поступательного и вращательного движения молекул, а также колебательного движения атомов в самой молекуле.

Внутренняя энергия (U , Дж) является функцией двух основных параметров состояния газа, то есть:

$$U = f(P, T), U = f(v, T), U = f(P, v) \quad (4.2)$$

Изменение внутренней энергии не зависит от характера протекания процесса, а зависит от начального и конечного состояний газа, определяемых его параметрами $P_1 v_1 T_1$ и $P_2 v_2 T_2$.

Величина изменения внутренней энергии легко определяется для процесса при постоянном объеме, так как в этом случае все сообщенное тепло в процессе тратится на изменение внутренней (кинетической) энергии газа:

$$\Delta u = \Delta u_v = u_2 - u_1 = c_v(T_2 - T_1) \quad (4.3)$$

Таким образом, **какой бы процесс не совершался с изменением температуры от T_1 до T_2 , изменение внутренней энергии идеального газа во всех этих процессах будет одинаково и равно изменению его внутренней**

энергии в процессе при постоянном объеме и при том же изменении температур.

Условимся считать:

$Q > 0$ – теплота подводится к системе, система нагревается;

$Q < 0$ – теплота отводится от системы, система охлаждается;

$L > 0$ – работа совершается системой, газ расширяется;

$L < 0$ – работа совершается над системой, газ сжимается;

$\Delta U > 0$ – внутренняя энергия тела увеличивается;

$\Delta U < 0$ – внутренняя энергия тела уменьшается.

4.1.2 Первый закон термодинамики

Первый закон термодинамики – основа термодинамической теории, является частным случаем закона сохранения и превращения энергии. Он формулируется следующим образом: **Энергия не исчезает и не возникает вновь, она лишь переходит из одного вида в другой в различных физических процессах.**

Для термодинамических процессов закон устанавливает взаимосвязь между теплотой, работой и изменением внутренней энергии термодинамической системы: **Теплота, подведенная к системе, расходуется на изменение энергии системы и совершение работы.**

Уравнение первого закона термодинамики имеет следующий вид:

$$Q = (U_2 - U_1) + L \quad (4.4)$$

где Q – количество теплоты, подведенное (отведенное) к системе, Дж;
 $(U_2 - U_1)$ – изменение внутренней энергии в данном процессе, Дж;
 L – работа, совершенная системой (над системой), Дж.

Первый закон термодинамики для единицы массы вещества:

$$q = Q/M = (u_2 - u_1) + l \quad (4.5)$$

где M – масса вещества, кг.

Аналитическое выражение первого закона термодинамики или основное уравнение теплоты в дифференциальной форме для одного килограмма любого газа имеет следующий вид:

$$dq = du + dl \text{ или } dq = c_v dT + Pdv \quad (4.5)$$

Удобное для расчетов уравнение для одного килограмма идеального газа имеет вид выражения (4.6):

$$q = c_v(T_2 - T_1) + \int_{v_1}^{v_2} Pdv \quad (4.6)$$

Все вышеперечисленные уравнения выражают первый закон термодинамики и читаются так: **сообщенное телу тепло расходуется на увеличение внутренней энергии тела и на совершение телом внешней работы.**

Первый закон термодинамики указывает, что для получения полезной работы в непрерывно действующем тепловом двигателе надо подводить (затрачивать) теплоту: «Двигатель, постоянно производящий работу и не потребляющий никакой энергии, называется вечным двигателем первого рода»; «Вечный двигатель первого рода невозможен».

4.1.3 Энтальпия газов

Удельная энтальпия представляет сложную функцию вида (4.7) и измеряется в джоулях на килограмм:

$$h = u + Pv \quad (4.7)$$

Поскольку эта величина является функцией основных термодинамических параметров состояния (P , v , T), то и она – параметр состояния.

Вторая форма дифференциального уравнения первого закона термодинамики имеет вид выражения (4.8):

$$dq = dh - vdp \quad (4.8)$$

Перепишем уравнение (4.8) в следующем виде:

$$dh = dq + vdp \quad (4.9)$$

Если рассмотреть процесс при постоянном давлении, то:

$$dh = dq, c_p = \frac{dq}{dT}$$

Получим уравнение для любого процесса, так как изменение энтальпии однозначно определяется начальным и конечным состоянием системы:

$$dh = c_p dT \quad (4.10)$$

4.2 Практические задачи

Каждая задача оценивается в один балл.

1. В котельной электрической станции за 350 часов работы сожжено 600 тонн каменного угля, имеющего теплоту сгорания 29 000 кДж/кг. Определите среднюю мощность станции, если в электрическую энергию превращено 18 % теплоты, полученной при сгорании угля.

Ответ: $N = 2\,486$ кВт.

2. Мощность турбогенератора 12 999 кВт, КПД генератора – 0,97. Какое количество воздуха нужно пропустить через генератор для его охлаждения, если конечная температура воздуха не должна превышать 55 °С? Температура в машинном отделении равна 20 °С; средняя теплоемкость $C_{pm} = 1,0$ кДж/(кг·К).

Ответ: $M = 11,1$ кг.

3. В калориметр, содержащий 0,59 кг воды температурой 20 °С, опускают стальной образец массой 0,39 кг, нагретый до 200 °С. Найдите теплоемкость

стали, если повышение температуры воды составило $12,5\text{ }^{\circ}\text{C}$. Теплоемкость воды равна $4,19\text{ кДж}/(\text{кг}\cdot\text{К})$. Потерями пренебречь.

Ответ: $C_{ст} = 0,473\text{ кДж}/(\text{кг}\cdot\text{К})$.

4. Найдите изменение внутренней энергии $1,99\text{ м}^3$ воздуха, если его температура понижается от $250\text{ }^{\circ}\text{C}$ до $70\text{ }^{\circ}\text{C}$. Зависимость теплоемкости от температуры принять линейной. Начальное давление воздуха составляет $0,59\text{ МПа}$.

Ответ: $\Delta U = -1\ 039\text{ кДж}/\text{кг}$.

5. Паросиловая установка мощностью $4,19\text{ МВт}$ имеет КПД $\eta_{ст} = 0,19$. Определите часовой расход топлива, если теплота его сгорания составляет $Q_{н}^p = 25000\text{ кДж}/\text{кг}$.

Ответ: $B = 3\ 176\text{ кг}/\text{ч}$.

4.3 Методические рекомендации по решению задач

Задача 1. 1. Количество теплоты, превращенной в электрическую энергию за время работы, составит:

$$Q = M \cdot Q_{н}^p \cdot \eta$$

где M – масса топлива, кг; $Q_{н}^p$ – теплота сгорания топлива, кДж/кг; η – коэффициент полезного действия станции.

2. Эквивалентная ей электрическая энергия и работа равны:

$$L = \frac{Q}{3600}$$

3. Средняя электрическая мощность станции составит:

$$N = \frac{L}{\tau}$$

где τ – время работы станции, ч.

Задача 2. 1. Определяем, какое количество КПД идет на нагрев воздуха:

$$\eta = 1 - \eta_{г}$$

2. Количество теплоты, идущей на нагрев воздуха, составит:

$$Q = N \cdot \eta$$

3. Количество воздуха, пропущенного через генератор для его охлаждения, определяем из уравнения:

$$Q = M \cdot C_{mp}(t_2 - t_1)$$

Задача 3. 1. Определяем конечную температуру воды:

$$t_{в2} = t_{в1} + \Delta t$$

2. Определяем конечную температуру стали:

$$t_{ст2} = t_{в2}$$

3. Количество теплоты, затраченной на нагрев воды, определим из выражения:

$$Q_{в} = M_{в} \cdot C_{в}(t_{в2} - t_{в1}) = M_{в} \cdot C_{в} \cdot \Delta t_{в}$$

где $C_{в}$ – теплоемкость воды (равна 4,19 кДж/(кг·К)).

4. Количество теплоты, отданной сталью воде, составит:

$$Q_{ст} = Q_{в}$$

5. Определяем теплоемкость стали:

$$Q_{ст} = M_{ст} \cdot C_{ст}(t_{ст2} - t_{ст1})$$

Задача 4. 1. Определяем массу при первом состоянии газа по уравнению:

$$PV = MRT$$

2. Определяем массовую теплоемкость газа при постоянном объеме по приложению Е.

3. Определяем изменение внутренней энергии:

$$\Delta U = MC_{mv}(t_2 - t_1)$$

Задача 5. 1. Определяем удельный расход топлива из уравнения:

$$\eta_{ст} = \frac{3600}{Q_{н}^p \cdot b}$$

где $Q_{н}^p$ – теплота сгорания топлива, кДж/кг; b – удельный расход топлива, кг/(кВт·ч).

2. Часовой расход топлива составит:

$$B = N \cdot b$$

где N – мощность теплосиловой установки, кВт.

5 ОСНОВНЫЕ ГАЗОВЫЕ ПРОЦЕССЫ

5.1 Термодинамические процессы идеальных газов

К термодинамическим процессам относятся **изохорный, изотермический, изобарный, адиабатный и политропный процессы**. Все процессы идеальные и обратимые; принимаем $c = const$.

Для всех этих процессов устанавливается общий метод исследования, который заключается в следующем:

1. Выводится уравнение процесса кривой в Pv - и Ts - диаграммах.

2. Устанавливается зависимость между основными параметрами рабочего тела в начале и в конце процесса.

3. Определяется изменение внутренней энергии по формуле, справедливой для всех процессов идеального газа:

$$\Delta u = \int_{T_1}^{T_2} c_{mv} dT$$

4. Вычисляется работа:

$$l = \int_{v_1}^{v_2} P dv$$

5. Определяется количество теплоты, участвующее в процессе:

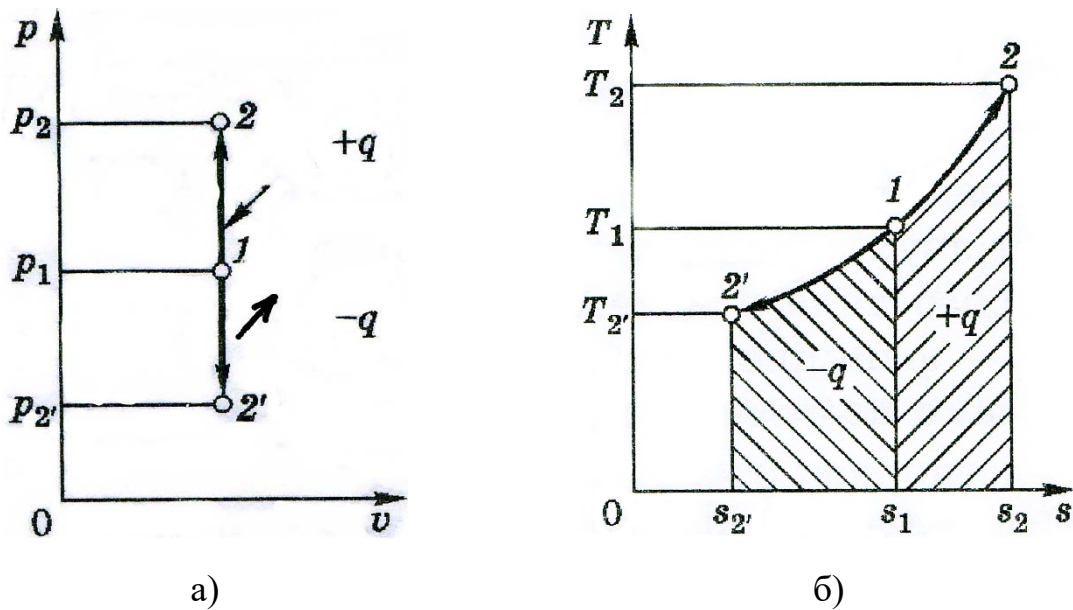
$$q = c_v(T_2 - T_1) + \int_{v_1}^{v_2} P dv$$

6. Определяется изменение энтропии:

$$ds = c_v \ln \frac{T_2}{T_1} + R \ln \frac{v_2}{v_1};$$

$$ds = c_p \ln \frac{T_2}{T_1} - R \ln \frac{P_2}{P_1}; ds = c_v \ln \frac{P_2}{P_1} + c_p \ln \frac{v_2}{v_1}$$

Изохорный процесс представлен на рисунке 5.1.



а) в Pv - диаграмме; б) в Ts - диаграмме

Рисунок 5.1 – Изохорный процесс

Уравнение состояния процесса: $v = const.$

Связь между параметрами: $P_2/P_1 = T_2/T_1.$

Так как $v_2 = v_1$, то работа изменения объема $l = 0$. Уравнение первого закона термодинамики имеет вид:

$$q_v = \Delta u = c_v(T_2 - T_1)$$

Изменение энтропии составит:

$$ds = s_2 - s_1 = c_v \ln \frac{T_2}{T_1}$$

Изобарный процесс показан на рисунке 5.2.

Уравнение состояния процесса: $P = const.$

Связь между параметрами: $v_2/v_1 = T_2/T_1, v/T = const.$

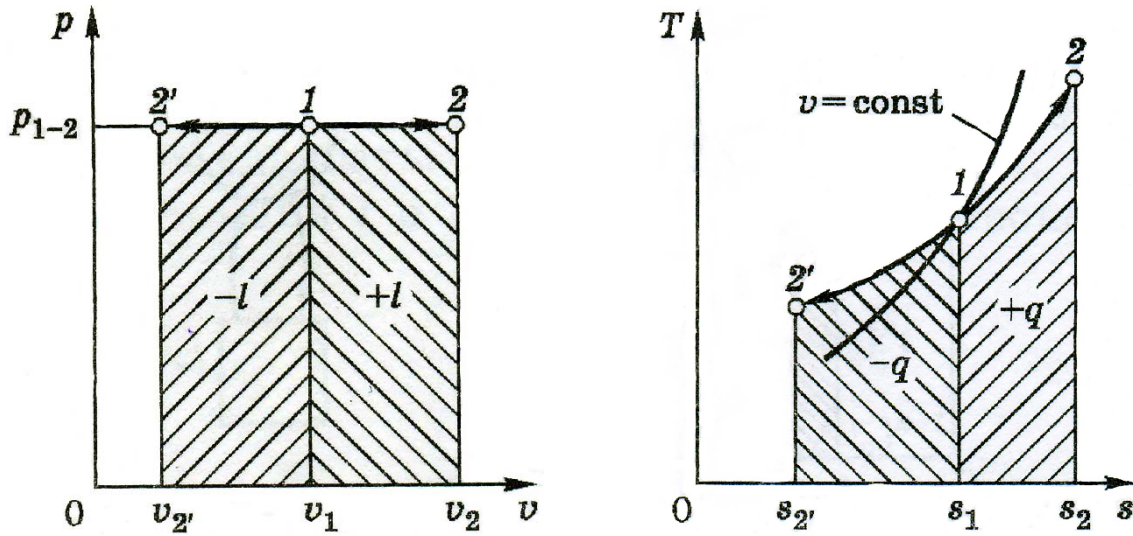
Работа данного процесса: $l = P(v_2 - v_1).$

Уравнение первого закона термодинамики имеет вид:

$$q_P = \Delta u + l = c_P(T_2 - T_1)$$

Изменение энтропии составит:

$$ds = c_p \ln \frac{T_2}{T_1}$$

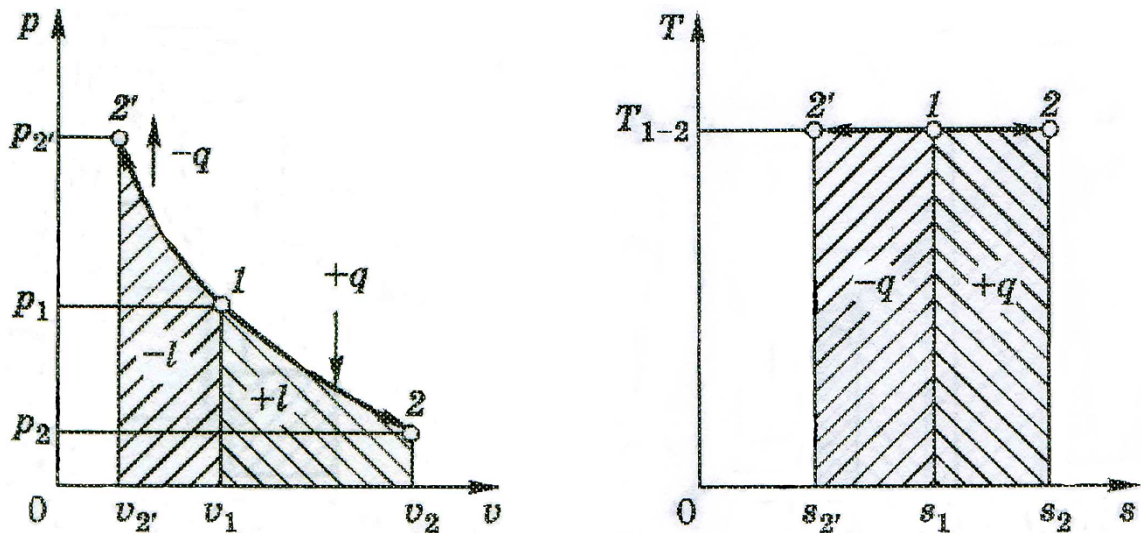


а) б)

а) в Pv - диаграмме; б) в Ts - диаграмме

Рисунок 5.2 – Изобарный процесс

Изотермический процесс представлен на рисунке 5.3.



а) б)

а) в Pv - диаграмме; б) в Ts - диаграмме

Рисунок 5.3 – Изотермический процесс

Уравнение состояния процесса: $T = const, Pv = const$.

Связь между параметрами: $P_2/P_1 = v_1/v_2$.

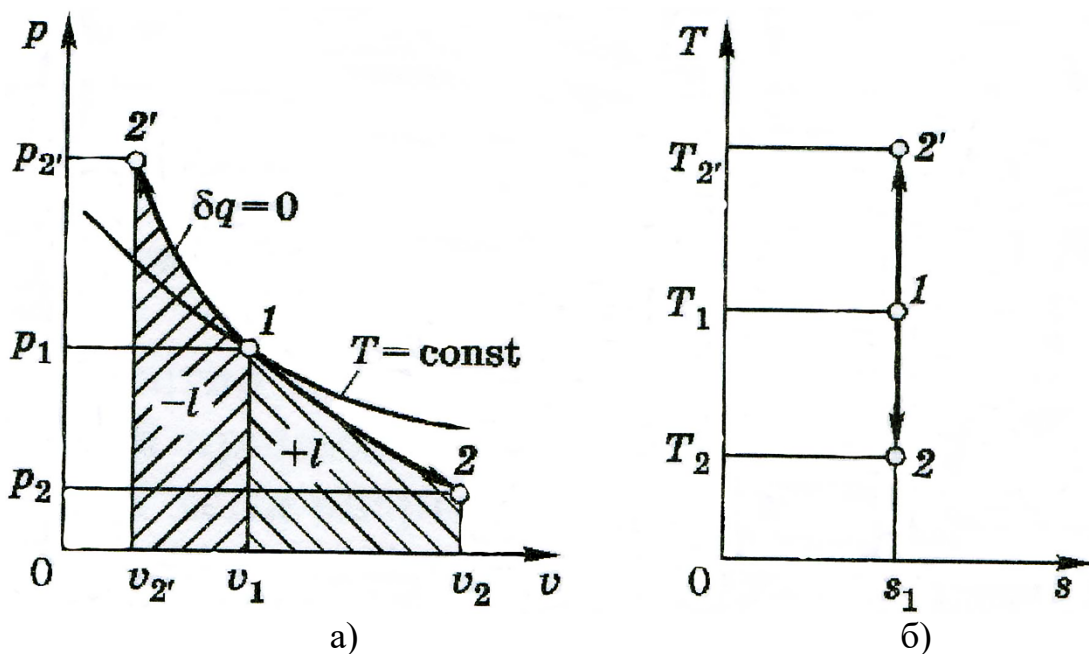
Так как $T_2 = T_1$, то $\Delta u = 0$ и $u = const$. Уравнение первого закона термодинамики будет иметь вид:

$$q = l = RT \ln(P_1/P_2) = RT \ln(v_2/v_1)$$

Изменение энтропии составит:

$$s_2 - s_1 = R \ln(P_1/P_2) = R \ln(v_2/v_1)$$

Адиабатный процесс показан на рисунке 5.4.



а) в Pv - диаграмме; б) в Ts - диаграмме
Рисунок 5.4 – Адиабатный процесс

В данном процессе не подводится и не отводится тепло, то есть $q = 0$.

Уравнение состояния процесса: $Pv^k = const$, где $k = c_p/c_v$ – показатель адиабаты.

Связь между параметрами:

$$\frac{P_2}{P_1} = (v_1/v_2)^k, \frac{T_2}{T_1} = (v_1/v_2)^{k-1}, \frac{T_2}{T_1} = (P_1/P_2)^{(k-1)/k}$$

Уравнение первого закона термодинамики имеет вид:

$$l = \Delta u = c_v(T_1 - T_2)$$

$$\text{или } l = \frac{R}{k-1} (T_1 - T_2) = \frac{1}{k-1} (P_1 v_1 - P_2 v_2)$$

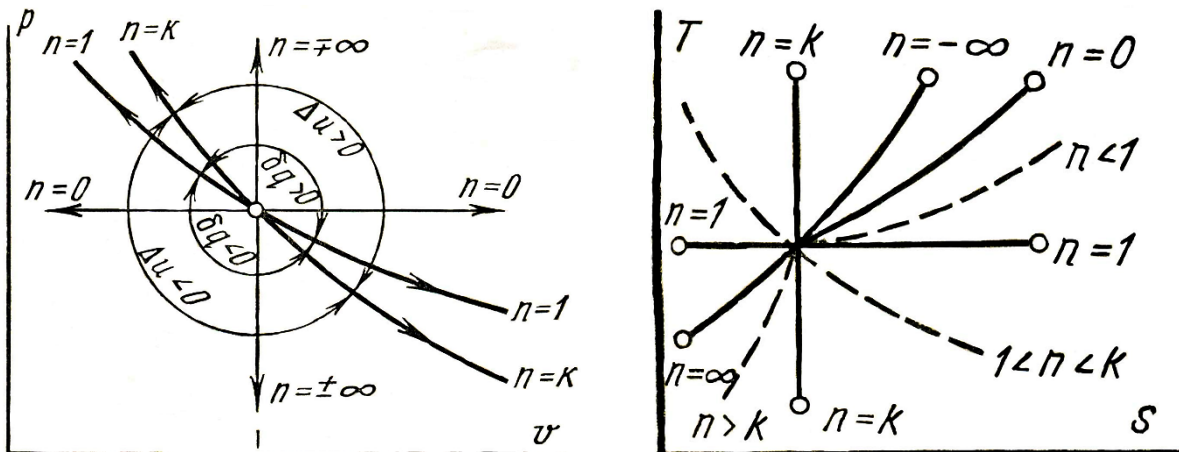
Изменение энтропии составит:

$$s_2 - s_1 = 0, s = const$$

Политропным процессом называется процесс, все состояния которого удовлетворяют условию $Pv^n = const$, где n – показатель политропы.

Теплоемкость политропного процесса идеального рабочего тела определяется формулой (5.1):

$$c_n = c_v \frac{n - k}{n - 1} \quad (5.1)$$



а)

а) в Pv - диаграмме; б) в Ts - диаграмме

б)

Рисунок 5.5 – Политропные процессы идеального газа

Изобарный, изохорный, изотермический и адиабатный процессы являются частными случаями политропного процесса (рис. 5.5), если они проходят при постоянной теплоемкости:

при $n = \pm\infty$, $c_n = c_v$, $v = const$ (изохорный);

при $n = 0$, $c_n = c_p$, $P = const$ (изобарный);

при $n = 1$, $c_n = \pm\infty$, $Pv = const$, $T = const$ (изотермический);

при $n = k$, $Pv^k = const$ (адиабатный).

Работа политропного процесса:

$$l = \frac{R}{n-1}(T_1 - T_2) = \frac{1}{n-1}(P_1v_1 - P_2v_2)$$

Теплота процесса:

$$q = c_n(T_2 - T_1) = c_v \frac{n-k}{n-1}(T_2 - T_1)$$

Изменение энтропии:

$$s_2 - s_1 = \int_1^2 \frac{\delta q}{T} = c_n \ln \frac{T_2}{T_1} = c_v \frac{n-k}{n-1} \ln \frac{T_2}{T_1}$$

5.2 Практические задачи

Каждая задача оценивается в один балл.

1. Сосуд объемом 60 л заполнен кислородом при давлении $P_1 = 12,5$ МПа. Определите конечное давление кислорода и количество сообщенной ему теплоты, если начальная температура газа $t_1 = 10$ °С, а конечная $t_2 = 30$ °С. Теплоемкость кислорода считать постоянной.

Ответ: $P_2 = 13,4$ МПа; $Q = 133$ кДж.

2. 0,2 м³ воздуха с начальной температурой 18 °С подогревают в цилиндре диаметром 0,5 м при постоянном давлении 0,2 МПа до температуры 200 °С. Определите работу расширения, перемещения поршня и количество затраченной теплоты, считая зависимость теплоемкости от температуры линейной.

Ответ: $L = 26$ кДж; $h = 0,66$ м; $Q = 88,5$ кДж.

3. Воздух в количестве 0,5 кг при $P_1 = 0,5$ МПа и $t_1 = 30$ °С расширяется изотермически до пятикратного объема ($V_2/V_1 = 5$). Определите работу, конечное давление и количество теплоты, сообщаемой газу.

Ответ: $P_2 = 0,100$ МПа; $L = Q = 70,01$ кДж.

4. 1 кг воздуха при температуре $t_1 = 15^\circ\text{C}$ и начальном давлении $P_1 = 0,1$ МПа адиабатно сжимается до 0,8 МПа. Найдите работу, конечный объем и конечную температуру.

Ответ: $t_2 = 249^\circ\text{C}$; $V_2 = 0,187$ м³/кг; $l = -167,9$ кДж/кг.

5. 20 м³ воздуха при давлении $P_1 = 0,1$ МПа и температуре $t_1 = 18^\circ\text{C}$, сжимается политропно до давления $P_2 = 0,8$ МПа, причем показатель политропы $m = 1,25$. Какую работу необходимо затратить для получения одного кубического метра сжатого воздуха и какое количество теплоты отводится при сжатии?

Ответ: $l = -1\,089$ кДж/м³; $Q = -1\,558$ кДж.

5.3 Методические рекомендации по решению задач

При решении задач необходимо все данные перевести в систему СИ: давление в паскалы (Па); температуру в Кельвины (К); объем в кубические метры (м³).

Задача 1. 1. Определяем конечное давление газа по уравнению:

$$\frac{P_1}{P_2} = \frac{T_1}{T_2}$$

2. Определяем массу газа при начальном или конечном состояниях из характеристического уравнения для определенной массы:

$$P_1V = MRT_1 \text{ и } P_2V = MRT_2$$

3. Определяем по приложению Г и уравнению $C_v = \frac{\mu C_v}{\mu}$ теплоемкость.

4. Определяем количество сообщенной газу теплоты:

$$Q_v = MC_v(T_2 - T_1)$$

Задача 2. 1. По приложению Е определяем массовую среднюю теплоемкость при постоянном давлении (C_{mp}) (температуру оставляем в градусах Цельсия).

2. Определяем конечный объем по уравнению:

$$\frac{V_1}{V_2} = \frac{T_1}{T_2}$$

3. По характеристическому уравнению определяем массу газа:

$$PV_1 = MRT_1 \text{ и } PV_2 = MRT_2$$

4. Работу расширения находим по любому из двух уравнений:

$$L = P(V_2 - V_1) \text{ или } L = MR(T_2 - T_1)$$

5. Определяем количество затраченной теплоты:

$$Q_p = MC_{mp}(T_2 - T_1)$$

6. Определяем положения поршня:

$$V_1 = \frac{\pi d^2}{4} \cdot h_1 \text{ и } V_2 = \frac{\pi d^2}{4} \cdot h_2$$

7. Перемещение поршня рассчитываем как разность:

$$h = h_2 - h_1$$

Задача 3. 1. Определяем конечное давление по уравнению:

$$\frac{P_1}{P_2} = \frac{V_2}{V_1}$$

2. Начальный объем газа определяем по характеристическому уравнению:

$$P_1V_1 = MRT_1$$

3. Находим работу, совершаемую газом, по одному из уравнений:

$$L = P_1V_1 \ln \frac{V_2}{V_1} \text{ или } L = P_1V_1 \ln \frac{P_1}{P_2}$$

4. В изотермическом процессе $L = Q$.

Задача 4. 1. Из приложения Г определяем показатель адиабаты:

$$k = \frac{\mu C_p}{\mu C_v}$$

2. Определяем конечную температуру из уравнения:

$$\frac{T_2}{T_1} = \left(\frac{P_2}{P_1}\right)^{\frac{k-1}{k}}$$

3. Переводим температуру в градусы Цельсия:

$$t_2 = T_2 - 273.$$

4. Из характеристического уравнения для одного килограмма определяем начальный удельный объем газа:

$$P_1 v_1 = RT_1$$

5. По одному из указанных уравнений определяем конечный объем газа:

$$\frac{P_2}{P_1} = \left(\frac{v_1}{v_2}\right)^k \quad \text{или} \quad \frac{T_2}{T_1} = \left(\frac{v_1}{v_2}\right)^{k-1}$$

6. Находим работу по любому из уравнений:

$$l = \frac{1}{k-1} (P_1 v_1 - P_2 v_2), \quad l = \frac{P_1 v_1}{k-1} \left[1 - \left(\frac{v_1}{v_2}\right)^{k-1} \right],$$

$$l = \frac{R}{k-1} (T_1 - T_2), \quad l = \frac{P_1 v_1}{k-1} \left[1 - \left(\frac{P_2}{P_1}\right)^{\frac{k-1}{k}} \right]$$

Задача 5. 1. Температуру в конце сжатия определяем по уравнению:

$$\frac{T_2}{T_1} = \left(\frac{P_2}{P_1}\right)^{\frac{m-1}{m}}$$

2. Массу газа находим из характеристического уравнения для начального состояния газа:

$$P_1 V_1 = MRT_1$$

3. Объем воздуха в конце сжатия находим из характеристического уравнения для конечного состояния газа:

$$P_2 V_2 = MRT_2$$

4. Работу газа рассчитываем по формуле:

$$L = \frac{1}{m-1} (P_1 V_1 - P_2 V_2)$$

5. Работа, затрачиваемая на получение одного кубического метра сжатого воздуха составит:

$$l = \frac{L}{V_2}$$

6. Определяем по приложению Г теплоемкость, используя уравнение:

$$C_v = \frac{\mu C_p}{\mu}$$

7. Из приложения Г определяем показатель адиабаты:

$$k = \frac{\mu C_p}{\mu C_v}$$

8. Количество теплоты, отводимой при сжатии воздуха, находим из формулы:

$$Q = M C_v \frac{m - k}{m - 1} (t_2 - t_1)$$

6 ВОДЯНОЙ ПАР

6.1 Водяной пар

Водяной пар является одним из основных рабочих тел в паровых турбинах и машинах, в атомных установках, а также теплоносителем в теплообменниках.

Пар – газообразное тело в состоянии, близком к кипящей жидкости.

Парообразование – процесс превращения вещества из жидкого состояния в парообразное.

Испарение – парообразование, происходящее всегда при любой температуре с поверхности жидкости или твердого тела.

Кипение – процесс, происходящий при определенной температуре, зависящей от природы жидкости и давления, под которым она находится; происходит парообразование во всей массе жидкости.

Обратный процесс парообразования – **конденсация**. Она протекает при постоянной температуре.

Процесс перехода твердого вещества непосредственно в пар называется **сублимацией** или **возгонкой**. Обратный процесс перехода пара в твердое состояние называется **десублимацией**.

Тело может находиться в трех фазах, состояниях (твердом, жидком, газообразном). Переход из одного состояния в другое называется **фазовым переходом**. На рисунке 6.1 представлена фазовая PT -диаграмма вещества.

При испарении жидкости в ограниченном пространстве (в паровых котлах) одновременно происходит обратное явление – конденсация пара. Если скорость конденсации станет равной скорости испарения, то наступает **динамическое равновесие**. Пар в этом случае имеет максимальную плотность и называется насыщенным паром.

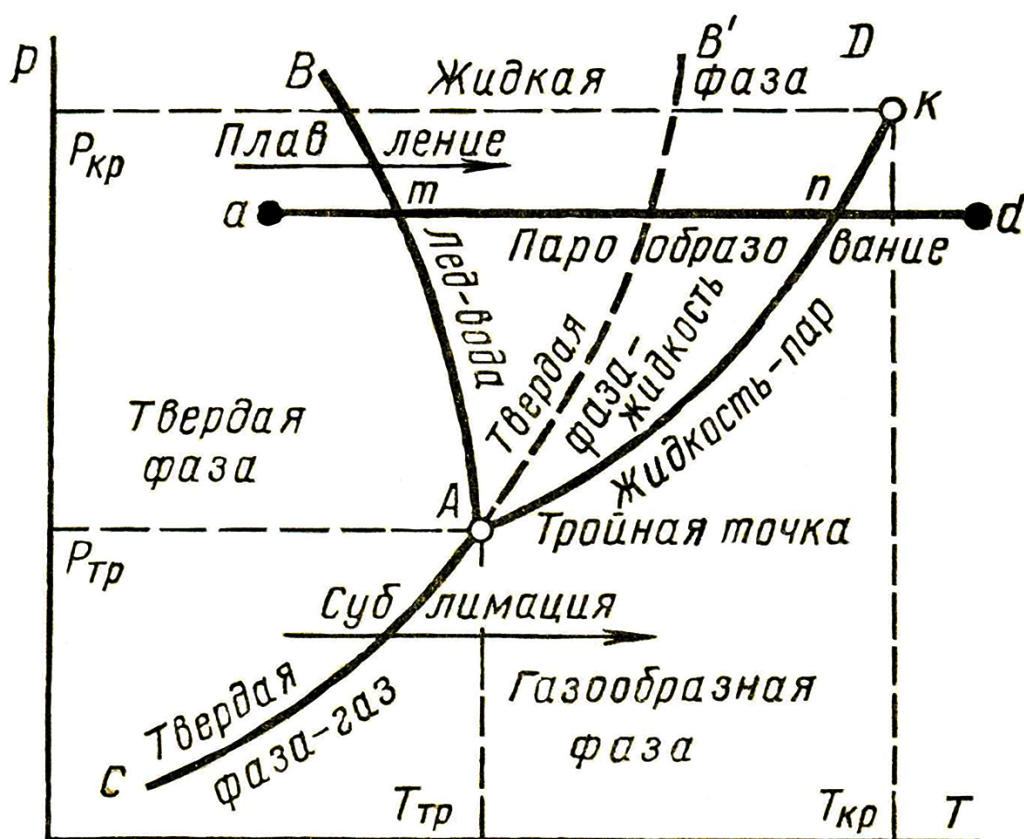


Рисунок 6.1 – Фазовая PT -диаграмма

Если температура пара выше температуры насыщенного пара того же давления, то такой пар называется **перегретым**.

Разность между температурой перегретого пара и температурой насыщенного пара того же давления называется **степенью перегрева**.

Так как удельный объем перегретого пара больше удельного объема насыщенного пара, то плотность перегретого пара меньше плотности насыщенного пара. Поэтому перегретый пар является ненасыщенным паром.

В момент испарения последней капли жидкости в ограниченном пространстве без изменения температуры и давления образуется **сухой насыщенный пар**. Состояние такого пара определяется одним параметром – давлением.

Механическая смесь сухого пара и мельчайших капелек жидкости называется **влажным паром (влажным насыщенным)**.

Массовая доля сухого пара во влажном паре называется **степенью сухости** и определяется по формуле (6.1):

$$x = \frac{M_{\text{сп}}}{M_{\text{вп}}} \quad (5.1)$$

где $M_{\text{сп}}$ – масса сухого пара во влажном;
 $M_{\text{вп}}$ – масса влажного пара.

Массовая доля $(1 - x)$ жидкости во влажном паре называется **степенью влажности**. Для кипящей жидкости при температуре насыщения $x = 0$, для сухого насыщенного пара: $x = 1$.

6.2 Практические задачи

Каждая задача оценивается в один балл.

1. Определите температуру, удельный объем, энтальпию и энтропию сухого насыщенного пара при давлении 1 МПа по таблице.

Ответ: $t_{\text{н}} = 179,88 \text{ }^\circ\text{C}$; $v'' = 0,1946 \text{ м}^3/\text{кг}$; $h'' = 2\,778 \text{ кДж/кг}$;
 $S'' = 6,587 \text{ кДж}/(\text{кг}\cdot\text{К})$.

2. Определите массу 9 м³ пара при давлении 0,8 МПа и степени влажности $(x - 1) = 10 \%$.

Ответ: $M = 41,67 \text{ кг}$.

3. Определите энтальпию, энтропию, внутреннюю энергию влажного насыщенного пара при давлении 1,3 МПа и степени сухости пара $x = 0,98$.

Ответ: $u_x = 263 \text{ кДж}$; $s_x = 1\,212 \text{ кДж}/(\text{кг}\cdot\text{К})$; $h_x = 2\,748,5 \text{ кДж/кг}$.

4. В закрытом сосуде содержится сухой насыщенный водяной пар при давлении 1 МПа. Определите давление, степень сухости пара и количество отданной им теплоты, если он охладился до температуры 60 °С.

Ответ: $P_2 = 0,019917 \text{ МПа}$; $x = 0,0253$; $q_v = -2276,5 \text{ кДж/кг}$.

5. Пользуясь диаграммой h_s водяного пара, определите энтальпию:

- 1) сухого насыщенного пара при давлении 2 МПа;
- 2) влажного насыщенного пара при давлении 2,0 МПа, $x = 0,85$;
- 3) перегретого пара при давлении 2,0 МПа и температуре 400 °С.

Ответ: 1) $h'' = 2\,800$ кДж/кг; 2) $h_x = 2\,520$ кДж/кг; 3) $h = 3\,260$ кДж/кг.

6.3 Методические рекомендации по решению задач

Задача 1. 1. По данным приложения П (по давлению) определяем заданные параметры.

Задача 2. 1. Переводим влажность в безразмерную величину:

$$\frac{(1 - x)}{100}$$

2. Определяем степень сухости пара:

$$x = 1 - (1 - x)$$

3. По данным приложения П, по заданному давлению определяем удельный объем сухого пара v'' .

4. Удельный объем влажного пара находим по уравнению:

$$v_x = v'' \cdot x$$

5. Определяем массу пара:

$$M = \frac{V}{v_x}$$

Задача 3. 1. По заданному давлению (приложение П) находим энтальпию h' и энтропию S' жидкости при температуре насыщения; удельный объем v'' и энтропию S'' сухого пара, теплоту парообразования r .

2. По уравнению для влажного пара определяем энтальпию:

$$h_x = h' + rx$$

3. Удельный объем влажного пара определяем по уравнению:

$$v_x = v'' \cdot x$$

4. Определяем внутреннюю энергию:

$$u_x = h_x - Pv_x$$

где P – давление пара, кПа.

5. Энтропия влажного насыщенного пара составит:

$$S_x = S' + (S'' - S')x$$

6. Определяем необходимое количество подведенной теплоты по уравнению:

$$q = h_x - h'$$

Задача 4. 1. Используя приложение Р, получаем при t_2 давление пара P_2 .

2. По заданному давлению P_1 , в приложении П находим удельный объем сухого пара. Так как процесс происходит при постоянном объеме:

$$v_1 = v_2 = v_1''$$

3. Пользуясь приложением Р, по заданной температуре t_2 , определяем удельный объем сухого пара v_2'' .

4. Определяем конечную степень сухости:

$$x_2 = \frac{v_1''}{v_2''}$$

5. Значение $h_1 = h_1''$ находим в приложении П по P_1 .

6. Определяем значение внутренней энергии пара в начале процесса:

$$u_1 = h_1 - P_1 v_1$$

7. Пользуясь приложением Р, по заданной t_2 , определяем энтальпию жидкости при температуре насыщения h'_2 и теплоту парообразования r .

8. Значение энтальпии пара в конце процесса составит:

$$h_2 = h'_2 + r x_2$$

9. Определяем значение внутренней энергии пара в конце процесса:

$$u_2 = h_2 - P_2 v_2$$

При этом $v_1 = v_2 = v_1''$ – удельный объем пара при изохорном процессе, м³/кг.

10. Количество отданной паром теплоты определим по уравнению для

изохорного процесса:

$$q_v = u_2 - u_1$$

Задача 5. 1. Перевести давление в бары (1 МПа = 10 бар).

2. По hs -диаграмме водяного пара определяем энтальпию сухого пара. Для этого определяем точку 1, которую находим на пересечении линии соответствующей сухому насыщенному пару ($x = 1$) и заданном давлении (рис. 6.2). Из точки 1 проводим линию на ось энтальпий и определяем искомую величину $h_1 = h''$.

3. Точка 2 (рис. 6.2) соответствует энтальпии влажного насыщенного пара. Она определяется на пересечении линий заданного давления и степени сухости пара. Линия, проведенная из точки 2 на ось h даст нам энтальпию влажного пара $h_2 = h_x$.

4. Для определения энтальпии перегретого пара $h_3 = h$ получим точку 3 (рис. 6.2), которая будет находиться на пересечении линий заданного давления и температуры.

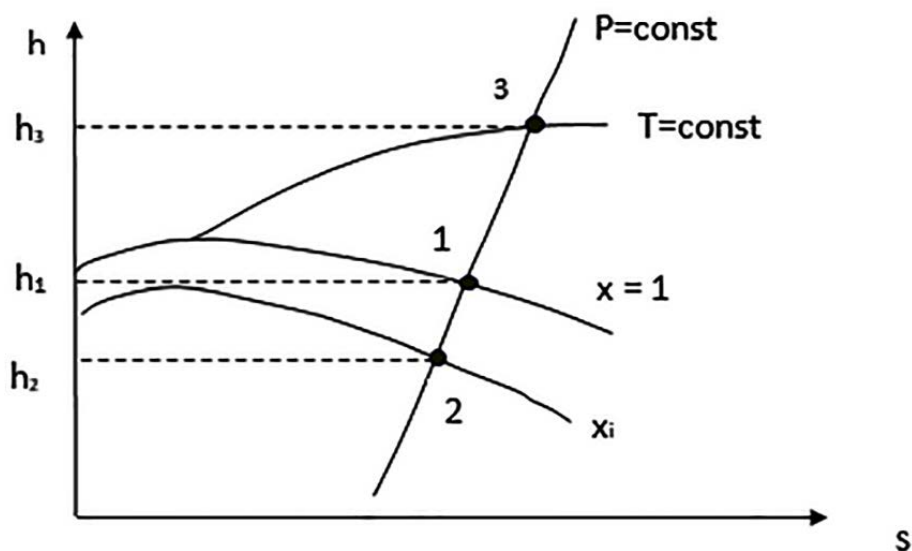


Рисунок 6.2 – Определение энтальпии при помощи hs -диаграммы водяного пара

7 КРУГОВЫЕ ПРОЦЕССЫ

7.1 Циклы поршневых четырехтактных двигателей внутреннего сгорания

Циклы поршневых четырехтактных двигателей внутреннего сгорания (ДВС) подразделяют на три группы:

1) с подводом теплоты при постоянном объеме (карбюраторные ДВС), цикл Отто;

2) с подводом теплоты при постоянном давлении (компрессорные дизели), цикл Дизеля;

3) со смешанным подводом теплоты (бескомпрессорные дизели), цикл Тринклера.

Основными характеристиками или параметрами любого цикла теплового двигателя являются следующие безразмерные величины:

1) степень сжатия (отношение удельных объемов рабочего тела в начале и конце сжатия):

$$\varepsilon = \frac{v_1}{v_2} \quad (7.1)$$

2) степень повышения давления (отношение давления в конце и в начале изохорного процесса подвода теплоты):

$$\lambda = \frac{P_3}{P_2} \quad (7.2)$$

3) степень предварительного или степень изобарного расширения (отношение удельных объемов в конце и в начале изохорного процесса подвода теплоты):

$$\rho = \frac{v_3}{v_2} \quad (7.3)$$

В термодинамике изучаются идеальные термодинамические циклы с постоянной теплоемкостью, в которых рабочим телом является идеальный газ, подвод и отвод теплоты происходит от внешнего источника.

Цикл двигателя внутреннего сгорания с подводом теплоты при $v = const$, цикл Отто.

Диаграмма реального двигателя представлена на рисунке 7.1, а:

а–1 (1 такт) – в цилиндр через всасывающий клапан поступает смесь воздуха и паров горючего (не термодинамический процесс);

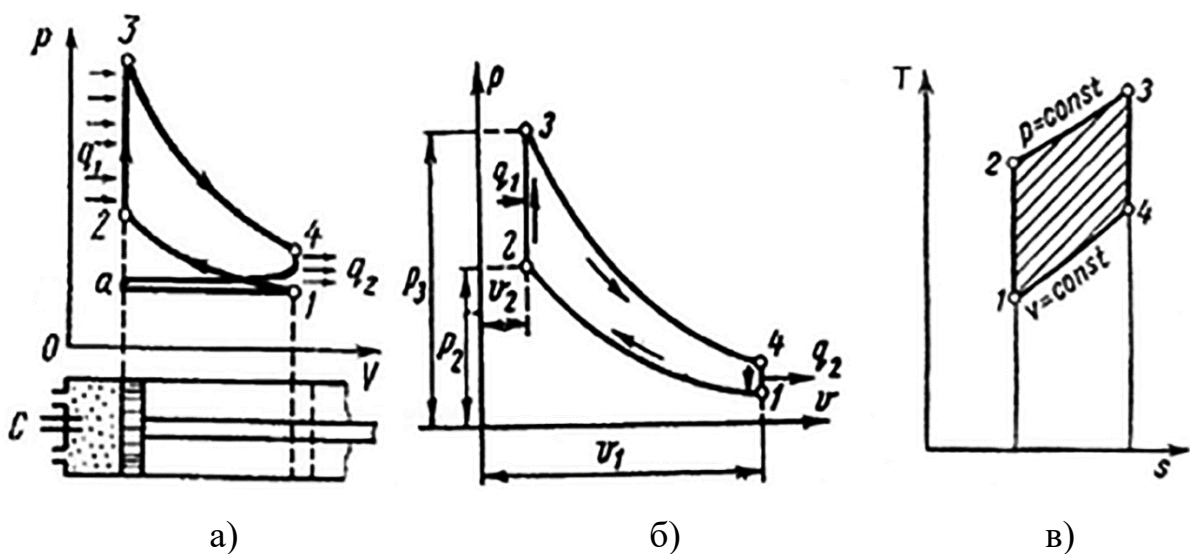
1–2 (2 такт) – адиабатное сжатие (повышается температура);

2–3 – сгорание горючей смеси, давление быстро возрастает при постоянном объеме (подвод теплоты q_1);

3–4 (3 такт) – адиабатное расширение (совершается полезная работа);

4–а (4 такт) – открывается выхлопной клапан и отработанные газы покидают цилиндр, давление цилиндра падает (отводится тепло q_2).

Затем процесс повторяется.



а) индикаторная диаграмма реального двигателя;

б) Pv -диаграмма идеального цикла; в) Ts -диаграмма идеального цикла

Рисунок 7.1 – Цикл ДВС с подводом теплоты при постоянном объеме

Описанный процесс является необратимым (наличие трения, химической реакции в рабочем теле, конечные скорости поршня, теплообмен при конечной разности температур и т. д.).

Для анализа теории тепловых машин термодинамика рассматривает идеальные и обратимые циклы.

Pv -диаграмма и Ts -диаграмма идеального цикла двигателя внутреннего сгорания показаны на рисунке 7.1, б, в. Цикл состоит из двух адиабат и двух изохор.

Из этой диаграммы выводится формула для термического коэффициента полезного действия цикла с подводом теплоты при постоянном объеме, которая имеет следующий вид:

$$\eta_t = 1 - \frac{1}{\varepsilon^{k-1}} \quad (7.4)$$

где ε – степень сжатия (чем выше степень сжатия, тем выше экономичность двигателя);

k – показатель адиабаты.

Идеальный цикл двигателя внутреннего сгорания со смешанным подводом теплоты при постоянном объеме и постоянном давлении (бескомпрессорные дизели), цикл Тринклера.

Диаграммы цикла показаны на рисунке 7.2. Цикл состоит из двух адиабат, двух изохор и одной изобары.

Процессы цикла:

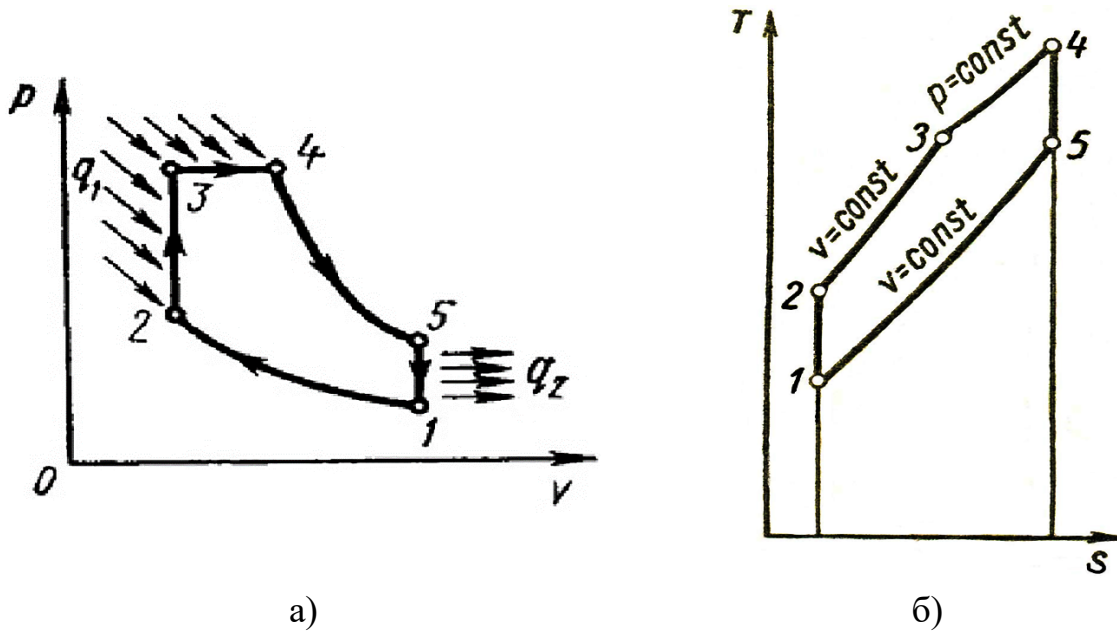
1–2 – воздух с температурой T_1 адиабатно сжимается до температуры T_2 , которая больше температуры воспламенения топлива; затем форсункой под давлением впрыскивается топливо;

2–3 – горючая смесь самовоспламеняется, подводится теплота q_1' , сгорает легкая фракция топлива; при постоянном объеме давление повышается;

3–4 – поршень начинает перемещаться вниз, топливо продолжает постепенно сгорать; подводится тепло q_1'' при постоянном давлении;

4–5 – поршень продолжает перемещаться в нижнюю мертвую точку, давление падает (адиабатное расширение);

5–1 – процесс отвода теплоты q_2 при постоянном объеме (через выпускной клапан покидают отработанные газы), рабочее тело возвращается в исходное состояние.



а) Pv -диаграмма цикла; б) Ts -диаграмма цикла

Рисунок 7.2 – Идеальный цикл ДВС со смешанным подводом теплоты

Термический коэффициент полезного действия цикла определяется по формуле (7.5):

$$\eta_t = 1 - \{(\lambda \rho^k - 1) / \varepsilon^{k-1} [(\lambda - 1) + k\lambda(\rho - 1)]\} \quad (7.5)$$

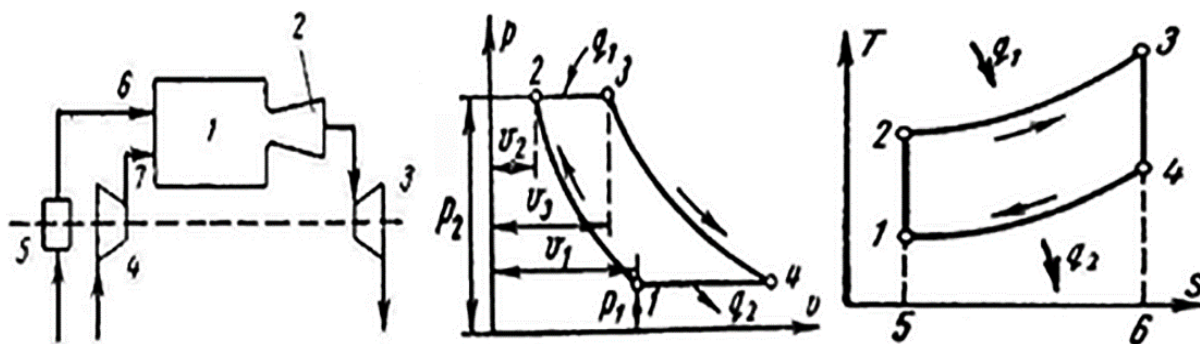
Циклы двигателей с подводом теплоты при постоянном давлении широкого применения не нашли, так как у этих циклов применяется раздельное сжатие воздуха и топлива.

7.2 Циклы газотурбинных установок

Основными недостатками поршневых двигателей внутреннего сгорания являются ограниченность их мощности и невозможность адиабатного расширения рабочего тела до атмосферного давления, которые отсутствуют в газотурбинной установке.

В такой установке рабочим телом являются продукты сгорания жидкого или газообразного топлива.

На рисунке 7.3, а дана **схема простейшей газотурбинной установки со сгоранием топлива при постоянном давлении**. Топливным насосом 5 и компрессором 4 топливо и воздух через форсунки 6 и 7 поступают в камеру сгорания 1. Из камеры продукты сгорания направляются в комбинированные сопла 2, где они расширяются, поступают на лопатки газовой турбины 3 и выбрасываются в атмосферу.



а) б) в)

а) схема простейшей газотурбинной установки;

б) Pv -диаграмма идеального цикла; в) Ts -диаграмма идеального цикла

Рисунок 7.3 – Газотурбинная установка с подводом теплоты при постоянном давлении

На рисунке 7.3, б, в представлены Pv - и Ts -диаграммы идеального цикла газотурбинной установки с подводом теплоты при постоянном давлении.

Процессы цикла:

1–2 – адиабатное сжатие до давления P_2 ;

2–3 – подвод теплоты q_1 при постоянном давлении P_2 (сгорание топлива);
3–4 – адиабатное расширение до первоначального давления P_1 ;
4–1 – охлаждение рабочего тела при постоянном давлении P_1 (отвод теплоты q_2).

Характеристиками цикла газотурбинной установки являются **степень повышения давления** $\lambda = P_2/P_1$ и **степень изобарного расширения** $\rho = v_3/v_2$.

Работа турбины определяется:

$$l_T = h_3 - h_4 \quad (7.6)$$

Работа компрессора равна:

$$l_K = h_2 - h_1 \quad (7.7)$$

Полезная работа газотурбинной установки равна разности работ турбины и компрессора:

$$l_{ГТУ} = l_T - l_K = (h_3 - h_4) - (h_2 - h_1) \quad (7.8)$$

Термический КПД цикла газотурбинной установки определяется выражением (7.9):

$$\eta_t = 1 - \left(\frac{1}{\lambda^{(k-1)/k}} \right) \quad (7.9)$$

Теоретическая мощность газовой турбины, компрессора и газотурбинной установки составляют:

$$\begin{aligned} N_T &= \frac{l_T D}{3600} = \frac{(h_3 - h_4) D}{3600}, \\ N_K &= \frac{l_K D}{3600} = \frac{(h_2 - h_1) D}{3600}, \\ N_{ГТУ} &= l_{ГТУ} D / 3600 = \frac{[(h_3 - h_4) - (h_2 - h_1)] D}{3600} \end{aligned} \quad (7.10)$$

Действительный цикл газотурбинной установки отличается от идеаль-

ного цикла наличием потерь на трение и вихреобразование в турбине и компрессоре.

Эффективными методами повышения экономичности газотурбинных установок являются регенерация теплоты, ступенчатое сжатие и расширение рабочего тела.

7.3 Циклы паротурбинных установок

Паротурбинная установка является основой современных тепловых и атомных электростанций (рис. 7.4). Рабочим телом в таких установках является пар какой-либо жидкости (водяной пар). Основным циклом в паротурбинной установке является цикл Ренкина.

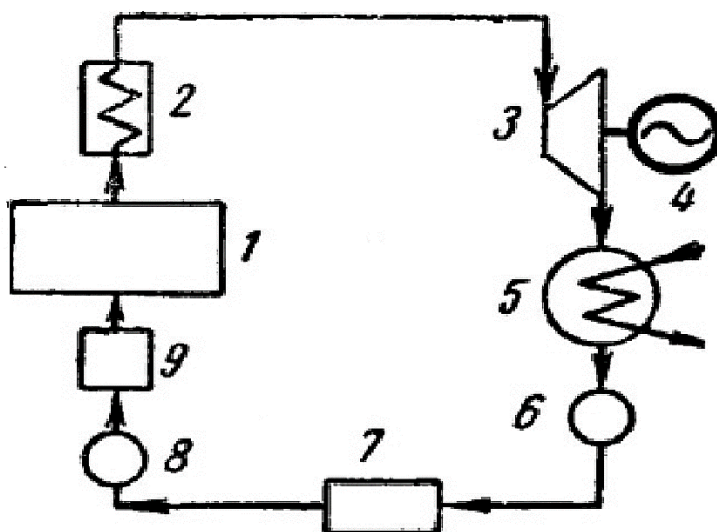
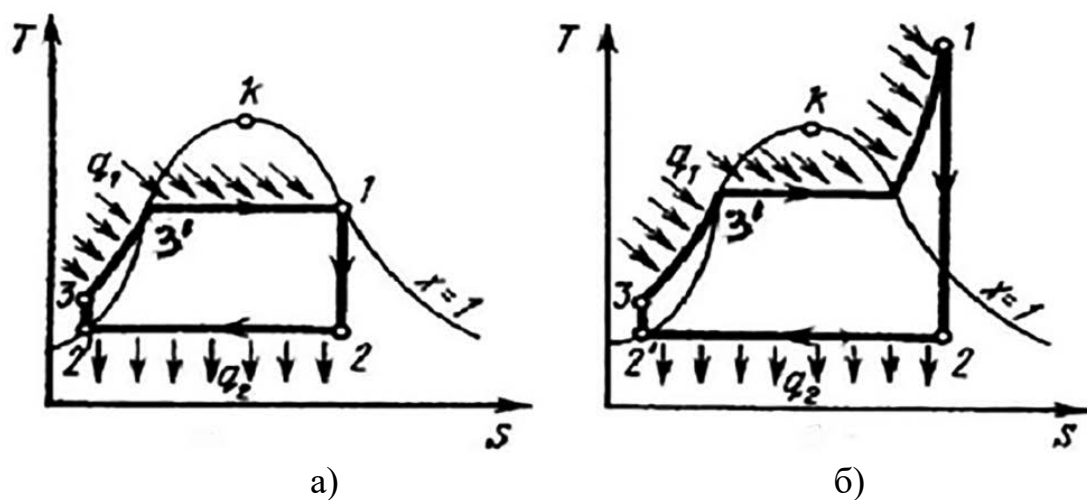


Рисунок 7.4 – Принципиальная схема паротурбинной установки

В паровом котле 1 вода нагревается до температуры кипения и испаряется. Полученный пар перегревается в пароперегревателе 2. Далее пар поступает в турбину 3, где происходит преобразование теплоты в механическую работу, а затем в электрическую энергию в электрогенераторе 4. Отработанный пар поступает в конденсатор 5, где отдает теплоту охлаждающей воде. Полученный конденсат насосом 6 отправляется в питательный бак 7, откуда

питательным насосом 8 сжимается до давления, равного в котле, и подается через подогреватель 9 в паровой котел 1.

Цикл Ренкина на насыщенном паре. Схема установки отличается от предыдущей схемы тем, что в данном случае будет отсутствовать перегреватель, а в турбину будет поступать насыщенный пар. На рисунке 7.5, а изображен цикл Ренкина в TS -диаграмме.



а) на насыщенном паре; б) на перегретом паре
Рисунок 7.5 – Цикл Ренкина в TS -диаграмме

Процессы цикла:

3–1 – подвод теплоты от источника в воде q_1 , состоит из двух процессов;

3–3' – кипение воды в котле;

3'–1 – испарение воды в пар при постоянном давлении;

1–2 – в турбине пар расширяется адиабатно;

2–2' – пар конденсируется и отдает тепло q_2 охлаждающей воде;

2'–3 – конденсат адиабатически сжимается.

Термический КПД цикла Ренкина определяется по уравнению (7.11):

$$\eta_t = \frac{(q_1 - q_2)}{q_1} \quad (7.11)$$

Так как $q_1 = h_1 - h_3$ и $q_2 = h_2 - h_2'$, получим выражение (7.12):

$$\eta_t = \frac{[(h_1 - h_2) - (h_3 - h_{2'})]}{(h_1 - h_3)} \quad (7.12)$$

Теоретическую мощность турбины рассчитывают по формуле (7.13):

$$N_T = \frac{(h_1 - h_2)D}{3600} \quad (7.13)$$

где $D = 3600m$ – часовой расход, кг/ч;

m – секундный расход, кг/с.

Цикл Ренкина на перегретом паре применяется для увеличения термического коэффициента полезного действия цикла паротурбинной установки. Для этого перед турбиной ставят перегреватель 2 (рис. 7.4), который увеличивает температуру и давление пара. При этом возрастает средняя температура подвода теплоты в цикле. Диаграмма цикла показана на рисунке 7.5, б.

7.2 Практические задачи

Задача 1 оценивается в три балла; остальные задачи – по 0,5 балла.

1. Определите параметры рабочего тела в характерных точках идеального цикла поршневого двигателя с изохорно-изобарным подводом теплоты (смешанный цикл), если известны давление $P_1 = 0,07$ МПа и температура $t_1 = 30$ °С рабочего тела в начале сжатия.

Степень сжатия $\varepsilon = 11$, степень предварительного расширения $\rho = 1,05$, степень повышения давления $\lambda = 1,05$ заданы.

Определите работу, получаемую от цикла; подведенную и отведенную теплоту; термический КПД и изменение энтропии отдельных процессов. За рабочее тело принять воздух, считая его теплоемкость в расчетных интервалах температур постоянной.

Ответ: $l_{ц} = 54\,304$ Дж/кг; $q'_1 = 34$ кДж/кг; $q_1 = 42$ кДж/кг; $q_2 = 31$ кДж/кг;

$\eta = 0,59$; $S_{1-2} = 0$ кДж/(кг·К); $S_{2-3} = 0,04$ кДж/(кг·К);

$$S_{3-4} = 0,06 \text{ кДж/(кг}\cdot\text{К)}; S_{4-5} = 0 \text{ кДж/(кг}\cdot\text{К)}; S_{5-1} = 0,1 \text{ кДж/(кг}\cdot\text{К)}.$$

2. Определите степень сжатия цикла с подводом теплоты при постоянном объеме поршневого двигателя внутреннего сгорания, если удельный объем в начале такта сжатия был $0,9 \text{ м}^3/\text{кг}$, а в конце сжатия составил $0,1 \text{ м}^3/\text{кг}$.

Ответ: $\varepsilon = 9$.

3. Определите работу цикла с подводом теплоты при постоянном давлении, если количество подведенной теплоты равно 1050 кДж , а количество отведенной теплоты составляет 830 кДж .

Ответ: $l_{\text{ц}} = 220 \text{ кДж/кг}$.

4. Температура воспламенения топлива, подаваемого в цилиндр двигателя с изобарным подводом тепла, равна $600 \text{ }^\circ\text{C}$. Определите минимально необходимое значение степени сжатия, если начальная температура воздуха составляет $5 \text{ }^\circ\text{C}$. Сжатие считать адиабатным, коэффициент адиабаты равен $1,4$.

Ответ: $\varepsilon = 17,47$.

5. В цикле поршневого двигателя внутреннего сгорания с подводом теплоты при постоянном объеме степень сжатия равна $17,47$. Определите термический КПД этого цикла.

Ответ: $\eta = 0,68$.

7.3 Методические рекомендации по решению задач

Задача 1. 1. Определяем параметры первой точки:

1) удельный объем:

$$v_1 = \frac{RT_1}{P_1}$$

2) значение энтропии:

$$S_1 = C_v \ln \frac{T_1}{T_H} + R \ln \frac{v_1}{v_H}$$

где v_n – удельный объем при нормальных условиях ($22,4/\mu$); T_n – температура при нормальных условиях (273 K); C_v – массовая теплоемкость при постоянном объеме (0,72 кДж/кг·К).

2. Определяем параметры второй точки (удельный объем, температуру, давление):

$$v_2 = \frac{v_1}{\varepsilon}; T_2 = T_1 \varepsilon^{k-1}; P_2 = P_1 \varepsilon^k$$

3. Определяем параметры третьей точки:

$$v_3 = v_2; T_3 = \lambda T_2; P_3 = \lambda P_2;$$

$$S_3 = c_v \ln \frac{T_3}{T_n} + R \ln \frac{v_3}{v_n}$$

4. Определяем параметры четвертой точки:

$$v_4 = \rho v_3; T_4 = \rho T_3; P_4 = P_3;$$

$$S_4 = C_p \ln \frac{T_4}{T_n} - R \ln \frac{P_4}{P_n}$$

где C_p – массовая теплоемкость при постоянном давлении (1,01 кДж/кг·К); P_n – давление газа при нормальных условиях (101 325 Па).

5. Определяем параметры пятой точки:

$$v_5 = v_1; T_5 = \left(\frac{v_4}{v_5}\right)^{k-1} \cdot T_4;$$

$$P_5 = \frac{P_4}{\left(\frac{v_5}{v_4}\right)^k}; S_5 = S_4$$

6. Определяем работу, полученную от цикла для одного килограмма газа:

$$l_{\text{ц}} = l_{3-4} + l_{4-5} - l_{1-2},$$

$$\text{где } l_{3-4} = P_3(v_4 - v_3); l_{4-5} = \frac{R}{k-1}(T_4 - T_5);$$

$$l_{1-2} = \frac{R}{k-1}(T_2 - T_1)$$

7. Находим изменение энтропии отдельных процессов цикла:

$$S_{1-2} = 0; S_{2-3} = S_3 - S_2; S_{3-4} = S_4 - S_3;$$

$$S_{4-5} = 0; S_{5-1} = S_1 - S_5$$

8. На основании полученных данных находим термический КПД цикла:

$$\eta_t = 1 - \frac{q_2}{q'_1 + q''_1}$$

$$\text{где } q_2 = c_v(T_5 - T_1); q'_1 = c_v(T_3 - T_2);$$

$$q''_1 = c_p(T_4 - T_3)$$

Полученный термический КПД цикла сравниваем с полученным КПД двигателя со смещенным циклом:

$$\eta_t = 1 - \frac{\lambda \rho^k - 1}{(\lambda - 1) + k\lambda(\rho - 1)} \cdot \frac{1}{\varepsilon^{k-1}}$$

Задача 2. Определяем степень сжатия цикла с подводом теплоты при постоянном объеме:

$$\varepsilon = \frac{v_1}{v_2}$$

Задача 3. Определяем работу цикла с подводом теплоты при постоянном давлении:

$$l = q_1 - q_2.$$

Задача 4. Определяем минимально необходимое значение степени сжатия с изобарным подводом тепла при адиабатном сжатии по уравнениям:

$$\varepsilon = \frac{v_1}{v_2} \text{ и } \frac{T_2}{T_1} = \left(\frac{v_1}{v_2}\right)^{k-1}$$

Задача 5. Определяем термический КПД с подводом теплоты при постоянном объеме:

$$\eta_t = 1 - \frac{1}{\varepsilon^{k-1}}$$

8 ИСТЕЧЕНИЕ ГАЗОВ И ПАРОВ

8.1 Первый закон термодинамики для потока

На практике при рассмотрении рабочих процессов машин, аппаратов и устройств встречаются задачи на изучение закономерностей движения рабочих тел (газов, пара и жидкостей). При их решении принимаются следующие допущения:

- 1) движение потока газа по каналу установившееся и неразрывное;
- 2) скорости по сечению, перпендикулярному оси канала, постоянны;
- 3) пренебрегается трение частичек газа между собой и о стенки канала;
- 4) изменение параметров по сечению канала мало по сравнению с их абсолютными значениями.

солютными значениями.

Уравнение первого закона термодинамики имеет вид:

$$q = \Delta u + \Delta e + l_{\text{ПРОТ.}} + l_{\text{ТЕХН.}} \quad (8.1)$$

где $\Delta e = (w_2^2 - w_1^2)/2 + g(z_2 - z_1)$ – изменение энергии системы, состоящей из изменения кинетической и потенциальной энергии;

w_1, w_2 – скорости потока в начале и в конце канала;

z_1, z_2 – высота положения начала и конца канала;

$l_{\text{ПРОТ.}} = P_2 v_2 - P_1 v_1$ – работа проталкивания, затрачиваемая против внешних сил на преодоление внешнего давления;

$l_{\text{ТЕХН.}}$ – техническая (полезная) работа (турбины, компрессора и т. д.).

Уравнение первого закона термодинамики в развернутом виде:

$$q = (u_2 - u_1) + (w_2^2 - w_1^2)/2 + g(z_2 - z_1) + (P_2 v_2 - P_1 v_1) + l_{\text{ТЕХН.}} \quad (8.2)$$

Энтальпия равна $h = u + Pv$, тогда уравнение первого закона термодинамики для потока газа будет иметь вид:

$$q = (h_2 - h_1) + (w_2^2 - w_1^2)/2 + g(z_2 - z_1) + l_{\text{ТЕХН.}} \quad (8.3)$$

8.2 Критическое давление и скорость. Сопло Лаваля

Если при перемещении газа по каналу происходит его расширение с уменьшением давления и увеличением скорости, то такой канал называется **соплом**. Если в канале происходит сжатие рабочего тела с увеличением его давления и уменьшением скорости, то такой канал называют **диффузором**.

В каналах при небольшой разности давлений газа и внешней среды скорость течения рабочего тела достаточно большая. В большинстве случаев длина канала небольшая, и процесс теплообмена между стенкой и газом незначителен, поэтому процесс истечения газа можно считать адиабатным.

Скорость истечения (на выходе канала) определяется из уравнения (8.4):

$$w_2 = \sqrt{2(h_1 - h_2) + w_1^2}$$
$$\text{или } w_2 = \sqrt{2 \frac{k}{k-1} P_1 v_1 [1 - (P_2/P_1)^{(k-1)/k}]}$$
(8.4)

Для практических расчетов принимают $w_1 = 0$, тогда $w_2 = \sqrt{2(h_1 - h_2)}$ (в дальнейшем индекс у скорости тела на выходе из сопла опускаем).

Массовый секундный расход газа составляет:

$$m = \frac{w f}{v_2}$$
(8.5)

где f – площадь сечения канала на выходе.

Так как процесс истечения адиабатный ($P_1 v_1^k = P_2 v_2^k$), имеем:

$$m = f \sqrt{\frac{2k}{k-1} \frac{P_1}{v_1} [(P_2/P_1)^{2/k} - (P_2/P_1)^{(k+1)/k}]}$$
(8.6)

Массовый секундный расход идеального газа зависит от площади выходного канала, начального состояния газа и степени его расширения.

Критическим давлением называется такое давление на выходном сечении канала, при котором достигается максимальный расход газа; оно определяется следующим выражением: $P_{кр} = P_2 = \beta_{кр} P_1$.

При этом для одноатомных газов $k = 1,66$, $\beta_{кр} = 0,49$; для двухатомных газов $k = 1,4$, $\beta_{кр} = 0,528$; для трехатомных газов $k = 1,3$, $\beta_{кр} = 0,546$.

Критической скоростью называется скорость газа в выходном сечении канала, при давлении равном или меньшем критического ($P_{кр}$):

$$w_{кр} = \sqrt{\frac{2k}{k+1} P_1 v_1} = \sqrt{\frac{2k}{k+1} RT_1} \quad (8.7)$$

Критическая скорость зависит при истечении идеального газа только от начальных параметров, его природы, и равна скорости звука газа (a) при критических параметрах:

$$w_{кр} = a = \sqrt{k P_{кр} v_{кр}} \quad (8.8)$$

8.3 Истечения идеального газа из суживающегося сопла и сопла Лавалья

При истечении из суживающегося сопла, если давление внешней среды больше критического давления $P_{кр}$, то есть $\beta_{кр} < P_2/P_1 < 1$, тогда скорость газа при истечении меньше скорости звука. Давление газа в выходном сечении равно давлению внешней среды.

Если давление внешней среды меньше критического $P_{кр}$, то есть $0 < P_2/P_1 < \beta_{кр}$, то газ расширяется не полностью, скорость газа в выходном сечении равна критической скорости или скорости звука.

Комбинированное сопло Лавала предназначено для использования больших перепадов давления и для получения скоростей истечения, превышающих критическую или скорость звука.

Сопло Лавала состоит из короткого суживающегося участка и расширяющейся конической насадки (рис. 8.1). Опыты показывают, что угол конусности расширяющейся части должен быть равен от 8 до 12 град. При больших углах наблюдается отрыв струи от стенок канала.

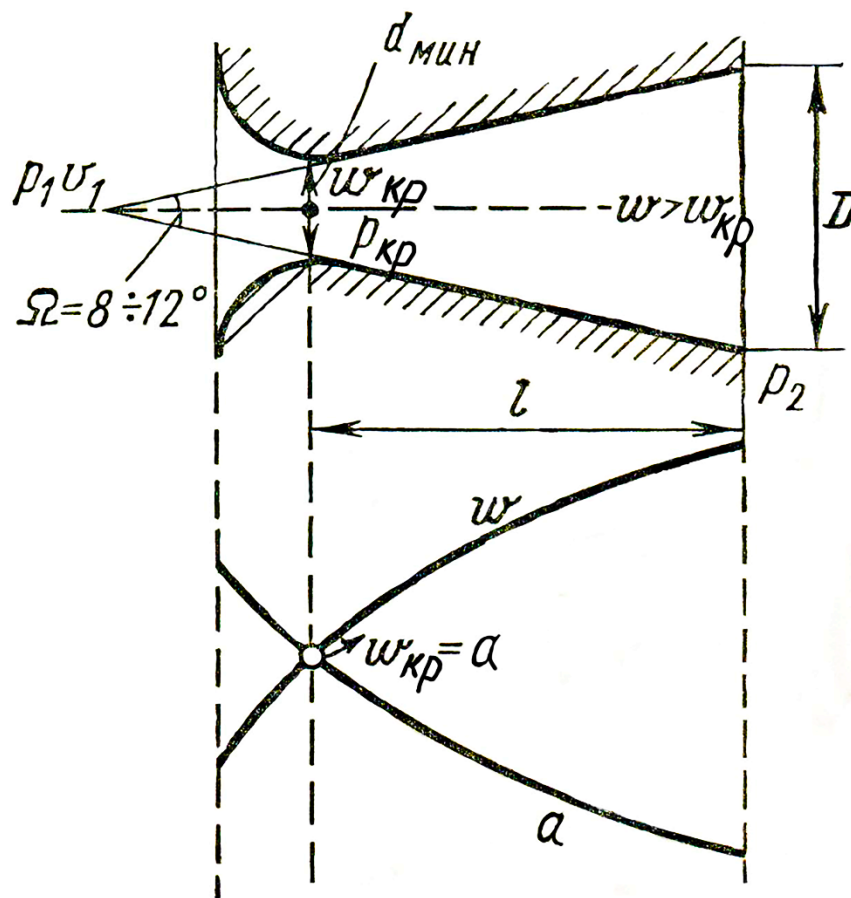


Рисунок 8.1 – Сопло Лавала

При истечении газа из комбинированного сопла в окружающую среду с давлением меньше критического, в самом узком сечении сопла устанавливаются критическое давление и критическая скорость. В расширяющейся насадке сопла происходит дальнейшее увеличение скорости газа и падение давления до давления внешней среды.

Длину расширяющейся части сопла можно определить по уравнению (8.9):

$$l = (D - d) / 2 \operatorname{tg}(\Omega / 2) \quad (8.9)$$

где Ω – угол конусности сопла;

D – диаметр выходного отверстия;

d – диаметр сопла в минимальном сечении.

8.4 Дросселирование газов

Дросселированием (мятием) называется необратимый процесс, при котором пар или газ переходят с высокого давления на низкое без совершения внешней работы и без подвода или отвода теплоты. Такое явление происходит в трубопроводе, где имеется место сужения проходного канала (рис. 8.2).

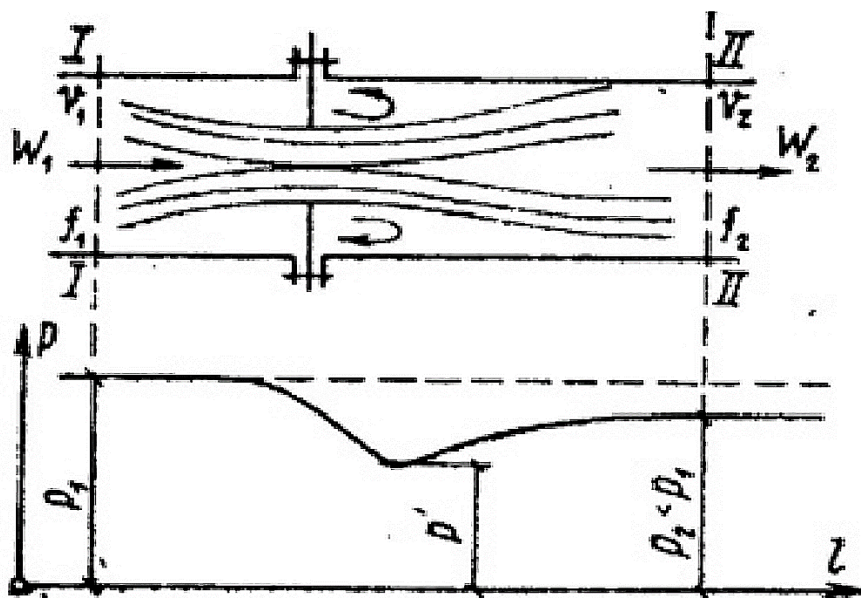


Рисунок 8.2 – Дросселирование газа

При таком сужении, вследствие сопротивлений, давление за местом сужения (P_2) всегда меньше давления перед ним (P_1).

Любой кран, вентиль, задвижка, клапан и прочие местные сопротивления, уменьшающие проходное сечение трубопровода, вызывают дросселирование газа или пара, следовательно, падение давления. В большинстве случаев это

явление приносит безусловный вред, но иногда его создают искусственно при регулировании паровых двигателей, в холодильных установках, в приборах для измерения расхода газа и т. д.

При прохождении газа через отверстие его кинетическая энергия и скорость в узком сечении возрастают, что сопровождается падением температуры и давления. За отверстием газ опять течет по полному сечению, и скорость его вновь понижается, а давление увеличивается, но до начального значения оно не поднимается; некоторое изменение скорости произойдет в связи с увеличением удельного объема газа от уменьшения давления.

Газ, протекая через отверстие, приходит в вихревое движение. Часть его кинетической энергии затрачивается на образование этих вихрей и превращается в теплоту. Кроме того, в теплоту превращается и работа, затраченная на преодоление сопротивлений (трение). Вся эта теплота воспринимается газом, в результате чего температура его изменяется (уменьшается или увеличивается).

При дросселировании происходит увеличение энтропии и уменьшение работоспособности рабочего тела.

Уравнение процесса дросселирования имеет следующий вид:

$$h_1 = h_2 \quad (8.10)$$

Это равенство показывает, что энтальпия в результате дросселирования не изменяется. Оно справедливо только для сечений, достаточно удаленных от сужения.

Для идеальных газов энтальпия газа является однозначной функцией температуры. Отсюда следует, что при дросселировании идеального газа его температура не изменяется ($T_1 = T_2$).

При дросселировании реальных газов энтальпия газа остается постоян-

ной; энтропия и объем увеличиваются; давление падает, а температура изменяется (увеличивается, уменьшается или остается неизменной).

Изменение температуры жидкостей и реальных газов при дросселировании называется эффектом Джоуля-Томсона. Для идеального газа эффект Джоуля-Томсона равен нулю. Различают **дифференциальный температурный эффект**, когда давление и температура изменяются на бесконечно малую величину, и **интегральный температурный эффект**, при котором давление и температура изменяются на конечную величину.

Дифференциальный температурный эффект определяется формулой (8.11):

$$\alpha_n = (\partial T / \partial P)_n \quad (8.11)$$

Если $\alpha > 0$, то рабочее тело охлаждается $dT < 0$; это явление называется **положительным эффектом Джоуля-Томсона**. При $\alpha < 0$, $dT > 0$, рабочее тело нагревается – это **отрицательный эффект Джоуля-Томсона**. При $\alpha = 0$ и $dT = 0$ происходит **изотермическое дросселирование**.

Дросселирование при конечных перепадах давлений называют **интегральным эффектом дросселирования Джоуля-Томсона**, который определяется уравнением (8.12):

$$T_2 - T_1 = \int_{P_1}^{P_2} \{ [T(\partial v / \partial T)_p - v] / c_p \} dP \quad (8.12)$$

Состояние реального газа при адиабатном дросселировании, при котором температурный эффект меняет свой знак, называется **точкой инверсии**, а температура, соответствующая этой точке, называется **температурой инверсии**:

$$T_{\text{инв.}} = v(\partial T / \partial v)_p \quad (8.12)$$

Это выражение называется **уравнением кривой инверсии**.

8.2 Практические задачи

Каждая задача оценивается в один балл.

1. Воздух из резервуара с постоянным давлением $P_1 = 10$ МПа и температурой $t_1 = 15$ °С вытекает в атмосферу через трубку с внутренним диаметром 10 мм. Найдите скорость истечения воздуха и его секундный расход. Наружное давление принять равным 0,1 МПа. Процесс расширения воздуха считать адиабатным.

Ответ: $\omega_{кр} = 310$ м/с; $M_{max} = 1,87$ кг/с.

2. В резервуаре, заполненном кислородом, поддерживается давление $P_1 = 5$ МПа. Газ вытекает через суживающее сопло в среду с давлением $P_2 = 4$ МПа. Начальная температура газа $t_1 = 100$ °С. Определите теоретическую скорость истечения и расход, если площадь выходного сечения сопла $f = 20$ мм².

Ответ: $\omega = 205$ м/с; $M = 0,180$ кг/с.

3. Воздух при давлении $P_1 = 1$ МПа и температуре $t_1 = 300$ °С вытекает из расширяющегося сопла в среду с давлением $P_2 = 0,1$ МПа. Расход газа составляет $M = 4$ кг/с. Определите размеры сопла. Угол конусности расширяющейся части сопла принять равным 10 град. Расширение газа в сопле считать адиабатным.

Ответ: $d_{min} = 55$ мм; $d = 76$ мм; $l = 120$ мм.

4. Как велика теоретическая скорость истечения пара через сопло Лаваля, если давление пара $P_1 = 1,4$ МПа, температура $t_1 = 300$ °С, а противодавление равно $P_2 = 0,006$ МПа? Процесс расширения пара в сопле считать адиабатным.

Ответ: $\omega = 1\,339$ м/с.

5. Давление воздуха при движении его по трубопроводу понижается вследствие местных сопротивлений от $P_1 = 0,8$ МПа до $P_2 = 0,6$ МПа. Началь-

ная температура воздуха $t_1 = 20\text{ }^\circ\text{C}$. Определите изменение температуры и энтропии в рассматриваемом процессе. Какова температура воздуха после дросселирования?

Ответ: $t_2 = 20\text{ }^\circ\text{C}$; $\Delta S = 82,6\text{ кДж}/(\text{кг}\cdot\text{К})$.

8.3 Методические рекомендации по решению задач

Задача 1. 1. Определяем отношение $\frac{P_2}{P_1}$.

2. Так как оно меньше критического (0,528), то скорость истечения будет равна критической и определится по уравнению:

$$\omega_{\text{кр}} = 1,08\sqrt{RT_1}$$

3. Выходное сечение сопла составит:

$$f = \frac{\pi \cdot d^2}{4}$$

где d – диаметр трубки, м.

4. Удельный объем газа на входе в сопло равен:

$$v_1 = \frac{RT_1}{P_1}$$

5. Секундный расход составит:

$$M_{\text{max}} = 0,686f \sqrt{\frac{P_1}{v_1}}$$

Задача 2. 1. Удельный объем газа на входе в сопло равен:

$$v_1 = \frac{RT_1}{P_1}$$

2. Определяем отношение $\frac{P_2}{P_1}$.

3. Так как оно больше критического (0,528), то скорость истечения меньше критической и определится по уравнению:

$$\omega = \sqrt{2 \frac{k}{k-1} \cdot P_1 v_1 \cdot \left[1 - \left(\frac{P_2}{P_1} \right)^{\frac{k-1}{k}} \right]}$$

где k – показатель адиабаты (приложение Г).

4. Секундный расход составит:

$$M = f \sqrt{2 \cdot \frac{k}{k-1} \cdot \frac{P_1}{v_1} \left[\left(\frac{P_2}{P_1} \right)^{\frac{2}{k}} - \left(\frac{P_2}{P_1} \right)^{\frac{k+1}{k}} \right]}$$

Задача 3. 1. Удельный объем газа на входе в сопло равен:

$$v_1 = \frac{RT_1}{P_1}$$

2. Критическое давление, устанавливающееся в минимальном сечении сопла, составит:

$$P_{кр} = 0,528 \cdot P_1$$

3. Удельный объем воздуха в минимальном сечении находим из соотношения параметров адиабатного процесса:

$$v_{кр} = v_1 \left(\frac{P_1}{P_{кр}} \right)^{\frac{1}{k}}$$

4. Теоретическая скорость воздуха в минимальном сечении составит:

$$\omega_{кр} = 1,08 \sqrt{RT_1}$$

5. Площадь минимального сечения сопла должна быть получена в квадратных миллиметрах по следующему уравнению:

$$f_{min} = \frac{4 \cdot v_{кр}}{\omega_{кр}} 10^6$$

6. Диаметр наиболее узкой части в миллиметрах равен:

$$d_{min} = \sqrt{\frac{4 \cdot f_{min}}{\pi}}$$

7. Удельный объем воздуха в выходном сечении составит:

$$v_2 = v_1 \left(\frac{P_1}{P_2} \right)^{\frac{1}{k}}$$

8. Скорость истечения воздуха из сопла находим по формуле:

$$\omega = \sqrt{2 \frac{k}{k-1} \cdot P_1 v_1 \cdot \left[1 - \left(\frac{P_2}{P_1} \right)^{\frac{k-1}{k}} \right]}$$

9. Площадь выходного сечения сопла в миллиметрах находим по уравнению:

$$f = \frac{M \cdot v_2}{\omega} 10^6$$

10. Диаметр выходного сечения сопла в миллиметрах составит:

$$d = \sqrt{\frac{f}{0,758}}$$

11. Длина расширяющейся части будет равна:

$$l = \frac{d - d_{min}}{2 \operatorname{tg} \frac{\alpha}{2}}$$

Задача 4. 1. Переведем давление из мегапаскалей в бар (1 Мпа = 10 бар).

2. Энтальпию пара при начальных параметрах пара (h_1) определяем по hs -диаграмме. Для этого находим точку 1 (рис. 8.3) на пересечении P_1 и t_1 . Энтальпию пара при адиабатном расширении пара от начального состояния до давления расширения в сопле (h_2) определяем, опустив перпендикуляр вниз до пересечения с P_2 и получаем точку 2.

3. Скорость истечения пара составит:

$$\omega = 44,76 \sqrt{h_1 - h_2}$$

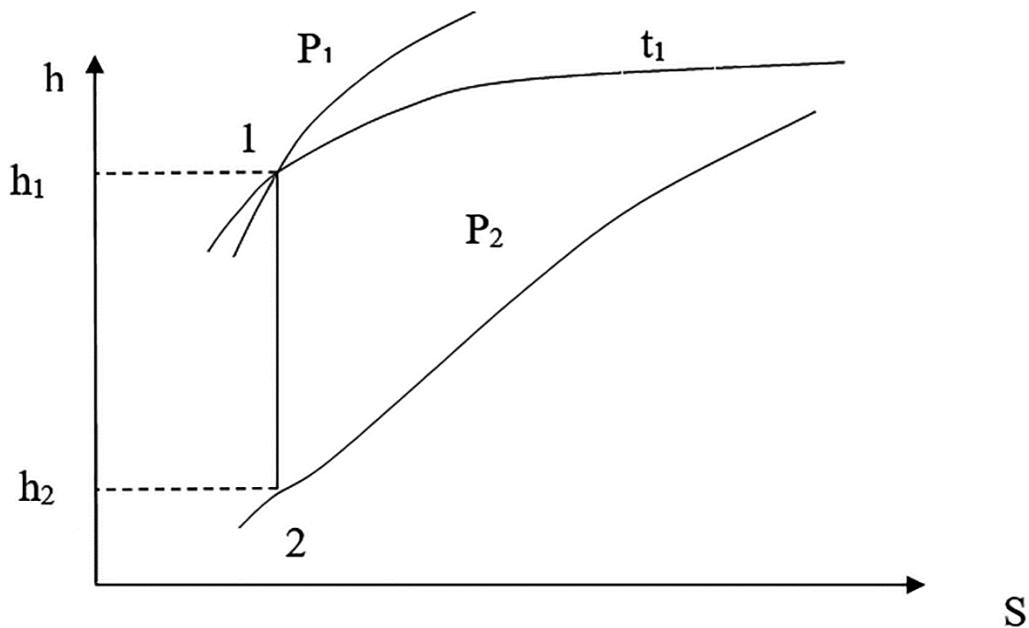


Рисунок 8.3 – Определение энтальпии пара по hs -диаграмме

Задача 5. 1. Так как с достаточной точностью можно принять, что при дросселировании энтальпия газа в начальном и конечном состояниях одинакова, то есть $h_1 = h_2$, то конечную температуру газа можно принять равной начальной $t_1 = t_2$.

2. Приращение энтропии можно найти по уравнению:

$$\Delta S = -R \ln \frac{P_2}{P_1}$$

9 ЦИКЛЫ ХОЛОДИЛЬНЫХ УСТАНОВОК

9.1 Циклы холодильных установок

Холодильные установки предназначены для охлаждения, замораживания и хранения пищевых продуктов при температурах ниже температуры окружающей среды (от 4 до минус 40 °С). *Рабочее тело в холодильных машинах совершает обратный круговой процесс, в котором в противоположность прямому циклу затрачивается работа извне и отнимается теплота от охлаждаемого тела.*

*Идеальным циклом холодильных машин является **обратный цикл Карно.***

В качестве холодильных агентов применяют воздух и жидкости с низкими температурами кипения: аммиак, углекислоту, сернистый ангидрид и фреоны.

Для характеристики эффективности обратного цикла введено понятие **холодильного коэффициента:**

$$\varepsilon = \frac{q_2}{l} \quad (9.1)$$

где q_2 – количество тепла, отводимого от холодильного источника;
 l – количество затраченной работы.

Для искусственного охлаждения применяют следующие холодильные машины: паро- и газокompрессорные, абсорбционные, пароводяные, эжекторные и термоэлектрические.

Паровые холодильники наиболее надежны и распространены. Схема паровой компрессорной холодильной установки дана на рисунке 9.1.

Насыщенный пар рабочего тела, при температуре близкой к температуре охлаждаемого помещения 1, всасывается компрессором 2 и адиабатно сжимается.

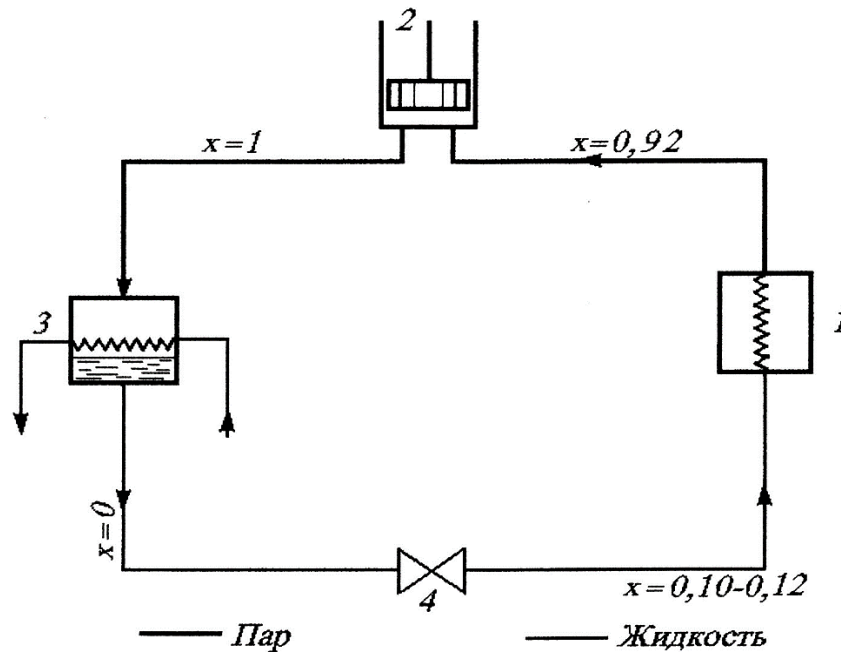


Рисунок 9.1 – Схема паровой компрессорной холодильной установки

Из компрессора пар рабочего тела поступает в конденсатор 3, где при постоянном давлении он конденсируется вследствие отнятия у него теплоты охлаждающей водой. Полученное жидкое рабочее тело поступает в редукционный вентиль 4, в котором происходит его дросселирование, сопровождаемое падением давления и температуры. При этом рабочее тело частично испаряется. Полученный весьма влажный насыщенный пар (степень сухости обычно находится в пределах 0,01–0,15) с низкой температурой и является хладоносителем. Его направляют в трубы охлаждаемого помещения, где за счет теплоты, отбираемой от охлаждаемых тел, степень сухости его увеличивается, и он снова направляется в компрессор.

Количество теплоты, отводимой от охлаждаемого тела за единицу времени (секунду, час), называется **холодильной мощностью холодильной установки**.

Холодильная мощность, отнесенная к одному килограмму холодильного агента (рабочего тела), называется **удельной холодильной мощностью холодильного агента**.

9.2 Практические задачи

Задачи 1 и 2 оцениваются каждая в два балла; задача 3 – в один балл.

1. В компрессор воздушной холодильной установки поступает воздух из холодильной камеры давлением $P_1 = 0,1$ МПа и температурой $t_1 =$ минус 10 °С. Адиабатно сжатый в компрессоре воздух до давления $P_2 = 0,5$ МПа направляется в охладитель, где он при $P = const$ снижает свою температуру до $t_3 =$ минус 10 °С. Отсюда воздух поступает в расширительный цилиндр, где расширяется по адиабате до первоначального давления, после чего возвращается в холодильную камеру. Отнимая теплоту от охлаждаемых тел, воздух нагревается до $t_1 =$ минус 10 °С и вновь поступает в компрессор. Холодопроизводительность установки $Q_0 = 110$ кВт.

Определите температуру воздуха, поступающего в холодильную камеру; теоретическую работу, затрачиваемую в цикле; удельную холодопроизводительность воздуха и холодильный коэффициент для данной установки и для установки, работающей по циклу Карно для того же интервала температур. Определите теоретическую мощность двигателя, компрессора и расширительного цилиндра, а также расход холодильного агента и количество теплоты, передаваемой охлаждающей воде.

Ответ: $T_4 = 179$ К; $l_0 = 50,6$ кДж/кг; $q_0 = 85$ кДж/кг; $\varepsilon = 1,68$; $\varepsilon_k = 13,15$;
 $N_{\text{теор}} = 65$ кВт; $N_k = 202$ кВт; $N_{\text{р.ц.}} = 136$ кВт; $M = 1,294$ кг/ч; $q = 135,6$ кДж/кг.

2. Холодопроизводительность воздушной холодильной установки составляет $Q = 83,7$ МДж/ч. Определите ее холодильный коэффициент и потребную теоретическую мощность двигателя, если известно, что максимальное давление воздуха в установке $P_2 = 0,5$ МПа, минимальное давление $P_1 = 0,11$ МПа, температура воздуха в начале сжатия равна $t_1 = 0$ °С, а при выходе из охладителя $t_2 = 20$ °С. Сжатие и расширение воздуха принять политропным с показателем политропы $m = 1,28$.

Ответ: $\varepsilon = 2,55$; $N_{\text{теор}} = 9,1$ кВт.

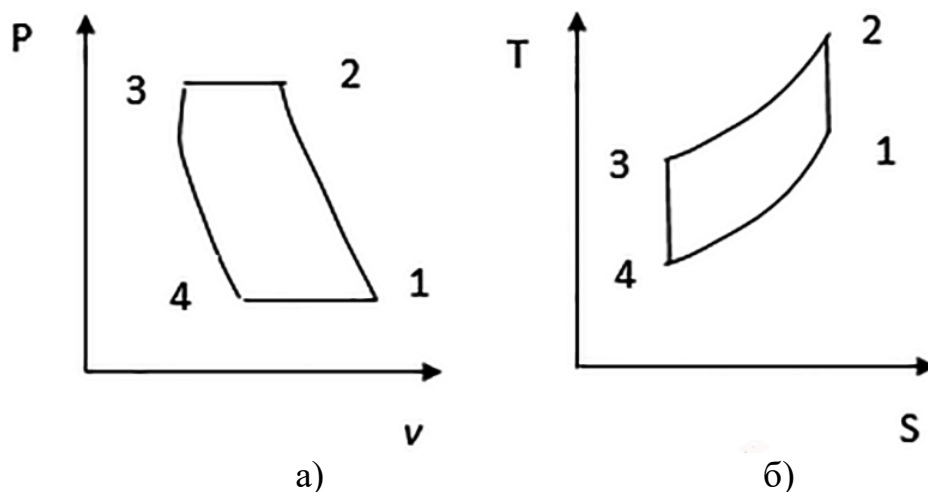
3. Теоретическая мощность двигателя холодильной установки составляет $N_{\text{теор}} = 39,6$ кВт, при расходе холодильного агента $2,841$ кг/с. Максимальное давление воздуха в установке $P_2 = 2,35$ МПа, минимальное давление $P_1 = 0,28$ МПа. Сжатие воздуха происходит по адиабате. Определите холодопроизводительность установки.

Ответ: $Q_0 = 47,0$ кВт.

9.3 Методические рекомендации по решению задач

Задача 1. 1. Температуру T_4 воздуха, поступающего в холодильную камеру, определяем из соотношения параметров адиабатного процесса 3–4 (рис. 9.2):

$$T_4 = T_3 \left(\frac{P_1}{P_2} \right)^{\frac{k-1}{k}}$$



линия 1–2 – процесс адиабатного сжатия в компрессоре; линия 2–3 – процесс изобарного охлаждения в охладителе; линия 3–4 – адиабатный процесс расширения в расширительном цилиндре; линия 4–1 – процесс изобарного нагревания воздуха в охлажденном помещении

а) Pv -диаграмма; б) TS -диаграмма

Рисунок 9.2 – Цикл воздушной холодильной установки в диаграммах

2. Температуру T_2 сжатого воздуха, выходящего из компрессора, определяем из соотношения параметров процесса 1–2:

$$T_2 = T_1 \left(\frac{P_2}{P_1} \right)^{\frac{k-1}{k}}$$

3. Работу, затраченную в компрессоре, определяем по уравнению:

$$l_k = C_{mp}(T_2 - T_1) = \frac{\mu C_p}{\mu} (T_2 - T_1)$$

где μC_p – киломолярная теплоемкость воздуха (двухатомный) (приложение В);
 μ – молекулярная масса воздуха (приложение Б).

4. Находим работу, полученную в расширительном цилиндре:

$$l_{p.c.} = C_{mp}(T_3 - T_4).$$

5. Работа, затраченная в цикле, составит:

$$l_o = l_k - l_{p.c.}$$

6. Удельная холодопроизводительность воздуха равна:

$$q_o = C_{mp}(T_1 - T_4)$$

7. Холодильный коэффициент установки составит:

$$\varepsilon = \frac{q_o}{l_o}$$

8. Холодильный коэффициент установки, работающей по циклу Карно, для того же интервала температур определяем по формуле:

$$\varepsilon_k = \frac{T_1}{T_3 - T_1}$$

9. Расход холодильного агента составит:

$$M = \frac{Q_o}{q_o}$$

10. Определяем мощность двигателя:

$$N_{\text{теор}} = M l_o$$

11. Мощность компрессора находим по уравнению:

$$N_k = M l_k$$

12. Мощность расширительного цилиндра составит:

$$N_{p.c.} = Ml_{p.c.}$$

13. Количество теплоты, передаваемой охлаждающей воде, определяем из общего уравнения нахождения холодильного коэффициента:

$$q = \frac{q_o}{\varepsilon} + q_o$$

Задача 2. 1. Температуру T_4 воздуха, поступающего в холодильную камеру, определяем из соотношения параметров политропного процесса 3–4:

$$T_4 = T_3 \left(\frac{P_1}{P_2} \right)^{\frac{m-1}{m}}$$

2. Температуру T_2 сжатого воздуха, выходящего из компрессора, определяем из соотношения параметров процесса 1–2:

$$T_2 = T_1 \left(\frac{P_2}{P_1} \right)^{\frac{m-1}{m}}$$

3. Холодильный коэффициент установки составит:

$$\varepsilon = \frac{T_1}{T_2 - T_1}$$

4. Удельная холодопроизводительность воздуха равна:

$$q_o = C_{mp}(T_1 - T_4)$$

5. Расход холодильного агента определяем по формуле:

$$M = \frac{Q_o}{q_o}$$

где Q_o – холодопроизводительность установки, кВт (1 МДж/ч = 1 000/3 600 кВт).

6. Работа, затраченная в цикле, составит:

$$l_o = \frac{q_o}{\varepsilon}$$

7. Теоретическая мощность двигателя составит:

$$N_{теор} = Ml_o$$

Задача 3. 1. Определяем холодильный коэффициент установки по уравнению:

$$\varepsilon = \frac{1}{\left(\frac{P_2}{P_1}\right)^{\frac{k-1}{k}} - 1}$$

2. Работа, затраченная в цикле, составит:

$$l_o = \frac{N_{\text{теор}}}{M}$$

3. Определяем холодопроизводительность для одного килограмма воздуха:

$$q_o = \varepsilon \cdot l_o$$

4. Холодопроизводительность установки составит:

$$Q_o = M \cdot q_o$$

СПИСОК РЕКОМЕНДУЕМОЙ ЛИТЕРАТУРЫ

1. Амерханов, Р. А. Теплотехника : учебник / Р. А. Амерханов, Б. Х. Драганов. – М. : Энергоатомиздат, 2006. – 431 с.
2. Герасимович, Л. С. Задачи по применению теплоты в сельском хозяйстве / Л. С. Герасимович, Б. Х. Драганов. – Киев : Вища школа, 1998. – 283 с.
3. Драганов, Б. Х. Теплотехника и применение теплоты в сельском хозяйстве / Б. Х. Драганов, А. В. Кузнецов, С. П. Рудобашта. – М. : Агропромиздат, 1990. – 463 с.
4. Ерофеев, В. Л. Теплотехника : учебник. В 2 т. Т. 1. Термодинамика и теория теплообмена / В. Л. Ерофеев, А. С. Пряхин, П. Д. Семенов ; под редакцией В. Л. Ерофеева, А. С. Пряхина. – М. : Юрайт, 2020. – 308 с. // ЭБС Юрайт : [сайт]. – URL: <https://urait.ru/bcode/448239>.
5. Ерофеев, В. Л. Теплотехника : учебник. В 2 т. Т. 2. Энергетическое использование теплоты / В. Л. Ерофеев, А. С. Пряхин, П. Д. Семенов ; под редакцией В. Л. Ерофеева, А. С. Пряхина. – М. : Юрайт, 2020. – 199 с. // ЭБС Юрайт : [сайт]. – URL: <https://urait.ru/bcode/448363>.
6. Захаров, А. А. Практикум по применению теплоты и теплоснабжению сельского хозяйства / А. А. Захаров. – М. : Агропромиздат, 1995. – 315 с.
7. Кирюматов, А. И. Расчет параметров состояния и основных термодинамических величин рабочих тел тепловых машин / А. И. Кирюматов. – М. : Агропромиздат, 1981. – 50 с.
8. Краткий курс теплотехники : учебное пособие / С. В. Щитов [и др.]. – Благовещенск : Дальневосточный государственный аграрный университет, 2011. – 147 с.
9. Круглов, Г. А. Теплотехника : учебное пособие / Г. А. Круглов, Р. И. Булгакова, Е. С. Круглова. – СПб : Лань, 2012. – 208 с. // ЭБС Лань : [сайт]. – URL: <https://e.lanbook.com/book/3900>.
10. Кузовлев, В. А. Техническая термодинамика и основы теплопередачи / В. А. Кузовлев. – М. : Высшая школа, 1975. – 303 с.

-
11. Литвин, А. М. Теоретические основы теплотехники / А. М. Литвин. – М. : Энергия, 1969. – 328 с.
 12. Луканин, В. Н. Теплотехника / В. Н. Луканин. – М. : Высшая школа, 2002. – 671 с.
 13. Нащокин, В. В. Техническая термодинамика и теплопередача / В. В. Нащокин. – М. : Высшая школа, 1980. – 469 с.
 14. Рабинович, О. М. Сборник задач по технической термодинамике / О. М. Рабинович. – М. : Высшая школа, 1973. – 344 с.
 15. Самостоятельная работа по дисциплине «Теплотехника» : методические рекомендации. – Благовещенск : Дальневосточный государственный аграрный университет, 2019. – 34 с. // Электронная библиотека Дальневосточного государственного аграрного университета : [сайт]. – URL: https://irbis.dalgau.ru/DigitalLibrary/UMM_vo/503.pdf.
 16. Синявский, Ю. В. Сборник задач по курсу «Теплотехника» : учебное пособие / Ю. В. Синявский. – СПб. : ГИОРД, 2010. – 128 с. // ЭБС Лань : [сайт]. – URL: <https://e.lanbook.com/book/4907>.
 17. Теплотехника / И. Н. Сушкин [и др.]. – М. : Металлургия, 1973. – 479 с.
 18. Теплотехника. Практикум : учебное пособие / под редакцией В. Л. Ерофеева, А. С. Пряхина. – М. : Юрайт, 2020. – 395 с. // ЭБС Юрайт : [сайт]. – URL: <https://urait.ru/bcode/450867>.
 19. Электронный учебно-методический комплекс по дисциплине «Теплотехника» // Электронная информационно-образовательная среда Дальневосточного государственного аграрного университета : [сайт]. – URL: <https://www.eiop.dalgau.ru/course/view.php?id=763>.

ПРИЛОЖЕНИЕ А

СООТНОШЕНИЯ МЕЖДУ ЕДИНИЦАМИ ДАВЛЕНИЯ

Таблица А.1 – Соотношения между единицами давления

Единицы давления	Па	бар	мм рт. ст.	мм вод. ст.	кгс/см ²
Па	1	10^{-5}	$7,5 \cdot 10^{-3}$	0,102	$1,02 \cdot 10^{-5}$
бар	10^5	1	$7,5 \cdot 10^2$	$1,02 \cdot 10^4$	1,02
мм рт. ст.	133,3	$1,333 \cdot 10^{-3}$	1	13,6	$1,36 \cdot 10^{-3}$
мм вод. ст.	9,81	$9,81 \cdot 10^{-5}$	$7,35 \cdot 10^2$	1	10^{-4}
кгс/см ²	98 100	0,981	$7,35 \cdot 10^2$	10^4	1

ПРИЛОЖЕНИЕ Б

МОЛЕКУЛЯРНЫЕ МАССЫ, ПЛОТНОСТИ

И ОБЪЕМЫ КИЛОМОЛЕЙ ПРИ НОРМАЛЬНЫХ УСЛОВИЯХ

И ГАЗОВЫЕ ПОСТОЯННЫЕ ВАЖНЕЙШИХ ГАЗОВ

Таблица Б.2 – Молекулярные массы, плотности и объемы киломолей при нормальных условиях и газовые постоянные важнейших газов

Вещество	Химическое обозначение	Молекулярная масса	Плотность, кг/м ³	Объем киломоля, м ³ /кг	Газовая постоянная, Дж/(кг·К)
Воздух	–	28,96	1,293	22,40	287,0
Кислород	O ₂	32,00	1,429	22,39	259,8
Азот	N ₂	28,026	1,251	22,40	296,8
Гелий	He	4,003	0,179	22,42	2 078,0
Аргон	Ar	39,994	1,783	22,39	208,2
Водород	H ₂	2,016	0,090	22,43	4 124,0
Оксид углерода	CO	28,01	1,250	22,40	296,8
Двуокись углерода	CO ₂	44,01	1,977	22,26	188,9
Сернистый газ	SO ₂	64,06	2,926	21,89	129,8
Метан	CH ₄	16,032	0,717	22,39	518,8
Этилен	C ₂ H ₄	28,052	1,251	22,41	296,6
Коксовый газ	–	11,50	0,515	22,33	721,0
Аммиак	NH ₃	17,032	0,711	22,08	488,3
Водяной пар	H ₂ O	18,016	0,804	22,40	461,0

ПРИЛОЖЕНИЕ В

ФОРМУЛЫ ДЛЯ РАСЧЕТА ГАЗОВЫХ СМЕСЕЙ

Таблица В.1 – Формулы для расчета газовых смесей

Задание состава смеси	Перевод из одного состава в другой	Плотность и удельный объем смеси	Кажущаяся молекулярная масса смеси	Газовая постоянная смеси	Парциальное давление
Массовыми долями	$r_i = \frac{\frac{m_i}{\mu_i}}{\sum_1^n \frac{m_i}{\mu_i}}$	$v_{см} = \sum_1^n \frac{m_i}{p_i}$ $p_{см} = \frac{1}{\sum_1^n \frac{m_i}{p_i}}$	$\mu_{см} = \frac{1}{\sum_1^n \frac{m_i}{\mu_i}}$	$R_{см} = \sum_1^n m_i R_i$	$P_i = m_i \frac{R_i}{R_{см}} P_{см}$
Объемными долями	$m_i = \frac{r_i \mu_i}{\sum_1^n r_i \mu_i}$	$p_{см} = \sum_1^n r_i p_i$ $v_{см} = \frac{1}{\sum_1^n r_i p_i}$	$\mu_{см} = \sum_1^n r_i \mu_i$	$R_{см} = \frac{8314}{\sum_1^n r_i \mu_i}$	$P_i = r_i P_{см}$

ПРИЛОЖЕНИЕ Г

**ПРИБЛИЖЕННЫЕ ЗНАЧЕНИЯ МОЛЬНЫХ ТЕПЛОЕМКОСТЕЙ
ПРИ ПОСТОЯННОМ ОБЪЕМЕ И ПОСТОЯННОМ ДАВЛЕНИИ**

Таблица Г.1 – Приближенные значения мольных теплоемкостей при постоянном объеме и постоянном давлении ($c = const$)

Газы	Теплоемкость, кДж/кмоль К		$k = \frac{\mu c_p}{\mu c_v}$
	μc_v	μc_p	
Одноатомные	12,56	20,93	1,67
Двухатомные	20,93	29,31	1,40
Трех- и многоатомные	29,31	37,68	1,29

ПРИЛОЖЕНИЕ Д

**ИНТЕРПОЛЯЦИОННЫЕ ФОРМУЛЫ ДЛЯ ИСТИННЫХ
И СРЕДНИХ МОЛЬНЫХ ТЕПЛОЕМКОСТЕЙ ГАЗОВ**

Таблица Д.1 – Интерполяционные формулы для истинных и средних молярных теплоемкостей газов

В кДж/(кмоль·К)

Газ	Молярная теплоемкость при $p = const$	
	истинная	средняя
В пределах 0–1 000 °С		
O ₂	$\mu_{cp} = 29,5802 + 0,0069706 \cdot t$	$\mu_{срт} = 29,2080 + 0,0040717 \cdot t$
N ₂	$\mu_{cp} = 28,5372 + 0,0053905 \cdot t$	$\mu_{срт} = 28,7340 + 0,0023488 \cdot t$
CO ₂	$\mu_{cp} = 28,7395 + 0,0058862 \cdot t$	$\mu_{срт} = 28,8563 + 0,0026808 \cdot t$
Воздух	$\mu_{cp} = 28,7558 + 0,0057208 \cdot t$	$\mu_{срт} = 28,8270 + 0,0027080 \cdot t$
H ₂ O	$\mu_{cp} = 32,8367 + 0,0116611 \cdot t$	$\mu_{срт} = 33,1494 + 0,0052749 \cdot t$
SO ₂	$\mu_{cp} = 42,8729 + 0,0132043 \cdot t$	$\mu_{срт} = 40,4386 + 0,0099562 \cdot t$
В пределах 0–1 500 °С		
H ₂	$\mu_{cp} = 28,3446 + 0,0031518 \cdot t$	$\mu_{срт} = 28,7210 + 0,0012008 \cdot t$
CO ₂	$\mu_{cp} = 41,3597 + 0,0144985 \cdot t$	$\mu_{срт} = 38,3955 + 0,0105838 \cdot t$
В пределах 1 000–2 700 °С		
O ₂	$\mu_{cp} = 33,3446 + 0,0021951 \cdot t$	$\mu_{срт} = 31,5731 + 0,0017572 \cdot t$
N ₂	$\mu_{cp} = 32,7466 + 0,0016517 \cdot t$	$\mu_{срт} = 29,7815 + 0,0016835 \cdot t$
CO	$\mu_{cp} = 33,6991 + 0,0013406 \cdot t$	$\mu_{срт} = 30,4242 + 0,0015579 \cdot t$
Воздух	$\mu_{cp} = 32,9564 + 0,0017806 \cdot t$	$\mu_{срт} = 30,1533 + 0,0016973 \cdot t$
H ₂ O	$\mu_{cp} = 40,2393 + 0,0059854 \cdot t$	$\mu_{срт} = 34,5118 + 0,0045979 \cdot t$
В пределах 1 500–3 000 °С		
H ₂	$\mu_{cp} = 31,0079 + 0,0020243 \cdot t$	$\mu_{срт} = 28,6344 + 0,0014821 \cdot t$
CO ₂	$\mu_{cp} = 56,8768 + 0,0021738 \cdot t$	$\mu_{срт} = 48,4534 + 0,0030032 \cdot t$

ПРИЛОЖЕНИЕ Е

**ИНТЕРПОЛЯЦИОННЫЕ ФОРМУЛЫ ДЛЯ СРЕДНИХ МАССОВЫХ
И ОБЪЕМНЫХ ТЕПЛОЕМКОСТЕЙ ГАЗОВ**

Таблица Е.1 – Интерполяционные формулы для средних массовых и объемных теплоемкостей газов

Газ	Теплоемкость	
	массовая, кДж/(кг·К)	объемная, кДж/(м ³ ·К)
В пределах 0–1 000 °С		
O ₂	$C_{pm} = 0,9127 + 0,00012724 \cdot t$	$C'_{pm} = 1,3046 + 0,00018183 \cdot t$
	$C_{vm} = 0,6527 + 0,00012724 \cdot t$	$C'_{vm} = 0,9337 + 0,00018183 \cdot t$
N ₂	$C_{pm} = 1,0258 + 0,00008382 \cdot t$	$C'_{pm} = 1,2833 + 0,00010492 \cdot t$
	$C_{vm} = 0,7289 + 0,00008382 \cdot t$	$C'_{vm} = 0,9123 + 0,00010492 \cdot t$
CO ₂	$C_{pm} = 1,0304 + 0,00009575 \cdot t$	$C'_{pm} = 1,2883 + 0,00011966 \cdot t$
	$C_{vm} = 0,7335 + 0,00009575 \cdot t$	$C'_{vm} = 0,9173 + 0,00011966 \cdot t$
Воздух	$C_{pm} = 0,995 + 0,00009349 \cdot t$	$C'_{pm} = 1,2870 + 0,00012091 \cdot t$
	$C_{vm} = 0,7084 + 0,00009349 \cdot t$	$C'_{vm} = 0,9161 + 0,00012091 \cdot t$
H ₂ O	$C_{pm} = 1,8401 + 0,00029278 \cdot t$	$C'_{pm} = 1,4800 + 0,00023551 \cdot t$
	$C_{vm} = 1,3783 + 0,00029278 \cdot t$	$C'_{vm} = 1,1091 + 0,00023551 \cdot t$
SO ₂	$C_{pm} = 0,6314 + 0,00015541 \cdot t$	$C'_{pm} = 1,8472 + 0,00004547 \cdot t$
	$C_{vm} = 0,5016 + 0,00015541 \cdot t$	$C'_{vm} = 1,4703 + 0,00004547 \cdot t$
В пределах 0–1 500 °С		
H ₂	$C_{pm} = 14,2494 + 0,00059574 \cdot t$	$C'_{pm} = 1,2803 + 0,00005355 \cdot t$
	$C_{vm} = 10,1241 + 0,00059674 \cdot t$	$C'_{vm} = 0,9094 + 0,00005355 \cdot t$
CO ₂	$C_{pm} = 0,8725 + 0,00024053 \cdot t$	$C'_{pm} = 1,7250 + 0,00004756 \cdot t$
	$C_{vm} = 0,6837 + 0,00024053 \cdot t$	$C'_{vm} = 1,3540 + 0,00004756 \cdot t$

ПРИЛОЖЕНИЕ Ж

ТЕПЛОЕМКОСТЬ КИСЛОРОДА (O₂)

Таблица Ж.1 – Теплоемкость кислорода (O₂)

Темпе- ратура	Мольная теплоемкость, кДж/(кмоль·К)				Массовая теплоемкость, кДж/(кг·К)		Объемная теплоемкость, кДж/(м ³ ·К)	
	μ_{cp}	μ_{cv}	μ_{cpm}	μ_{cvm}	C_{pm}	C_{vm}	C'_{pm}	C'_{vm}
0	29,274	20,959	29,274	20,959	0,9148	0,6548	1,3059	0,9349
100	29,877	21,562	29,538	21,223	0,9232	0,6632	1,3176	0,9466
200	30,815	22,500	29,931	21,616	0,9353	0,6753	1,3352	0,9642
300	31,832	23,517	30,400	22,085	0,9500	0,6900	1,3561	0,9852
400	32,758	24,443	30,878	22,563	0,9651	0,7051	1,3575	1,0065
500	33,549	25,234	31,334	23,019	0,9793	0,7193	1,3980	1,0270
600	34,202	25,887	31,761	23,446	0,9927	0,7327	1,4168	1,0459
700	34,746	26,431	32,150	23,835	1,0048	0,7448	1,4344	1,0634
800	35,203	26,888	32,502	24,187	1,0157	0,7557	1,4499	1,0789
900	35,584	27,269	32,825	24,510	1,0258	0,7658	1,4645	1,0936
1 000	35,914	27,599	33,118	24,803	1,0350	0,7750	1,4775	1,1066
1 100	36,216	27,901	33,386	25,071	1,0434	0,7834	1,4892	1,1183
1 200	36,488	28,173	33,633	25,318	1,0509	0,7913	1,5005	1,1296
1 300	36,752	28,437	33,863	25,548	1,0580	0,7984	1,5106	1,1396
1 400	36,999	28,684	34,076	25,761	1,0647	0,8051	1,5202	1,1493
1 500	37,242	28,927	34,282	25,967	1,0714	0,8114	1,5294	1,1585
1 600	37,480	29,165	34,474	26,159	1,0773	0,8173	1,5378	1,1669
1 700	37,715	29,400	34,658	26,343	1,0831	0,8231	1,5462	1,1752
1 800	37,945	29,630	34,834	26,519	1,0886	0,8286	1,5541	1,1832
1 900	38,175	29,860	35,006	26,691	1,0940	0,8340	1,5617	1,1907
2 000	38,406	30,091	35,169	26,854	1,0990	0,8390	1,5692	1,1978
2 100	38,636	30,321	35,328	27,013	1,1041	0,8441	1,5759	1,2050
2 200	39,858	30,543	35,483	27,168	1,1087	0,8491	1,5830	1,2121
2 300	39,080	30,765	35,634	27,319	1,1137	0,8537	1,5897	1,2188
2 400	39,293	30,978	35,785	27,470	1,1183	0,8583	1,5964	1,2255
2 500	39,502	31,187	35,927	27,612	1,1229	0,8629	1,6027	1,2318
2 600	39,708	31,393	36,069	27,754	1,1271	0,8675	1,6090	1,2380
2 700	39,909	31,594	36,207	27,892	1,1313	0,8717	1,6153	1,2443

ПРИЛОЖЕНИЕ И
ТЕПЛОЕМКОСТЬ АЗОТА (N₂)

Таблица И.1 – Теплоемкость азота (N₂)

Темпе- ратура	Мольная теплоемкость, кДж/(кмоль·К)				Массовая теплоемкость, кДж/(кг·К)		Объемная теплоемкость, кДж/(м ³ ·К)	
	<i>μ_{ср}</i>	<i>μ_{сv}</i>	<i>μ_{срm}</i>	<i>μ_{сvm}</i>	<i>C_{рm}</i>	<i>C_{vт}</i>	<i>C'_{рm}</i>	<i>C'_{vт}</i>
0	29,115	20,800	29,115	20,800	1,0392	0,7423	1,2987	0,9278
100	29,199	20,884	29,144	20,829	1,0404	0,7427	1,3004	0,9295
200	29,471	21,156	29,228	20,913	1,0434	0,7465	1,3038	0,9328
300	29,952	21,637	29,383	21,068	1,0488	0,7519	1,3109	0,9399
400	30,576	22,261	29,601	21,286	1,0567	0,7599	1,3205	0,9496
500	31,250	22,935	29,864	21,549	1,0660	0,7691	1,3322	0,9613
600	31,920	23,605	30,149	21,834	1,0760	0,7792	1,3452	0,9743
700	32,540	24,225	30,451	22,136	1,0869	0,7900	1,3586	0,9877
800	33,101	24,786	30,748	22,433	1,0974	0,8005	1,3716	1,0006
900	33,599	25,284	31,037	22,722	1,1078	0,8110	1,3845	1,0136
1 000	34,039	25,724	31,313	22,998	1,1179	0,8210	1,3971	1,0178
1 100	34,424	26,109	31,577	23,262	1,1271	0,8302	1,4089	1,0379
1 200	34,773	26,448	31,828	23,513	1,1359	0,8395	1,4202	1,0492
1 300	35,070	26,745	32,067	23,752	1,1447	0,8478	1,4306	1,0597
1 400	35,330	27,005	32,293	23,978	1,1526	0,8558	1,4407	1,0697
1 500	35,556	27,231	32,502	24,187	1,1602	0,8633	1,4499	1,0789
1 600	35,757	27,432	32,699	24,384	1,1673	0,8704	1,4587	1,0877
1 700	35,937	27,612	32,883	24,568	1,1736	0,8771	1,4671	1,0961
1 800	36,100	27,775	33,055	24,740	1,1798	0,8830	1,4746	1,1036
1 900	36,247	27,922	33,218	24,903	1,1857	0,8889	1,4821	1,1112
2 000	36,377	28,052	33,373	25,058	1,1911	0,8943	1,4888	1,1179
2 100	36,494	28,169	33,520	25,205	1,1966	0,8997	1,4955	1,1246
2 200	36,603	28,278	33,658	25,343	1,2012	0,9048	1,5018	1,1304
2 300	36,703	28,378	33,787	25,472	1,2058	0,9094	1,5072	1,1363
2 400	36,795	28,470	33,909	25,594	1,2104	0,9136	1,5127	1,1417
2 500	36,879	28,554	34,022	25,707	1,2142	0,9177	1,5177	1,1468

ПРИЛОЖЕНИЕ К

ТЕПЛОЕМКОСТЬ ОКИСИ УГЛЕРОДА (СО)

Приложение К.1 – Теплоемкость окиси углерода (СО)

Темпе- ратура	Мольная теплоемкость, кДж/(кмоль·К)				Массовая теплоемкость, кДж/(кг·К)		Объемная теплоемкость, кДж/(м ³ ·К)	
	μ_{cp}	μ_{cv}	μ_{cpm}	μ_{cvm}	C_{pm}	C_{vm}	C'_{pm}	C'_{vm}
0	29,123	20,808	29,123	20,808	1,0396	0,7427	1,2992	0,9282
100	29,262	20,947	29,178	20,863	1,0417	0,7448	1,3017	0,9307
200	29,647	21,332	29,303	20,988	1,0463	0,7494	1,3071	0,9362
300	30,254	21,939	29,517	21,202	1,0538	0,7570	1,3167	0,9458
400	30,974	22,659	29,789	21,474	1,0634	0,7666	1,3289	0,9579
500	31,707	23,392	30,099	21,784	1,0748	0,7775	1,3427	0,9718
600	32,402	24,087	30,425	22,110	1,0861	0,7892	1,3574	0,9864
700	33,025	24,710	30,752	22,437	1,0978	0,8009	1,3720	1,0011
800	33,574	25,259	31,070	22,755	1,1091	0,8122	1,3862	1,0153
900	34,055	25,740	31,376	23,061	1,1200	0,8231	1,3996	1,0287
1 000	34,470	26,155	31,665	23,350	1,1304	0,8336	1,4126	1,0417
1 100	34,826	26,511	31,937	23,622	1,1401	0,8432	1,4248	1,0538
1 200	35,140	26,825	32,192	23,877	1,1493	0,8566	1,4361	1,0651
1 300	35,412	27,097	32,427	24,112	1,1577	0,8608	1,4465	1,0756
1 400	35,646	27,331	32,653	24,338	1,1656	0,8688	1,4566	1,0856
1 500	35,856	27,541	32,858	24,543	1,1731	0,8763	1,4658	1,0948
1 600	36,040	27,725	33,051	24,736	1,1798	0,8830	1,4746	1,1036
1 700	36,203	27,888	33,231	24,916	1,1865	0,8893	1,4825	1,1116
1 800	36,350	28,035	33,402	25,087	1,1924	0,8956	1,4901	1,1191
1 900	36,480	28,165	33,561	25,246	1,1983	0,9014	1,4972	1,1262
2 000	36,597	28,282	33,708	25,393	1,2033	0,9064	1,5039	1,1329
2 100	36,706	28,391	33,850	25,535	1,2083	0,9115	1,5102	1,1392
2 200	36,802	28,487	33,980	25,665	1,2129	0,9161	1,5160	1,1451
2 300	36,894	28,579	34,106	25,791	1,2175	0,9207	1,5215	1,1505
2 400	36,978	28,663	34,223	25,908	1,2217	0,9249	1,5269	1,1560
2 500	36,053	28,738	34,336	26,021	1,2259	0,9291	1,5320	1,1610

ПРИЛОЖЕНИЕ Л
ТЕПЛОЕМКОСТЬ ВОДОРОДА (H₂)

Таблица Л.1 – Теплоемкость водорода (H₂)

Темпе- ратура	Мольная теплоемкость кДж/(кмоль·К)				Массовая теплоемкость, кДж/(кг·К)		Объемная теплоемкость, кДж/(м ³ ·К)	
	μ_{cp}	μ_{cv}	μ_{cpm}	μ_{cvm}	C_{pm}	C_{vm}	C'_{pm}	C'_{vm}
0	28,617	20,302	28,617	20,302	14,195	10,071	1,2766	0,9056
100	29,128	20,813	28,935	20,620	14,353	10,228	1,2908	0,9198
200	29,241	20,926	29,073	20,758	14,421	10,297	1,2971	0,9261
300	29,299	20,984	29,123	20,808	14,446	10,322	1,2992	0,9282
400	29,396	21,081	29,186	20,871	14,477	10,353	1,3021	0,9311
500	29,559	21,244	29,249	20,934	14,509	10,384	1,3050	0,9341
600	29,793	21,478	29,316	21,001	14,542	10,417	1,3080	0,9370
700	30,099	21,784	29,408	21,093	14,587	10,463	1,3121	0,9412
800	30,472	22,157	29,517	21,202	14,641	10,517	1,3167	0,9458
900	30,869	22,554	29,647	21,332	14,706	10,581	1,3226	0,9516
1 000	31,284	22,969	29,789	21,474	14,776	10,652	1,3289	0,9579
1 100	31,723	23,408	29,944	21,629	14,853	10,727	1,3360	0,9650
1 200	32,155	23,840	30,107	21,792	14,934	10,809	1,3431	0,9722
1 300	32,590	24,275	30,288	21,973	15,023	10,899	1,3511	0,9801
1 400	33,000	24,685	30,467	22,152	15,113	10,988	1,3591	0,9881
1 500	33,394	25,079	30,647	22,322	15,202	11,077	1,3674	0,9964
1 600	33,762	25,447	30,832	22,517	15,294	11,169	1,3754	0,0044
1 700	34,114	25,799	31,012	22,697	15,383	11,258	1,3833	0,0124
1 800	34,445	26,130	31,192	22,877	15,472	11,347	1,3917	0,0207
1 900	34,763	26,448	31,372	23,057	15,561	11,437	1,3996	0,0287
2 000	35,056	26,741	31,548	23,233	15,649	11,524	1,4076	0,0366
2 100	35,332	27,017	31,723	23,408	15,736	11,611	1,4151	0,0442
2 200	35,605	27,290	31,891	23,576	15,819	11,694	1,4227	0,0517
2 300	35,852	27,537	32,058	23,743	15,902	11,798	1,4302	0,0593
2 400	36,090	27,775	32,222	23,907	15,983	11,858	1,4373	0,0664
2 500	36,316	28,001	32,385	24,070	16,064	11,937	1,4449	0,0739
2 600	36,530	28,215	32,540	24,225	16,141	11,016	1,4516	0,0806
2 700	36,731	28,416	32,691	24,376	16,215	11,091	1,4583	0,0873

ПРИЛОЖЕНИЕ М

ТЕПЛОЕМКОСТЬ УГЛЕКИСЛОГО ГАЗА (CO₂)

Таблица М.1 – Теплоемкость углекислого газа (CO₂)

Темпе- ратура	Мольная теплоемкость, кДж/(кмоль·К)				Массовая теплоемкость, кДж/(кг·К)		Объемная теплоемкость, кДж/(м ³ ·К)	
	μ_{cp}	μ_{cv}	μ_{cpm}	μ_{cvm}	C_{pm}	C_{vm}	C'_{pm}	C'_{vm}
0	35,860	27,545	35,860	27,545	0,8148	0,6259	1,5908	1,2288
100	40,206	31,891	38,112	29,797	0,8658	0,6770	1,7003	1,3293
200	43,689	35,374	40,059	31,744	0,9102	0,7214	1,7373	1,4164
300	46,515	38,200	41,755	33,440	0,9487	0,7599	1,8627	1,4918
400	48,860	40,515	43,250	34,935	0,9826	0,7938	1,9297	1,5587
500	50,815	42,500	44,573	36,258	1,0128	0,8240	1,9887	1,6178
600	52,452	44,137	45,753	37,438	1,0396	0,8508	2,0411	1,6701
700	53,826	45,511	46,813	38,498	1,0639	0,8746	2,0884	1,7174
800	54,977	46,662	47,763	39,448	1,0852	0,8964	2,1311	1,7601
900	55,952	47,637	48,617	40,302	1,1045	0,9157	2,1692	1,7982
1000	56,773	48,458	49,392	41,077	1,1225	0,9232	2,2035	1,8326
1100	57,472	49,157	50,099	41,784	1,1384	0,9496	2,2349	1,8640
1200	58,071	49,756	50,740	42,425	1,1530	0,9638	2,2638	1,8929
1300	58,586	50,271	51,322	43,007	1,1660	0,9772	2,2898	1,9188
1400	59,030	50,715	51,858	43,543	1,1782	0,9893	2,3136	1,9427
1500	59,411	51,096	52,348	44,033	1,1895	1,0006	2,3354	1,9644
1600	59,737	51,422	52,800	44,485	1,1995	1,0107	2,3555	1,9845
1700	60,022	51,707	53,218	44,903	1,2091	1,0203	2,3743	2,0034
1800	60,269	51,954	53,604	45,289	1,2179	1,0291	2,3915	2,0205
1900	60,478	52,163	53,959	45,644	1,2259	1,0371	2,4074	2,0365
2000	60,654	52,339	54,290	45,975	1,2334	1,0446	2,4221	2,0511
2100	60,801	52,486	54,596	46,281	1,2405	1,0517	2,4359	2,0649
2200	60,918	52,603	54,881	46,566	1,2468	1,0580	2,4484	2,0775
2300	61,006	52,691	55,144	46,829	1,2531	1,0639	2,4602	2,0892
2400	61,060	52,745	55,391	47,076	1,2586	1,0697	2,4710	2,1001
2500	61,085	52,770	55,617	47,302	1,2636	1,0748	2,4811	2,1101

ПРИЛОЖЕНИЕ Н
ТЕПЛОЕМКОСТЬ ВОЗДУХА

Таблица Н.1 – Теплоемкость воздуха

Темпе- ратура	Мольная теплоемкость, кДж/(кмоль·К)				Массовая теплоемкость, кДж/(кг·К)		Объемная теплоемкость, кДж/(м ³ ·К)	
	μ_{cp}	μ_{cv}	μ_{cpm}	μ_{cvm}	C_{pm}	C_{vm}	C'_{pm}	C'_{vm}
0	29,073	20,758	29,073	20,758	1,0036	0,7164	1,2971	0,9261
100	29,266	20,951	29,152	20,838	1,0061	0,7193	1,3004	0,9295
200	29,676	21,361	29,299	20,984	1,0115	0,7243	1,3071	0,9362
300	30,266	21,951	29,521	21,206	1,0191	0,7319	1,3172	0,9462
400	30,949	22,634	29,789	21,474	1,0283	0,7415	1,3289	0,9579
500	31,640	23,325	30,095	21,780	1,0387	0,7519	1,3427	0,9718
600	32,301	23,986	30,405	22,090	1,0496	0,7624	1,3565	0,9856
700	32,900	24,585	30,723	22,408	1,0605	0,7733	1,3708	0,9998
800	33,432	25,117	31,028	22,713	1,0710	0,7842	1,3842	1,0312
900	33,905	25,590	31,321	23,006	1,0815	0,7942	1,3876	1,1262
1 000	34,315	26,000	31,598	23,283	1,0907	0,8039	1,4098	1,0387
1 100	34,679	26,394	31,862	23,547	1,0999	0,8127	1,4214	1,0505
1 200	35,002	26,687	32,109	23,794	1,1081	0,8215	1,4327	1,0618
1 300	35,291	26,976	32,343	24,028	1,1166	0,8294	1,4432	1,0722
1 400	35,546	27,231	32,565	24,250	1,1242	0,8369	1,4528	1,0819
1 500	35,772	27,457	32,774	24,459	1,1313	0,8441	1,4620	1,0811
1 600	35,977	27,662	32,967	24,652	1,1380	0,8508	1,4708	1,0999
1 700	36,170	27,855	33,151	24,836	1,1443	0,8570	1,4788	1,1078
1 800	36,346	28,031	33,319	25,004	1,1501	0,8633	1,4867	1,1158
1 900	36,509	28,194	33,482	25,167	1,1560	0,8688	1,4939	1,1229
2 000	36,655	28,340	33,641	25,326	1,1610	0,8742	1,5010	1,1296
2 100	36,798	28,483	33,787	25,472	1,1664	0,8792	1,5072	1,1363
2 200	36,928	28,613	33,926	25,611	1,1710	0,8843	1,5135	1,1426
2 300	37,053	28,738	34,060	25,745	1,1757	0,8889	1,5194	1,1484
2 400	37,170	28,855	34,185	25,870	1,1803	0,8930	1,5253	1,1543
2 500	37,279	28,964	34,307	25,992	1,1840	0,8972	1, 5303	1,1593

ПРИЛОЖЕНИЕ П

НАСЫЩЕННЫЙ ВОДЯНОЙ ПАР (ПО ДАВЛЕНИЯМ)

Таблица П.1 – Насыщенный водяной пар (по давлениям)

P, МПа	t, °С	v', м³/кг	v'', м³/кг	h', кДж/кг	h'', кДж/кг	r, кДж/кг	s', кДж/ (кг·К)	s'', кДж/ (кг·К)
0,5	151,84	0,0010927	0,3747	640,1	2 749	2 109	1,860	6,822
0,6	158,84	0,0011007	0,3156	670,5	2 757	2 086	1,931	6,761
0,7	164,96	0,0011081	0,2728	697,2	2 764	2 067	1,992	6,709
0,8	170,42	0,0011149	0,2403	720,9	2 769	2 048	2,046	6,663
0,9	175,35	0,0011213	0,2149	742,8	2 774	2 031	2,094	6,623
1,0	179,88	0,0011273	0,1946	762,7	2 778	2 015	2,138	6,587
1,1	184,05	0,0011331	0,1775	781,1	2 781	2 000	2,179	6,554
1,2	187,95	0,0011385	0,1633	798,3	2 785	1 987	2,216	6,523
1,3	191,60	0,0011438	0,1512	814,5	2 787	1 973	2,251	6,495
1,4	195,04	0,0011490	0,1408	830,0	2 790	1 960	2,248	6,469
1,5	198,28	0,0011539	0,1317	844,6	2 792	1 947	2,314	6,445
1,6	201,36	0,0011586	0,1238	858,3	2 793	1 935	2,344	6,422
1,7	204,30	0,0011632	0,1167	871,6	2 795	1 923	2,371	6,400
1,8	207,10	0,0011678	0,1104	884,4	2 796	1 912	2,397	6,379
1,9	209,78	0,0011722	0,1047	896,6	2 798	1 901	2,422	6,359
2,0	210,37	0,0011766	0,09958	908,5	2 799	1 891	2,447	6,340
2,1	214,84	0,0011809	0,09492	919,8	2 800	1 880	2,470	6,322
2,2	217,24	0,0011851	0,09068	930,9	2 801	1 870	2,492	6,305
2,3	219,55	0,0011892	0,08679	941,5	2 801	1 860	2,514	6,288
2,4	221,77	0,0011932	0,08324	951,8	2 802	1 850	2,534	6,272
2,5	223,93	0,0011972	0,07993	961,8	2 802	1 840	2,554	6,256
2,6	226,03	0,0012012	0,07688	971,7	2 803	1 831	2,573	6,242
2,7	228,06	0,0012050	0,07496	981,3	2 803	1 822	2,592	6,227
2,8	230,04	0,0012088	0,07141	990,4	2 803	1 813	2,661	6,213
2,9	231,96	0,0012126	0,06895	999,4	2 803	1 804	2,628	6,199
3,0	233,83	0,0012163	0,06665	1 008,3	2 804	1 796	2,646	6,186
3,2	237,44	0,0012239	0,06246	1 025,3	2 803	1 778	2,679	6,161
3,4	240,88	0,0012310	0,05875	1 041,9	2 803	1 761	2,710	6,137
3,6	244,16	0,0012380	0,05543	1 057,3	2 802	1 745	2,740	6,113
3,8	247,31	0,0012450	0,05246	1 072,7	2 802	1 729	2,769	6,091
4,0	250,33	0,0012520	0,04977	1 087,5	2 801	1 713	2,796	6,070
4,2	253,24	0,0012588	0,04732	1 101,7	2 800	1 698	2,823	6,049
4,4	256,05	0,0012656	0,04508	1 115,3	2 798	1 683	2,849	6,029
4,6	258,75	0,0012724	0,04305	1 128,8	2 797	1 668	2,874	6,010
4,8	261,37	0,0012790	0,04118	1 141,8	2 796	1 654	2,898	5,991

Продолжение таблицы П.1

P , МПа	t , °С	v' , м ³ /кг	v'' , м ³ /кг	h' , кДж/кг	h'' , кДж/кг	r , кДж/кг	s' , кДж/ (кг·К)	s'' , кДж/ (кг·К)
5,0	263,91	0,0012857	0,03944	1 154,4	2 794	1 640	2,921	5,973
5,5	269,94	0,0013021	0,03564	1 184,9	2 790	1 604	2,976	5,930
6,0	275,56	0,0013185	0,03243	1 213,9	2 785	1 570	3,027	5,890
6,5	280,83	0,0013347	0,02973	1 241,3	2 779	1 537	3,076	5,851
7,0	285,80	0,0013510	0,02737	1 267,4	2 772	1 504	3,122	5,814
7,5	290,50	0,0013673	0,02532	1 292,7	2 766	1 472	3,166	5,779
8,0	294,98	0,0013838	0,02352	1 317,0	2 758	1 441	3,208	5,745
8,5	299,24	0,0014005	0,02192	1 340,8	2 751	1 409	3,248	5,711
9,0	303,32	0,0014174	0,02048	1 363,7	2 743	1 379	3,287	5,678
9,5	307,22	0,0014345	0,01919	1 385,9	2 734	1 348	3,324	5,646
10,0	310,96	0,0014521	0,01803	1 407,7	2 725	1 317	3,360	5,625
11,0	318,04	0,0014890	0,01598	1 450,2	2 705	1 255	3,430	5,553
12,0	324,63	0,0015270	0,01426	1 491,1	2 685	1 193	3,496	5,492
13,0	330,81	0,0015670	0,01277	1 531,5	2 662	1 130	3,561	5,432
14,0	336,63	0,0016110	0,01149	1 570,8	2 638	1 066	3,623	5,372
15,0	342,11	0,0016580	0,01035	1 610,0	2 611	1 001	3,684	5,310
16,0	347,32	0,0017100	0,009318	1 650,0	2 582	932	3,746	5,247
17,0	352,26	0,0017680	0,008382	1 690,0	2 548	858	3,807	5,177
18,0	356,96	0,0018370	0,007504	1 732,0	2 510	778	3,871	5,107
19,0	361,44	0,0019210	0,006680	1 776,0	2 466	690	3,938	5,027
20,0	365,71	0,0020400	0,005850	1 827,0	2 410	583	4,015	4,928

ПРИЛОЖЕНИЕ Р

НАСЫЩЕННЫЙ ВОДЯНОЙ ПАР (ПО ТЕМПЕРАТУРАМ)

Таблица Р.1 – Насыщенный водяной пар (по температурам)

t , °С	P , МПа	v' , м ³ /кг	v'' , м ³ /кг	h' , кДж/кг	h'' , кДж/кг	r , кДж/кг	s' , кДж/ (кг·К)	s'' , кДж/ (кг·К)
0,01	0,0006108	0,0010002	206,30	0	2 501	2 501	0	9,1544
5	0,0008719	0,0010001	147,20	21,05	2 510	2 489	0,0762	9,0241
10	0,0012277	0,0010004	106,42	42,04	2 519	2 477	0,1510	8,8994
15	0,0017041	0,0010010	77,97	62,97	2 528	2 465	0,2244	8,7806
20	0,0023370	0,0010018	57,84	83,90	2 537	2 454	0,2964	8,6665
25	0,0031660	0,0010030	43,40	104,81	2 547	2 442	0,3672	8,5570
30	0,004241	0,0010044	32,93	125,71	2 556	2 430	0,4366	8,4523
35	0,005622	0,0010061	25,24	146,60	2 565	2 418	0,5049	8,3519
40	0,007375	0,0010079	19,55	167,50	2 574	2 406	0,5723	8,2559
45	0,009584	0,0010099	15,28	188,40	2 582	2 394	0,6384	8,1638
50	0,012335	0,0010121	12,04	209,30	2 592	2 383	0,7038	8,0753
55	0,015740	0,0010145	9,578	230,20	2 600	2 370	0,7679	7,9901
60	0,019917	0,0010171	7,678	251,10	2 609	2 358	0,8311	7,9084
65	0,025010	0,0010199	6,201	272,10	2 617	2 345	0,8934	7,8297
70	0,031170	0,0010228	5,045	293,00	2 626	2 333	0,9549	7,7544
75	0,038550	0,0010258	4,133	314,00	2 635	2 321	1,0157	7,6815
80	0,047360	0,0010290	3,408	334,90	2 643	2 308	1,0753	7,6116
85	0,057810	0,0010324	2,828	355,90	2 651	2 295	1,1342	7,5478
90	0,07011	0,0010359	2,361	377,00	2 659	2 282	1,1925	7,4787
95	0,08451	0,0010396	1,982	398,00	2 668	2 270	1,2502	7,4155
100	0,10132	0,0010435	1,673	419,10	2 676	2 257	1,3071	7,3547
105	0,12079	0,0010474	1,419	440,20	2 683	2 243	1,3632	7,2953
110	0,14326	0,0010515	1,210	461,30	2 691	2 230	1,4184	7,2387
115	0,16905	0,0010559	1,036	482,50	2 698	2 216	1,4733	7,1832
120	0,19854	0,0010603	0,8917	503,70	2 706	2 202	1,5277	7,1298
125	0,23208	0,0010649	0,7704	525,00	2 713	2 188	1,5814	7,0777
130	0,27011	0,0010697	0,6683	546,30	2 721	2 174	1,6345	7,0272
135	0,31300	0,0010747	0,5820	567,50	2 727	2 159	1,6869	6,9781
140	0,36140	0,0010798	0,5087	589,00	2 734	2 145	1,7392	6,9304
145	0,41550	0,0010851	0,4461	610,50	2 740	2 130	1,7907	6,8839
150	0,4760	0,0010906	0,3926	632,20	2 746	2 114	1,8418	6,8383
155	0,5433	0,0010962	0,3466	653,90	2 753	2 099	1,8924	6,7940

Учебное издание

*Щитов Сергей Васильевич, доктор технических наук, профессор
Панова Елена Владимировна, кандидат технических наук, доцент
Поликутина Елена Сергеевна, кандидат технических наук*

**ТЕПЛОТЕХНИКА.
РЕШЕНИЕ ПРАКТИЧЕСКИХ ЗАДАЧ**

Практикум

Подписано в печать 23.03.2023 г.
Формат 60х90/16. Уч.-изд. л – 2,62. Усл. печ. л. – 5,75.
Тираж по требованию. Заказ 17.

Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение
высшего образования «Дальневосточный государственный аграрный университет»

Отпечатано в отделе оперативной полиграфии
Дальневосточного государственного
аграрного университета
675005, г. Благовещенск, ул. Политехническая, 86