

**ДЕПАРТАМЕНТ ОБРАЗОВАНИЯ АДМИНИСТРАЦИИ
ВЛАДИМИРСКОЙ ОБЛАСТИ
ГБПОУ ВО
«Владимирский химико-механический колледж»**

**Методическое пособие
по теплотехнике**

2017

Рассмотрено на заседании цикловой
комиссии естественно-научных и
общепрофессиональных дисциплин

УТВЕРЖДАЮ

Протокол № _____ от _____

Председатель ЦК _____

Зам. директора по УР _____

М.Н.Чекалова

С.В.Макарова

Составитель:

Зубарев В.С.

преподаватель ГБОУ СПО ВО «ВХМК»

Рецензент:

Николаева О.С.

методист ГБОУ СПО ВО «ВХМК»

Содержание	Стр.
Пояснительная записка	4
1 Параметры состояния рабочего тела	5
2 Законы идеальных газов	11
3 Газовые смеси	18
4 Теплємкость	21
5 Термодинамические процессы	27
6 Круговые процессы – циклы	34
7 Водяной пар и его свойства	37
8 Теплопроводность	45
9 Теплоотдача	49
10 Лучистый теплообмен	54
11 Теплопередача	57
Литература	62

Пояснительная записка

Данное методическое пособие предназначено для помощи студентам и преподавателям специальности 13.02.02 «Теплоснабжение и теплотехническое оборудование» в изучении дисциплины «Теоретические основы гидравлики и теплотехники»

Пособие может быть применено при проведении уроков, практических занятий и самостоятельной работе студентов, в том числе и для задания на дом.

1 Параметры состояния рабочего тела

Рабочее тело – это тело в газообразном состоянии, используемое для производства работы в тепловых машинах. К параметрам состояния рабочего тела в теплотехнике относят абсолютное давление, удельный объем и абсолютную температуру.

Давление – это величина, определяемая отношением силы, действующей на поверхность перпендикулярно к ней, к площади этой поверхности.

$$p = \frac{F}{\omega}, \text{ Па};$$

где:

F – сила, Н;

ω – площадь, м^2 .

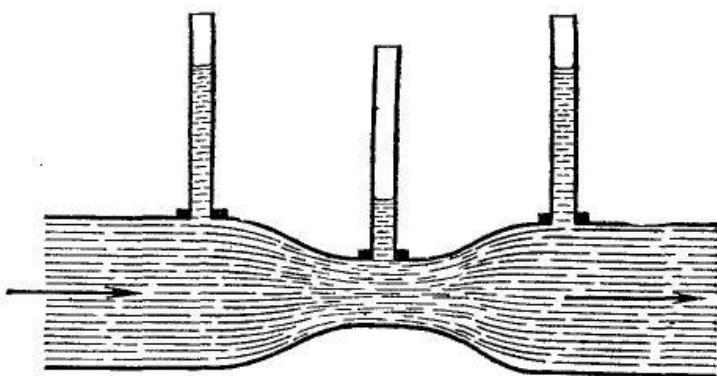
Давление в системе СИ измеряется в паскалях ($\text{Па} = \text{Н}/\text{м}^2$). В расчетах используют также величины, кратные одному паскалю:

$1 \text{ кПа} = 10^3 \text{ Па}$ – килопаскаль;

$1 \text{ МПа} = 10^6 \text{ Па}$ – мегапаскаль;

$1 \text{ ГПа} = 10^9 \text{ Па}$ – гигапаскаль.

Для измерения давления применяют также техническую атмосферу, $1 \text{ ат} = 1 \text{ кгс}/\text{см}^2$, используют также высоту столба жидкости.



Столб жидкости своим весом производит давление:

$$p = \rho g h.$$

Здесь: ρ – плотность жидкости, $\text{кг}/\text{м}^3$; $g = 9,81 \text{ м}/\text{с}^2$ – ускорение свободного падения; h – высота столба жидкости, м.

В расчетах различают атмосферное давление, избыточное (манометрическое) давление и абсолютное давление. За нормальное атмосферное давление принимают давление воздуха на уровне моря при $t = 0^\circ\text{C}$, равное

760 миллиметров ртутного столба (760 мм.рт.ст.=101,3кПа). Термодинамическим параметром служит абсолютное давление p , Па.

Используемые в технике приборы, как правило, измеряют не абсолютное давление, а разность давления в сосуде и давления атмосферного воздуха.

При давлении в сосуде больше атмосферного абсолютное давление равно:

$$p = p_b + p_m .$$

Здесь: p – абсолютное давление, p_b – барометрическое давление, p_m – манометрическое давление.

При давлении в сосуде меньше атмосферного измеряют вакуум, или разрежение и в этом случае абсолютное давление равно:

$$p = p_b - p_v .$$

Здесь: p – абсолютное давление, p_b – барометрическое давление, p_v – вакуумметрическое давление или разрежение.

Соотношение между различными единицами измерения давления приведено в таблице:

Таблица 1.1

Из \ В	атм	мм рт.ст.	м вод.ст.	кгс/см ²	бар	Па	КПа	МПа
1 атм		760,0	10,332	1,033	1,0132	101,325×10 ³	101,325	0,1013
1 мм рт.ст.	1,316×10 ⁻³		13,595×10 ⁻³	1,359×10 ⁻³	1,333×10 ⁻³	133,322	0,1333	0,1333×10 ⁻³
1 м вод.ст.	96,78×10 ⁻³	73,556		0,1	98,07×10 ⁻³	9,807×10 ³	9,807	9,807×10 ⁻³
1 кгс/см ²	0,9678	735,561	10,0		0,9807	98,066×10 ³	98,066	98,066×10 ⁻³
1 бар	0,9869	750,064	10,1972	1,0197		100×10 ³	100	0,1
1 Па	9,869×10 ⁻⁶	7,501×10 ⁻³	101,972×10 ⁻⁶	10,1972×10 ⁻⁶	10×10 ⁻⁶		10 ⁻³	10 ⁻⁶
1 КПа	9,869×10 ⁻³	7,501	101,972×10 ⁻³	10,197×10 ⁻³	10×10 ⁻³	10 ³		10 ⁻³
1 МПа	9,869	7,501×10 ³	101,972	10,197	10	10 ⁶	10 ³	

Температура характеризует внутреннюю энергию тела.

В настоящее время в России широко используются две шкалы:

Международная практическая шкала температур (шкала Цельсия) имеет две точки отсчета: точка таяния льда ($t = 0^{\circ}\text{C}$) и точка кипения воды ($t = 100^{\circ}\text{C}$) при нормальном атмосферном давлении; диапазон между этими точками разбит на 100 равных частей, каждая из частей называется градусом Цельсия 0°C .

Термодинамическая шкала температур (абсолютная шкала температур, шкала Кельвина) имеет одну точку отсчета – тройную точку воды (в тройной точке вода находится одновременно в трех фазовых состояниях льда, воды и пара при $t = 0,01^{\circ}\text{C}$ и $p = 610\text{Па}$). Для измерения абсолютной температуры используется Кельвин, численно равный градусу Цельсия ($\text{K} = 0^{\circ}\text{C}$), начало отсчета температуры 0К – ноль Кельвинов.

Перевод температур из абсолютной в практическую и обратно осуществляется по формулам:

$$t = T - 273,15^{\circ}\text{C};$$

$$T = t + 273,15\text{К}.$$

Удельный объем равен объему единицы массы вещества:

$$v = \frac{V}{m}, \frac{\text{м}^3}{\text{кг}}.$$

Здесь: V – объем, м^3 ; m – масса вещества, кг .

Величина, обратная удельному объему, называется плотностью. Плотность равна массе вещества, содержащегося в единице объема:

$$\rho = \frac{m}{V}, \frac{\text{кг}}{\text{м}^3}.$$

Соотношение между удельным объемом и плотностью

$$\rho \cdot v = 1.$$

Удельный вес – это вес единицы объема вещества:

$$\gamma = g \cdot \rho.$$

Здесь: γ – удельный вес, $\text{Н}/\text{м}^3$, ρ – плотность вещества, $\text{кг}/\text{м}^3$; $g = 9,81\text{м}/\text{с}^2$ – ускорение свободного падения.

Пример 1.1

В сосуде объемом 0,9 м³ содержится 1,5 кг окиси углерода (CO). Определить удельный объем и плотность окиси углерода.

Решение:

1. Удельный объем

$$v = \frac{V}{m} = \frac{0,9}{1,5} = 0,6 \frac{\text{м}^3}{\text{кг}}$$

2. Плотность

$$\rho = \frac{m}{V} = \frac{1}{0,6} = 1,67 \frac{\text{кг}}{\text{м}^3}$$

Ответ: удельный объем окиси углерода $v=0,6\text{м}^3/\text{кг}$, плотность $\rho=1,67\text{кг}/\text{м}^3$.

Пример 1.2

Найти абсолютное давление пара в котле, если манометр показывает $p_m=0,13$ МПа. Атмосферное давление по показаниям ртутного барометра равно $p_b = 730$ мм.рт.ст. (Плотность ртути – 13600 кг/м³.)

Решение:

1. Переведем атмосферное давление из мм.рт.ст. в единицу системы СИ:

$$p_b = \rho_{\text{рт}} g h_{\text{рт}} = 13600 \cdot 9,81 \cdot 0,73 = 97393,7 \text{ Па} = 0,097 \text{ МПа.}$$

2. Вычислим абсолютное давление пара:

$$p = p_b + p_m = 0,097 + 0,13 = 0,227 \text{ МПа.}$$

Ответ: абсолютное давление пара 0,227 МПа.

Задача 1.1

Давление пара в котле составляет $p_m=0,13\text{МПа}$ при показании барометра $p_b = 780$ мм.рт.ст. Определить абсолютное давление пара в котле.

Варианты задачи:

№ варианта	p_m	p_b
2	0,13МПа	780 мм.рт.ст.
3	0,18МПа	770 мм.рт.ст.
4	0,23МПа	760 мм.рт.ст.

5	0,34МПа	750 мм.рт.ст.
6	0,43МПа	740 мм.рт.ст.
7	120кПа	720 мм.рт.ст.
8	0,18МПа	680 мм.рт.ст.
9	0,23МПа	720 мм.рт.ст.
10	0,19МПа	750 мм.рт.ст.
11	130кПа	780 мм.рт.ст.
12	0,2МПа	780 мм.рт.ст.
13	0,18МПа	760 мм.рт.ст.
14	200кПа	720 мм.рт.ст.
15	0,16МПа	790 мм.рт.ст.
16	100кПа	710 мм.рт.ст.
17	0,17МПа	680 мм.рт.ст.
18	220кПа	750 мм.рт.ст.
19	250кПа	680 мм.рт.ст.
20	0,13МПа	710 мм.рт.ст.

Задача 1. 2

Масса газа в баллоне составляет 0,5 кг. Объем баллона 0,35 м³. Определить плотность, удельный вес и удельный объем газа.

Варианты заданий:

№ варианта	Масса газа, кг	Объем баллона, м ³
2	0,5	0,35
3	0,4	0,45
4	0,6	0,33
5	0,2	0,35
6	0,7	0,39
7	0,8	0,45
8	1,5	0,35
9	0,9	0,55
10	1,5	0,54
11	0,56	0,68
12	0,64	0,44
13	0,52	0,55
14	0,64	0,65
15	0,43	0,85
16	2,5	0,32
17	1,5	0,65
18	0,7	0,38
19	0,8	0,45
20	0,9	0,39

Задача 1.3

В пусковом баллоне дизеля вместимостью $0,2 \text{ м}^3$ содержится воздух, плотность которого $2,86 \text{ кг/м}^3$. Определить массу воздуха в баллоне.

Варианты заданий:

№ варианта	Вместимость, м^3	Плотность, кг/м^3
2	0,28	2,86
3	0,12	2,49
4	0,24	1,98
5	0,15	1,65
6	0,22	0,95
7	0,24	0,88
8	0,28	1,05
9	0,22	2,25
10	0,27	2,22
11	0,23	1,95
12	0,16	05
13	0,29	2,45
14	0,11	2,68
15	0,16	2,47
16	0,41	2,19
17	0,29	2,00
18	0,19	3,00
19	0,20	2,94
20	0,16	2,88

Задача 1. 4

Вакуумметр показывает разряжение 80 кПа . Каково абсолютное давление в сосуда, если атмосферное давление по барометру 100 кПа ?

Варианты заданий:

№ варианта	разряжение, кПа	атмосферное давление, кПа
2	80	100
3	75	105
4	90	110
5	55	105
6	76	103
7	100	100
8	25	100
9	45	110
10	56	105
11	79	110
12	90	100
13	95	120
14	35	105
15	45	110

16	60	110
17	90	105
18	70	110
19	80	105
20	45	110

2 Законы идеальных газов

Идеальным называется воображаемый газ, у которого отсутствуют силы сцепления между молекулами, а сами молекулы представляют собой материальные точки, не имеющие объема.

Реальными называют газы, у которых действуют силы взаимодействия между молекулами, и этими силами пренебречь нельзя.

Идеальных газов в природе не существует, однако использование этого понятия значительно упрощает решение задач термодинамики. Законы идеальных газов можно использовать в расчетах для реальных газов, когда участвующее в процессах рабочее тело близко по своему состоянию к идеальному газу, либо для реальных газов с введением соответствующих поправочных коэффициентов, полученных опытным путем.

В XIX веке экспериментально были установлены следующие соотношения между параметрами состояния газов, близких по свойствам к идеальному газу:

- для изобарного процесса (протекающего при постоянном давлении), закон Гей-Люссака:

$$\frac{V}{T} = \text{const};$$

- для изохорного процесса (протекающего при постоянном объеме), закон Шарля:

$$\frac{p}{T} = \text{const};$$

- для изотермического процесса (протекающего при постоянной температуре), закон Бойля-Мариотта:

$$p \cdot V = \text{const}.$$

Ученый Клайперон объединил эти законы и получил уравнение, связывающее между собой все три параметра состояния газа p , V , T . Данное уравнение называют уравнением состояния идеального газа.

Для 1 кг газа уравнение состояния идеального газа имеет вид:

$$p \cdot v = R \cdot T;$$

где:

p – абсолютное давление, Па;

v – удельный объем, м³/кг;

T – абсолютная температура, К;

R – постоянная для данного газа, или газовая постоянная, Дж/кг·К.

Умножив правую и левую части уравнения на массу газа, получим уравнение состояния для газа массой m .

$$p \cdot m \cdot v = m \cdot R \cdot T, \text{ или}$$

$$p \cdot V = m \cdot R \cdot T;$$

где $V = m \cdot v$ – объем газа, м³.

Ниже приведена таблица значений газовой постоянной для разных газов.

Таблица 2.1

Наименование	Химическая формула	Молярная масса г/моль	Газовая постоянная Дж/(кг °С)	Плотность при 0°С и давлении $P_0=101,3 \text{ кПа}$
Кислород	O ₂	32,00	259,8	1,129
Азот	N ₂	28,02	296,7	1,251
Воздух	-	28,96	287,1	1,293
Водяной пар	H ₂ O	18,02	461,5	0,804
Водород	H ₂	2,016	412,4	0,090
Оксид углерода	CO	28,01	297,0	1,250
Двуокись углерода	CO ₂	44,02	188,9	1,977

В системе СИ количество вещества измеряют в молях и киломолях. Один кмоль = 10^3 моль. Киломоль газа равен количеству газа в килограммах, равной молярной массе.

Молярная масса μ – это масса газа в килограммах, равная молекулярной массе. Например, у азота N атомная масса 14, у молекулы N_2 молекулярная масса 28, соответственно кмоль азота равен 28 кг, а молярная масса $\mu_{N_2} = 28 \text{ кг/моль}$.

Масса газа m , выраженная через число киломолей, равна

$$m = n \cdot \mu;$$

где m – масса газа, кг; μ – молярная масса, кг/моль; n – число киломолей, кмоль.

Кроме перечисленных выше законов, газы подчиняются закону Авогадро, который устанавливает, что все газы при одинаковых температурах содержат в одинаковых объемах одно и то же количество молекул. Отсюда следует, что плотность газа прямо пропорциональна его молярной массе:

$$\frac{\rho_1}{\rho_2} = \frac{\mu_1}{\mu_2},$$

или, зная, что $\rho \cdot v = 1$:

$$\frac{v_1}{v_2} = \frac{\mu_1}{\mu_2},$$

откуда следует:

$$\mu_1 \cdot v_1 = \mu_2 \cdot v_2 = \mu \cdot v = V_\mu = \text{const},$$

где V_μ – объем киломоля, $\text{м}^3/\text{моль}$.

Таким образом, для всех идеальных газов при одинаковых температурах T и давлениях p объем одного киломоля одинаков.

При нормальных условиях ($p = 760 \text{ мм.рт.ст.} = 101,3 \text{ кПа}$ и $T = 273,15 \text{ К}$) объем одного киломоля любого газа равен $22,4 \text{ м}^3$.

Д.И. Менделеев для μ кг идеального газа (одного киломоля) получил универсальное уравнение состояния:

$$p \cdot \mu \cdot v = \mu \cdot R \cdot T \quad \text{или}$$

$$p \cdot V_\mu = R_\mu \cdot T,$$

где

$V_\mu = \mu \cdot v$ – объем одного киломоля, м³/моль;

$R_\mu = \mu \cdot R = 8314,3 \text{ Дж}/(\text{кмоль} \cdot \text{К})$ – универсальная газовая постоянная.

Пример 2.1

Воздух объемом 0,5 м³ находится при температуре 120⁰С. Подключенный к сосуду вакуумметр показывает разряжение 700 мм.вод.ст. при барометрическом давлении 750 мм.рт.ст. Определить массу газа в сосуде.

Решение:

1. Абсолютное давление в сосуде:

$$p = p_{\text{бар}} - p_{\text{вак}} = \rho_{\text{рт}} g h_{\text{рт}} - \rho_{\text{воз}} g h_{\text{воз}} = \\ 13600 \cdot 9,81 \cdot 0,75 - 1000 \cdot 9,81 \cdot 0,7 = 92797 \text{ Па.}$$

2. Абсолютная температура воздуха:

$$T = t + 273,15 = 120 + 273,15 = 393,15 \text{ К.}$$

3. Молекулярная масса воздуха (см. табл.2) = 28,96

4. Газовая постоянная воздуха

$$R = \frac{R_\mu}{\mu} = \frac{8314}{28,96} = 287,09 \text{ Дж/кг} \cdot \text{К}$$

5. Из уравнения состояния идеального газа $p \cdot V = m \cdot R \cdot T$ выразим:

$$m = \frac{p \cdot V}{R \cdot T}.$$

6. Подставим в формулу значения и получим:

$$m = \frac{92797 \cdot 0,5}{287,03 \cdot 393,15} = 0,41 \text{ кг}$$

Ответ: масса газа в сосуде равна 0,41 кг.

Пример 2.2

Какой объем займет кислород при температуре 150⁰С и давлении 0,3 МПа, если при нормальных условиях он занимает 4 м³?

Решение:

1. Нормальные условия – это $p = 760 \text{ мм.рт.ст.}$ и $t = 0^0\text{С.}$

2. Из уравнения Клайперона $p \cdot V = m \cdot R \cdot T$, зная, что масса газа при изменении температуры и давления не изменяется, можно записать равенство

$$m = \frac{p_1 V_1}{RT_1} = \frac{p_{н.у.} V_{н.у.}}{RT_{н.у.}},$$

3. Отсюда выведем значение V_1 :

$$V_1 = \frac{T_1 \cdot p_{н.у.} \cdot V_{н.у.}}{T_{н.у.} \cdot p_1}. \quad (1)$$

4. Абсолютное давление:

$$p_{н.у.} = \rho_{рт} g h_{рт} = 13600 \cdot 9,81 \cdot 0,76 = 101496 \text{ Па} = 1,013 \cdot 10^5 \text{ Па};$$

$$p_1 = 0,3 \text{ МПа} = 0,3 \cdot 10^5 \text{ Па};$$

5. Абсолютная температура:

$$T_{н.у.} = 273,15 \text{ К};$$

$$T_1 = 150 + 273,15 = 423,15 \text{ К}.$$

6. Подставим значения $T_{н.у.}$, $p_{н.у.}$, T_1 , p_1 в формулу (1) и получим:

$$V_1 = \frac{423,15 \cdot 1,013 \cdot 10^5 \cdot 4}{0,3 \cdot 10^5 \cdot 273,15} = 2,09 \text{ м}^3$$

Ответ: кислород займет объем 2,09 м³.

Задача 2.1

Определить давление, при котором 5 кг азота занимают объем 2 м³, если температура азота равна 70°C.

Варианты заданий:

№ варианта	Масса, кг	Объем, м ³	Температура, °C
2	4	1,8	80
3	3	1,9	90
4	6	3,0	100
5	7	2,1	85
6	3	1,6	95
7	6	2,1	75
8	5	1,9	95
9	8	1,6	100

10	5	1,8	75
11	6	2,1	90
12	7	1,9	100
13	3	1,6	85
14	6	1,8	95
15	5	2,1	75
16	8	1,9	90
17	6	1,6	100
18	7	1,8	85
19	3	2,1	95
20	6	1,9	75

Задача 2.2

Объем воздуха при давлении 0,6МПа и температуре 100⁰С составляет 3м³. Какой объем займет воздух при нормальных физических условиях?

Варианты заданий:

№ варианта	Давление, МПа	Температура, ⁰ С	Объем, м ³
2	0,7	110	3,1
3	0,8	120	3,3
4	0,7	130	4
5	0,6	110	3,5
6	0,8	100	3,1
7	0,7	110	3,3
8	0,8	120	4
9	0,7	130	3,5
10	0,6	110	3,1
11	0,8	110	110
12	0,7	120	120
13	0,6	130	130
14	0,8	110	110
15	0,8	110	110
16	0,7	120	120
17	0,6	130	130
18	0,8	110	110
19	0,8	110	110
20	0,7	120	120

Задача 2.3

Определить плотность водорода, если он находится в при температуре 500⁰С, а его избыточное давление составляет 50 см.вод.ст. при барометрическом давлении 760 мм.рт.ст.

Варианты заданий:

№	Избыточное давление,	Барометрическое	Температура,
---	----------------------	-----------------	--------------

варианта	м. вод.ст.	давление, мм.рт.ст.	°C
2	0,6	730	500
3	0,7	740	450
4	0,8	750	400
5	0,5	760	550
6	0,6	770	600
7	0,7	780	500
8	0,6	730	450
9	0,7	740	400
10	0,8	750	550
11	0,7	780	500
12	0,8	730	450
13	0,5	740	400
14	0,6	750	550
15	0,7	780	500
16	0,8	730	450
17	0,5	740	400
18	0,6	750	550
19	0,7	780	500
20	0,8	730	450

Задача 2.4

В цилиндре с подвижным поршнем находится $0,2\text{ м}^3$ воздуха при давлении $0,1\text{ МПа}$ при температуре 35°C . Как должен измениться объем, чтобы при повышении давления до $0,2\text{ МПа}$ температура воздуха не изменилась?

Варианты заданий:

№ варианта	Объем, м ³	Начальное давление, кПа	Конечное давление, МПа
2	0,15	150	0,22
3	0,17	155	0,25
4	0,175	160	0,3
5	0,21	170	0,22
6	0,22	180	0,3
7	0,25	90	0,15
8	0,25	100	0,22
9	0,15	150	0,25
10	0,17	155	0,3
11	0,17	160	0,22
12	0,175	170	0,3
13	0,21	180	0,15
14	0,22	90	0,22
15	0,17	160	0,25
16	0,175	170	0,22
17	0,21	180	0,3
18	0,22	90	0,15
19	0,21	150	0,22
20	0,22	155	0,25

3 Газовые смеси.

Газовая смесь – это механическая смесь газов, каждый из которых подчиняется законам для идеальных газов. В смеси они не вступают в химические реакции.

Газовой смесью кислорода, азота и углекислого газа является атмосферный воздух. Газовыми смесями являются продукты сгорания топлива в топках паровых котлов, двигателях внутреннего сгорания, газовых турбинах. В эти смеси входят азот, углекислый газ, сернистый газ, пары воды и кислород.

Состав газовых смесей определяется количеством каждого из газов, входящих в смесь, задаваемых массовыми или объемными долями.

Массовые доли компонентов g_i определяются по формулам:

$$g_1 = \frac{m_1}{m_1} ; \quad g_2 = \frac{m_2}{m_2} ; \quad \dots \quad g_i = \frac{m_i}{m_{\text{см}}} ;$$

где:

$m_1, m_2, \dots m_i$, - масса отдельных компонентов смеси;

$m_{\text{см}}$ - масса смеси.

Молекулы каждого газа, входящего в смесь, равномерно распределены по всему объему смеси и занимают такой же объем, как и вся смесь. Для установления объемной доли компонента вводится понятие парциального объема компонента. Парциальным объемом компонента называют объем, который он занимал бы при температуре и давлении смеси.

Объемная доля каждого компонента газовой смеси r_i равна отношению его парциального объема к объему всей смеси.

$$r_1 = \frac{V_1}{V_1} ; \quad r_2 = \frac{V_2}{V_2} ; \quad \dots \quad r_i = \frac{V_i}{V_{\text{см}}} ;$$

где:

V_1, V_2, V_i - парциальные объемы,

$V_{\text{см}} = V_1, V_2, V_i$ – объем всей смеси.

Объемная доля компонента может быть определена, если известна массовая доля и молекулярная масса компонента и смеси:

$$r_i = \frac{g_i/\mu_i}{\mu} = \frac{g_i/\mu_i}{\sum g_i/\mu_i}.$$

Каждый из газов, образующих смесь, оказывает на стенки некоторое давление, называемое парциальным давлением. Занимая объем, равный объему смеси, каждый из газов, составляющих смесь, находится под своим парциальным давлением и имеет температуру смеси.

Давление смеси по закону Дальтона равно сумме парциальных давлений.

$$P_{\text{см}} = P_1 + P_2 + \dots + P_n.$$

Пример 3.1

Определить парциальные давления кислорода и азота в воздухе при нормальных условиях $P = 101,3 \text{ кПа}$, если массовый состав воздуха $g_{O_2} = 23,3\%$ и $g_{N_2} = 76,6\%$.

Решение.

1. Из таблицы 2 находим молекулярные массы $\mu_{O_2} = 32$ и $\mu_{N_2} = 28$.
2. Объемная доля компонента смеси определяется по формуле:

$$r_i = \frac{g_i/\mu_i}{\mu} = \frac{g_i/\mu_i}{\sum g_i/\mu_i};$$

тогда объемная доля кислорода:

$$r_{O_2} = \frac{\frac{g_{O_2}}{\mu_{O_2}}}{\frac{g_{O_2}}{\mu_{O_2}} + \frac{g_{N_2}}{\mu_{N_2}}} = \frac{\frac{0,233}{32}}{\frac{0,233}{32} + \frac{0,767}{28}} = 0,21.$$

3. Так как $r_{O_2} + r_{N_2} = 1$, то объемная доля азота:

$$r_{N_2} = 1 - r_{O_2} = 1 - 0,21 = 0,79.$$

4. Парциальные давления компонентов определяются по формуле:

$$P = P \cdot r_i;$$

тогда парциальное давление кислорода:

$$P_{O_2} = 101,3 \cdot 0,21 = 21,3 \text{ кПа},$$

и парциальное давление азота:

$$P_{N_2} = 101,3 \cdot 0,79 = 80 \text{ кПа}.$$

Ответ: парциальные давления кислорода и азота в смеси газов равны $P_{O_2} = 21,3 \text{ кПа}$ и $P_{N_2} = 80 \text{ кПа}$.

Задача 3.1

Имеется смесь, состоящая из углекислого газа массой 6кг и азота 2кг. Найти массовые доли компонентов смеси.

Варианты заданий:

Номер варианта	Масса CO ₂ , кг	Масса N ₂ , кг
2	5	3
3	7	6
4	8	5
5	9	8
6	4	5
7	5	4
8	7	9
9	3	8
10	8	5
11	7	3
12	8	6
13	9	5
14	4	8
15	5	5
16	7	3
17	8	6
18	9	5
19	4	8
20	5	5

Задача 3.2

Найти массу продуктов сгорания топлива в килограммах, если смесь задана количеством отдельных компонентов: CO₂=789 моль, H₂O=67,54 моль, O₂=96,2 моль, N₂=787,3 моль.

Варианты заданий:

Номер варианта	Количество CO_2 , моль	Количество H_2O , моль	Количество O_2 , моль	Количество N_2 , моль
2	750	65	100	800
3	700	70	95	700
4	730	78	98	600
5	750	58	56	650
6	700	70	80	750
7	710	76	94	800
8	720	59	86	700
9	730	66	75	580
10	740	70	86	700
11	700	65	65	800
12	710	70	70	700
13	720	78	78	600
14	730	58	58	650
15	740	70	70	750
16	700	65	65	800
17	710	70	70	700
18	720	78	78	600
19	730	58	58	650
20	740	70	70	750

4 Теплоемкость

Термин "теплоемкость" обозначает способность тела расходовать внешнюю тепловую энергию для повышения внутренней кинетической энергии собственных молекул, т. е. повышать температуру при подводе тепла извне.

$$C = \frac{dQ}{dT},$$

где:

C , – теплоемкость вещества, Дж/К;

dQ – элементарное приращение тепла, Дж;

dT – элементарное изменение температуры, К.

Различают среднюю и истинную теплоемкость. Истинной теплоемкостью называется отношение бесконечно малого приращения тепла, подведенного к телу при данной температуре, к изменению температуры, которое при этом наблюдается (формула приведена выше). Средней теплоемкостью C_m называется отношение количества тепла q , подведенного или отведенного в термодинамическом процессе, к изменению темпера-

туры газа от t_1 до t_2 . На практике обычно используют значения средней теплоемкости в определенном интервале температур.

Удельной теплоемкостью называется количество теплоты, которое необходимо сообщить единице количества вещества для изменения его температуры на один градус. В зависимости от выбранной единицы количества вещества теплоемкости могут быть массовые, объемные и молярные:

- массовая теплоемкость: $c = C/m$, Дж/(кг·К);
- объемная теплоемкость: $c' = C/V$, Дж/(м³·К);
- молярная теплоемкость: $\mu c = C/n$, Дж/(кмоль·К). Примечание: Для обозначения молярной теплоемкости используют также символ c_μ .

Удельные теплоемкости связаны между собой зависимостями:

$$c = \frac{c'}{\rho} = \frac{c_\mu}{\mu}.$$

Здесь ρ – плотность вещества, μ – молярная масса.

Теплоемкость зависит от условий, в которых к телу подводится тепло. В термодинамических расчетах используют удельные теплоемкости в процессах, происходящих при постоянном давлении c_v (удельная изохорная теплоемкость) и при постоянном объеме c_p (удельная изобарная теплоемкость).

Изобарная и изохорная теплоемкости идеальных газов связаны уравнением Майера:

$$c_p - c_v = R \quad \text{или} \quad \mu c_p - \mu c_v = R_\mu$$

Теплоемкость реальных газов зависит от температуры и давления. Её величины были найдены экспериментально и помещены в справочники.

Выдержки из таблиц приведены ниже.

При отсутствии в таблицах нужного значения аргумента (температуры) для нахождения теплоемкости применяют формулу линейной интерполяции:

$$y = y_1 + \frac{(x - x_1)(y_2 - y_1)}{x_2 - x_1},$$

где:

y – искомое значение функции (теплоемкости) внутри интервала;

x – заданное значение аргумента (температуры) внутри интервала;

y_1, y_2 – значение функции (теплоемкости) на границах интервала температур;

x_1, x_2 – значение аргумента (температуры) на границах интервала температур.

Для интерполяции теплоемкости по табличным данным приведенная выше формула примет вид:

$$c = c_1 + \frac{(t - t_1)(c_2 - c_1)}{t_2 - t_1}.$$

Пример 4.1

По табличным данным определить среднюю массовую изобарную теплоемкость c_{pm} окиси углерода (CO) при температуре 1200°C.

Решение:

1. по таблице 4.1 определяем теплоемкость для CO при 1200°C $c_{pm} = 1,1493$ кДж/(кг·К).

Ответ: средняя массовая изобарная теплоемкость окиси углерода при температуре 1200°C равна 1,1493 кДж/(кг·К).

Пример 4.2

По табличным данным определить среднюю объемную изохорную теплоемкость азота c'_{vm} при температуре 1240°C.

Решение:

1. В таблице 4.4 значение температуры $t=1240^\circ\text{C}$ находится внутри интервала $t_1=1200^\circ\text{C}$ и $t_2=1300^\circ\text{C}$. Необходимо применить формулу интерполяции:

$$c = c_1 + \frac{(t - t_1)(c_2 - c_1)}{t_2 - t_1},$$

где: $t_1=1200$; $t_2=1300$ – значения функции (температуры) на границах интервала;

Таблица 4.1 Средняя массовая изобарная теплоемкость газов
(при постоянном давлении) от 0°С до 1300°С c_{pm} , кДж/(кг·К).

$t, ^\circ\text{C}$	O ₂	N ₂	CO	CO ₂	H ₂ O	Воздух
0	0,9148	1,0392	1,0396	0,8148	1,8594	1,0036
100	0,9232	1,0404	1,0417	0,8658	1,8728	1,0061
200	0,9353	1,0434	1,0463	0,9102	1,8937	1,0115
300	0,9500	1,0488	1,0538	0,9487	1,9192	1,0191
400	0,9651	1,0567	1,0634	0,9877	1,9477	1,0283
500	0,9793	1,0660	1,0748	1,0128	1,9778	1,0387
600	0,9927	1,0760	1,0861	1,0396	2,0092	1,0496
700	1,0048	1,0869	1,0978	1,0639	2,0419	1,0605
800	1,0157	1,0974	1,1091	1,0852	2,0754	1,0710
900	1,0258	1,1078	1,1200	1,1045	2,1097	1,0815
1000	1,0350	1,1179	1,1304	1,1225	2,1436	1,0907
1100	1,0434	1,1271	1,1401	1,1384	2,1771	1,0999
1200	1,0509	1,1359	1,1493	1,1530	2,2106	1,1082
1300	1,0580	1,1447	1,1577	1,1660	2,2429	1,1166

Таблица 4.2 Средняя массовая изохорная теплоемкость газов
(при постоянном объеме) от 0°С до 1400°С c_{vm} , кДж/(кг·К).

$t, ^\circ\text{C}$	O ₂	N ₂	CO	CO ₂	H ₂ O	Воздух
0	0,6548	0,7423	0,7437	0,6259	1,3980	0,7164
100	0,6632	0,7427	0,7448	0,6770	1,4114	0,7193
200	0,6753	0,7465	0,7494	0,7214	1,4323	0,7243
300	0,6900	0,7519	0,7570	0,7593	1,4574	0,7319
400	0,7051	0,7599	0,7666	0,7938	1,4863	0,7415
500	0,7193	0,7691	0,7775	0,8240	1,5160	0,7519
600	0,7327	0,7792	0,7892	0,8508	1,5474	0,7624
700	0,7448	0,7900	0,8009	0,8646	1,5805	0,7733
800	0,7557	0,8005	0,8122	0,8964	1,6140	0,7842
900	0,7658	0,8110	0,8231	0,9157	1,6483	0,7942
1000	0,7750	0,8210	0,8336	0,9332	1,8823	0,8039
1100	0,7834	0,8302	0,8432	0,9496	1,7158	0,8127
1200	0,7913	0,8395	0,8566	0,9638	1,7488	0,8215
1300	0,7984	0,8478	0,8608	0,9772	1,7815	0,8294
1400	0,8051	0,8558	0,8688	0,9893	1,8129	0,8369

Таблица 4.3 Средняя объемная изобарная теплоемкость газов
(при постоянном давлении) от 0°С до 1400°С c'_{pm} , кДж/(кг·К).

$t, ^\circ\text{C}$	O ₂	N ₂	CO	CO ₂	H ₂ O
0	1,3059	1,2981	1,2992	1,5998	1,4930
100	1,3176	1,3004	1,3017	1,7003	1,5052
200	1,3352	1,3038	1,3071	1,7873	1,5223
300	1,3561	1,3109	1,3167	1,8627	1,5424
400	1,3775	1,3205	1,3289	1,9297	1,5654
500	1,3980	1,3322	1,3427	1,9887	1,5897
600	1,4168	1,3452	1,3574	2,0411	1,6148
700	1,4344	1,3586	1,3720	2,0884	1,6412
800	1,4499	1,3716	1,3862	2,1311	1,6680
900	1,4645	1,3845	1,3996	2,1692	1,6957
1000	1,4775	1,3971	1,4126	2,2055	1,7229
1100	1,4892	1,4086	1,4248	2,2349	1,7501
1200	1,5005	1,4202	1,4361	2,2638	1,7769
1300	1,5106	1,4306	1,4465	2,2898	1,8028
1400	1, 5202	1,4407	1,4566	2,3136	1,8280

Таблица 4.4 Средняя объемная изохорная теплоемкость газов
(при постоянном объеме) от 0°С до 1400°С c'_{vm} , кДж/(кг·К).

$t, ^\circ\text{C}$	O ₂	N ₂	CO	CO ₂	H ₂ O	Воздух
0	0,9349	0,9278	0,9282	1,2288	1,1237	0,9261
100	0,9466	0,9295	0,9307	1,3293	1,1342	0,9295
200	0,9642	0,9328	0,9362	1,4164	1,1514	0,9362
300	0,9852	0,9399	0,9458	1,4918	1,1715	0,9462
400	1,0065	0,9496	0,9579	1,5587	1,1945	0,9579
500	1,0270	0,9613	0,9718	1,6278	1,2188	0,9718
600	1,0459	0,9743	0,9864	1,6701	1,2439	0,9856
700	1,0634	0,9877	1,0011	1,7174	1,2703	0,9993
800	1,0789	1,0006	1,0153	1,7601	1,2971	1,0312
900	1,0936	1,0136	1,0287	1,7982	1,3247	1,0262
1000	1,1066	1,0178	1,0417	1,8326	1,3519	1,0387
1100	1,1183	1,0379	1,0538	1,8640	1,3791	1,0505
1200	1,1296	1,0492	1,0651	1,8929	1,4059	1,0618
1300	1,1396	1,0597	1,0756	1,9188	1,4319	1,0722
1400	1,1493	1,0697	1,0856	1,9427	1,4570	1,0819
1500	1,1585	1,0789	1,0948	1,9644	1,4817	1,0911
1600	1,1669	1,0877	1,1036	1,9845	1,5052	1,0999
1700	1,1752	1,0961	1,1116	2,0034	1,5286	1,1078
1800	1,1832	1,1036	1,1191	2,0205	1,5504	1,1158
1900	1,1907	1,1112	1,1262	2,0356	1,5713	1,1229
2000	1,1978	1,1179	1,1329	2,0511	1,5918	1,1296

$c_1=1,0492$; $c_2=1,0597$ – значения аргумента (теплоемкости азота N_2) на границах интервала.

2. По формуле интерполяции определяем:

$$c = 1,0492 + \frac{(1240 - 1200)(1,0597 - 1,0492)}{1300 - 1200} = 1,045.$$

Ответ: средняя объемная изохорная теплоемкость азота при температуре 1240 °С равна 1,045 кДж/(кг·К).

Пример 3.

По табличным данным определить среднюю объёмную изобарную теплоемкость смеси газов c'_{pm} при 300°С. Состав смеси: 14,5% углекислого газа; 6,5 % кислорода, 79% азота.

Решение:

1. По таблице 4.3 при 300°С

– углекислый газ: $c'_{pmCO_2} = 1,8627$ кДж/(кг·К).

– кислород: $c'_{pmO_2} = 1,3561$ кДж/(кг·К).

– азот: $c'_{pmN_2} = 1,3109$ кДж/(кг·К).

2. Средняя объемная изобарная теплоемкость смеси газов

$$c'_{pm см} = \sum \Gamma_i \cdot c'_{pm i}.$$

$$c'_{pm см} = 0,145 \cdot 1,8627 + 0,065 \cdot 1,3561 + 0,79 \cdot 1,3109 = 1,394 \text{ кДж/(кг·К)}.$$

Ответ: Объемная изобарная теплоемкость смеси газов равна 1,394 кДж/(кг·К).

Задача 4.1

Определить табличное значение средней массовой изохорной теплоемкости окиси углерода при 540°С.

Варианты заданий:

Номер варианта	Газ	Температура
2	Кислород	330
3	Азот	460
4	Углекислый газ	590
5	Водяной пар	640
6	Двуокись углерода	670
7	Азот	550
8	Углекислый газ	410

9	Кислород	690
10	Азот	740
11	Двуокись углерода	670
12	Азот	550
13	Углекислый газ	410
14	Кислород	690
15	Двуокись углерода	740
16	Азот	670
17	Углекислый газ	550
18	Кислород	410
19	Азот	690
20	Двуокись углерода	740

Задача 4.2

По таблицам определить среднюю объёмную изохорную теплоемкость смеси газов при 500°C. Состав смеси: 14,5% углекислого газа; 6,5 % кислорода, 70% азота, остальное – водяной пар.

Варианты заданий:

Номер варианта	Состав смеси газов, %				Температура
	CO ₂	O ₂	N ₂	H ₂ O	
2	14	6	67	Остальное	400
3	15	5	78	Остальное	600
4	16	5	56	Остальное	700
5	17	8	48	Остальное	800
6	18	4	72	Остальное	600
7	19	9	70	Остальное	450
8	13	6	75	Остальное	550
9	12	3	78	Остальное	600
10	11	7	67	Остальное	500
11	18	6	48	Остальное	450
12	19	7	72	Остальное	550
13	13	5	70	Остальное	600
14	12	8	48	Остальное	500
15	11	4	72	Остальное	450
16	18	6	70	Остальное	550
17	19	7	48	Остальное	600
18	13	5	72	Остальное	500
19	12	8	70	Остальное	450
20	11	4	74	Остальное	550

5 Термодинамические процессы

Термодинамическим процессом называют изменение состояния системы, в результате которого хотя бы один из ее параметров (температура T , объем v или давление p) изменяет свое значение. Поскольку все пара-

метры термодинамической системы неразрывно взаимосвязаны, то изменение любого из них неизбежно влечет изменение хотя бы одного или нескольких параметров.

Изучение термодинамического процесса заключается в определении работы A , совершенной рабочим телом в данном процессе и изменения его внутренней энергии Δu при подводе и отводе теплоты q .

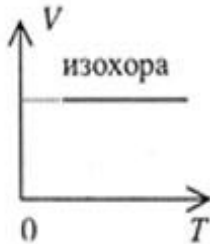
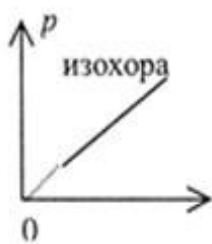
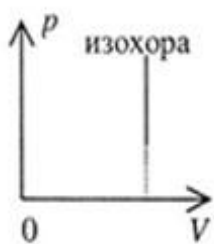
Из всех термодинамических процессов рассмотрим изохорный, изобарный, изотермический и адиабатный процессы.

Изохорным называют термодинамический процесс, протекающий при постоянном объеме. Такой процесс может совершаться при нагревании газа, помещенного в закрытый сосуд. Газ в результате подвода теплоты нагревается, и его давление возрастает.

Изменение параметров газа в изохорном процессе описывает закон Шарля: давление газа на стенки сосуда прямо пропорционально абсолютной температуре газа.

$$\frac{p_1}{T_1} = \frac{p_2}{T_2} \text{ или, в общем случае } \frac{p}{T} = \text{const.}$$

Так как в изохорном процессе изменение объема равно нулю, никакая работа в изохорном процессе не совершается, а вся подведенная к газу теплота расходуется на изменение внутренней энергии газа



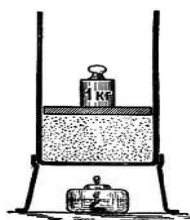
В изохорном процессе

$$A = 0;$$

$$q = \Delta u;$$

Повышение внутренней энергии рабочего тела в изобарном процессе равно произведению удельной массовой теплоемкости при постоянном объеме на разность абсолютных температур рабочего тела:

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



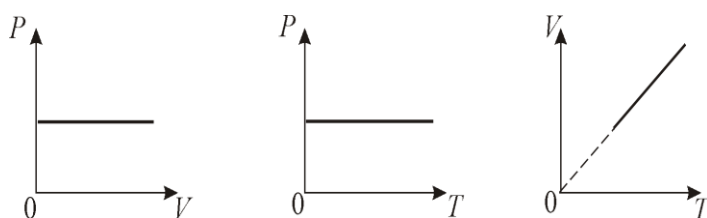
Изобарным называют термодинамический процесс, протекающий при постоянном давлении. Такой процесс можно осуществить, поместив газ в плотный цилиндр с подвижным поршнем, на который действует посто-

янная внешняя сила при отводе и подводе теплоты. При изменении температуры газа поршень перемещается в ту или иную сторону, давление же под поршнем остается неизменным.

Изменение параметров газа в изохорном процессе описывает закон Гей-Люссака: объем занимаемый газом, прямо пропорционален температуре.

$$\frac{V_1}{T_1} = \frac{V_2}{T_2} \text{ или, в общем случае } \frac{V}{T} = \text{const.}$$

Изменение температуры в этом процессе говорит об изменении внутренней энергии газа, а изменение объема связано с выполнением работы, т. е. в изобарном процессе часть тепловой энергии тратится на изменение внутренней энергии газа, а другая часть – на выполнение газом работы по преодолению действия внешних сил.



Изменение внутренней энергии газа в изобарном процессе равно произведению удельной массовой теплоемкости при постоянном объеме на

разность абсолютных температур газа в конце и начале процесса:

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

Работа в изобарном процессе равна:

$$A = p(v_2 - v_1).$$

Работа в изобарном процессе для единицы массы газа можно также определить как произведение газовой постоянной на разность абсолютных температур:

$$A = R(T_2 - T_1).$$

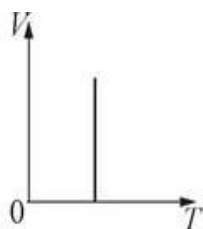
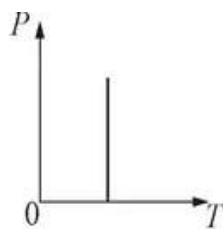
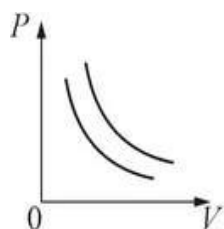
Тепло, подведенное в изобарном процессе равно произведению удельной массовой теплоемкости при постоянном объеме на разность абсолютных температур:

$$q = c_p \cdot (T_2 - T_1) = \Delta u + A.$$

Изотермическим называют термодинамический процесс, протекающий при неизменной температуре.

Практически осуществить изотермический процесс с газом очень трудно, ведь необходимо, чтобы в процессе сжатия или расширения газ успевал обмениваться теплом с окружающей средой, поддерживая собственную температуру постоянной.

Изменение параметров газа в изотермическом процессе описывает



закон Бойля-Мариотта: при постоянной температуре величина давления газа обратно пропорциональна его объему:

$$p \cdot v = \text{const.}$$

Очевидно, что при изотермическом процессе внутренняя энергия газа не изменяется, поскольку его температура постоянна:

$$\Delta u = 0.$$

Тепло, подведенное в изотермической процессе, полностью эквивалентно работе, затраченной на сжатие:

$$dq = dA = p dv.$$

Работа единицы массы газа при изотермическом процессе равна произведению газовой постоянной на абсолютную температуру цикла, помноженного на натуральный логарифм отношения давлений в начале и конце цикла.

$$A = RT \ln \frac{p_1}{p_2}.$$

Адиабатным называют термодинамический процесс, протекающий без теплообмена рабочего тела с окружающей средой. Осуществить на практике адиабатный процесс очень сложно. Такой процесс может протекать с рабочим телом, помещенным в сосуд со 100% теплоизолирующими свойствами. Тем не менее, многие термодинамические процессы, осуществляемые в теплотехнике, протекают настолько быстро, что рабочее тело и среда не успевают обмениваться теплотой, поэтому с некоторой степенью погрешности такие процессы можно рассматривать как адиабатные.

Уравнение адиабатного процесса:

$$pv^k = \text{const},$$

где $k = \frac{c_p}{c_v}$ – показатель адиабаты, равный отношению теплоемкости тела при постоянном объеме к теплоемкости при постоянном давлении. В расчетах принимают для одноатомных газов $k=1,67$, двухатомных - $k=1,4$, многоатомных - $k=1,3$.

В адиабатном процессе тепло к газу не подводится, при этом:

$$dq=du + dA= 0, \text{ откуда}$$

$$dA = - du;$$

то есть, работа в адиабатном процессе совершается только за счет уменьшения внутренней энергии газа.

Работа в адиабатном процессе для единицы массы рабочего тела подсчитывается по формуле:

$$A = R \frac{T_1 - T_2}{k - 1}.$$

Пример 5.1

Определить работу, необходимую для сжатия 2кг воздуха в компрессоре при постоянной температуре 200°С от давления $p_1=0,1\text{МПа}$ до давления $p_2=2,5\text{МПа}$.

Решение:

1. Работа, совершенная единицей массы рабочего тела в изотермическом процессе равна:

$$A = RT \ln \frac{p_1}{p_2},$$

2. Величину газовой постоянной воздуха находим в таблице 2.1:

$$R=287,1 \text{ Дж}/(\text{кг}\cdot\text{К}).$$

3. Абсолютная температура изотермического процесса равна:

$$200^\circ\text{C}+273=473 \text{ К}.$$

4. Тогда работа сжатия 2 кг воздуха:

$$A = 2RT \ln \frac{p_1}{p_2} = 2 \cdot 287,1 \cdot 473 \cdot \ln \frac{0,1}{2,5} = -874000 \text{ Дж} = -874 \text{ кДж}$$

5. Знак минус указывает, что работа совершалась внешними силами над рабочим телом.

Ответ: для сжатия воздуха нужно совершить работу 844кДж.

Пример 5.2.

Десять килограммов водяного пара, адиабатно расширяясь в паровой турбине, остывают с 400⁰С до 150⁰С. Определить работу, совершенную паром и мощность, переданную турбине, если расширение происходило в течение 1 минуты.

Решение:

1. Работа единицы массы газа в адиабатном процессе равна

$$A = R \frac{T_1 - T_2}{k - 1}.$$

2. Газовую постоянную водяного пара находим в таблице 2.1:

$$R=461,5 \text{ Дж}/(\text{кг}\cdot\text{К}).$$

3. Абсолютные температуры пара до и после расширения

$$t_1=400+273=673\text{K}, t_2=150+273=423\text{K}.$$

4. Пар – это трехатомный газ H₂O, поэтому показатель адиабаты принимаем

$$k=1,3.$$

5. Работа 10 кг пара:

$$A = 10 \cdot R \frac{T_1 - T_2}{k - 1} = 10 \cdot 461,4 \frac{673 - 423}{1,3 - 1} = 3\,845\,000 \text{ Дж} = 3\,845 \text{ кДж}.$$

6. Мощность - это работа, совершенная в единицу времени:

$$N = \frac{A}{t} = \frac{3845}{60} = 64 \text{ кВт}.$$

Ответ: пар, расширяясь в паровой турбине, совершает работу 3845 кДж и передает мощность 64 кВт.

Задача 5.1

Газ, остывая в закрытом сосуде, изменяет температуру с $t_1=600\text{K}$ до $t_2=300\text{K}$. Определить работу, совершенную газом при остывании. Результат объяснить письменно.

Номер варианта	t_1, K	t_2, K
2	620	320
3	640	330
4	660	340
5	680	350
6	700	320
7	620	330
8	640	340
9	660	350
10	680	320
11	700	330
12	620	340
13	640	350
14	660	320
15	680	330
16	700	340
17	620	350
18	640	320
19	660	330
20	680	340

Задача 5.2

Азот массой 0,5 кг расширяется при постоянном давлении $p=0,3\text{МПа}$ от с повышением температуры от $t_1=100^\circ\text{C}$ до $t_2=300^\circ\text{C}$. Определить совершенную газом работу и подведенную к нему теплоту. Величины газовой постоянной газа и изобарной теплоемкости взять из соответствующих таблиц настоящего пособия (среднюю теплоемкость вычислить как среднее арифметическое теплоемкостей на границах интервала температур).

Варианты заданий:

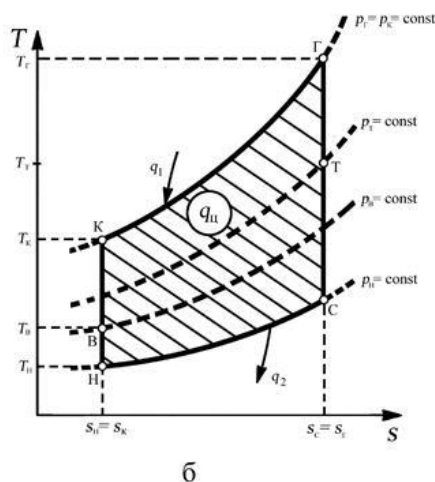
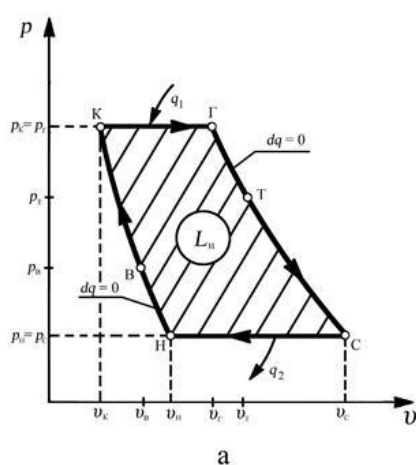
Номер варианта	Газ	$t_1, ^\circ\text{C}$	$t_2, ^\circ\text{C}$	$p, \text{МПа}$
2	Воздух	110	320	0,4
3	Углекислый газ	120	340	0,5
4	Водяной пар	130	360	0,6
5	Азот	140	380	0,7
6	Воздух	110	320	0,8
7	Углекислый газ	120	340	0,4
8	Водяной пар	130	360	0,5
9	Азот	140	380	0,6
10	Воздух	110	320	0,7
11	Углекислый газ	120	340	0,8

12	Водяной пар	130	360	0,4
13	Азот	140	380	0,5
14	Воздух	110	320	0,6
15	Углекислый газ	120	340	0,7
16	Водяной пар	130	360	0,8
17	Азот	140	380	0,4
18	Воздух	110	320	0,5
19	Углекислый газ	120	340	0,6
20	Водяной пар	130	360	0,7

6 Круговые процессы - циклы

Термодинамический процесс, в котором рабочее тело, пройдя ряд состояний, возвращается в первоначальное состояние, называется циклом. При рассмотрении цикла условно считается, что рабочее тело не изменяет химического состава, тепло подводится из внешнего источника и отводится к внешнему приемнику.

В тепловом двигателе, за счет подведенного тепла, рабочее тело, расширяясь, совершает полезную работу. Для того, чтобы работа совершалась непрерывно, нужно, чтобы после расширения рабочее тело вновь сжималось и снова использовалось для совершения работы.



Циклы графически изображаются в виде замкнутой кривой на P-V и T-S диаграммах (P-V диаграмма представлена в координатах «давление-объем», T-S диаграмма – в координатах «абсолютная температура-энтропия»). Если площадь фигуры, заключенная между диаграммой и осью абсцисс на P-V диаграмме представляет собой затраченную либо совершенную работу, то на T-S диаграмме эта площадь соответствует подведенному либо отведенному в цикле теплу. О совершенстве цикла говорит отношение работы, совершенной в цикле к количеству подведенного в цикле тепла.

$$\eta = \frac{A}{Q}.$$

Применяют также термический коэффициент полезного действия:

$$\eta_t = q_0 - q_{\text{сжат}} = \frac{q_{\text{расш}} - q_{\text{сжат}}}{q_{\text{расш}}} = 1 - \frac{q_{\text{сжат}}}{q_{\text{расш}}},$$

здесь:

q_0 – тепло цикла (заштрихованная площадь на T-S диаграмме),

$q_{\text{сжат}}$ – тепло, подведенное к рабочему телу при сжатии,

$q_{\text{расш}}$ – тепло отведенное от рабочего тела при расширении.

Из формулы видно, что для повышения эффективности цикла следует возможно больше подводить тепло при сжатии рабочего тела и возможно меньше отводить тепло при расширении.

В теплотехнике существует большое количество термодинамических циклов, описывающих работу различных тепловых машин. Среди них выделяют цикл Карно – цикл, являющийся идеальным для любой тепловой машины. Цикл Карно состоит из четырех процессов: адиабатного сжатия 1-2, изотермического расширения 2-3, адиабатного расширения 3-4 и изотермического сжатия 4-1.

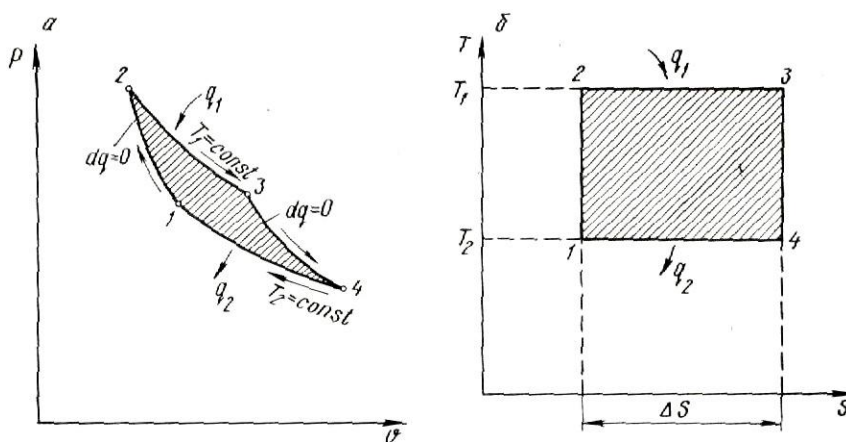


Рис. 1 Цикл Карно:
а – в системе координат $p-v$; б – в системе координат $T-s$.

Если рассмотреть T-S диаграмму процесса, то она будет представлять прямоугольник, где изотермы 2-3 и 4-1 параллельны оси абсцисс, а адиабаты 1-2 и 3-4 параллельны оси ординат.

К.П.Д. цикла Карно определяется как:

$$\eta_t = 1 - \frac{T_2}{T_1},$$

где T_1 и T_2 – абсолютная температура рабочего тела (газа) соответственно при подводе и отводе тепла.

Эта простая формула позволяет сделать два основных вывода - о пути повышения КПД тепловых машин и о том, что невозможно создать теп-

ловую машину, коэффициент полезного действия которой будет равен единице, т. е. 100 %.

Действительно – дробь T_2/T_1 может быть равна нулю лишь в том случае, если ее числитель T_2 равен нулю, либо знаменатель T_1 равен бесконечности.

И то и другое – нереально, поскольку невозможно охладить материальное тело до температуры абсолютного нуля, и невозможно начальную температуру рабочего тела сделать бесконечной, поскольку само понятие тела в этом случае теряет смысл; кроме того - невозможно изготовить реальный двигатель, детали и узлы которого способны выдержать такую температуру.

Для увеличения КПД тепловой машины следует сделать так, чтобы отношение T_2/T_1 было как можно меньшим, т.е. подвод тепла проводить при возможно более высокой температуре T_1 , а отвод – при возможно более низкой T_2 .

Пример 6.1

При совершении цикла в тепловом двигателе подводится 440 МДж теплоты. При этом двигатель совершает работу, равную 200МДж. Определить термический КПД двигателя.

Решение:

1. КПД цикла равно:

$$\eta = \frac{A}{Q} = \frac{200 \cdot 10^6}{440 \cdot 10^6} = 0,455.$$

Ответ: термический КПД двигателя равен 0,455.

Пример 6.2

Определить термический КПД двигателя, работающего по циклу Карно, если подвод теплоты осуществляется при температуре $t_1=200^\circ\text{C}$, а отвод при температуре $t_2=30^\circ\text{C}$.

Решение:

1. Абсолютная температура подвода и отвода теплоты:

$$t_1=200+273=473^\circ\text{C},$$

$$t_2 = 30 + 273 = 303^\circ\text{C}.$$

2. Термический КПД двигателя:

$$\eta_t = 1 - \frac{T_2}{T_1} = 1 - \frac{303}{473} = 0,36.$$

Ответ: термический КПД двигателя равен 0,36.

Задача 6.1

Определить термический КПД цикла Карно, если подвод тепла производится при температуре $t_1 = 600^\circ\text{C}$, а отвод - при $t_2 = 30^\circ\text{C}$.

Варианты заданий:

Номер варианта	$t_1, ^\circ\text{C}$	$t_2, ^\circ\text{C}$
2	620	40
3	640	50
4	660	60
5	680	70
6	700	80
7	620	90
8	640	40
9	660	50
10	680	60
11	700	70
12	620	80
13	640	90
14	660	40
15	680	50
16	700	60
17	620	70
18	640	80
19	660	90
20	680	60

7 Водяной пар и его свойства

Вода при атмосферном давлении 103 кПа кипит при температуре $t = 100^\circ\text{C}$ (273,16K), если к ней подводится тепло. При этой же температуре пар конденсируется в воду, если тепло от пара отводится. С повышением давления температура кипения (и конденсации) растет.

При температуре $t > 374^\circ\text{C}$ вода в жидком состоянии не существует и находится только в газообразном состоянии. Эта температура называется критической температурой воды. Любой газ можно превратить в жид-

кость сильным сжатием, но только при температуре, меньше критической для данного вещества.

Таблица 7.1

Давление и температура кипения для воды

Давление, атмосферы	Соответствующая ему температура кипения, °С	Давление, атмосферы	Соответствующая ему температура кипения, °С
0,01	6,7	30,0	232,8
0,04	28,6	100,0	300,5
1,0	99,1	170,0	350,7
1,033	100,0	200,0	364,1
5,0	151,1	220,0	372,1

Пар можно получить испарением и кипячением воды.

При испарении от поверхности воды отрываются молекулы, имеющие сравнительно небольшую кинетическую энергию. Эти молекулы вылетают из воды в окружающее пространство и над водой образуется пар.

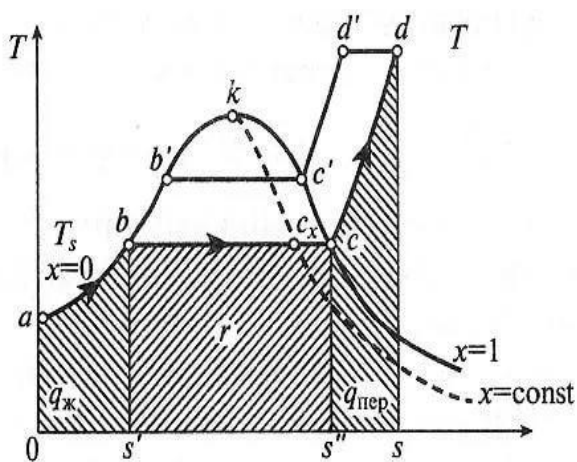
Кипение при данном давлении возможно при определенной температуре, называемой температурой кипения или температурой насыщенных паров воды t_n . При кипении пар образуется одновременно во всем объеме воды. Частицы пара образуют пузырьки, которые всплывают на её поверхность, вынося с собой мелкие капли воды. Пар, образующийся над поверхностью воды, называют насыщенным паром. Насыщенный пар – это пар, находящийся в термодинамическом равновесии с жидкостью, из которой он образуется. Динамическое равновесие заключается в том, что количество молекул, вылетающих из воды в паровое пространство, равно количеству молекул, возвращающихся из парового пространства в воду. Динамическое равновесие нарушается при малейшем подводе (отводе) тепла. Процесс, обратный парообразованию, называют конденсацией. Если от насыщенного пара отводить тепло, он начнет конденсироваться в воду. Насыщенный пар может быть влажным и сухим.

Влажным паром называют смесь пара и мелких капель воды. Сухим называют пар, не содержащим воды в жидком состоянии. Сухой насыщенный пар является неустойчивым – мгновенным состоянием при переходе влажного пара в перегретый пар и обратно.

Степенью сухости χ называют долю сухого пара во влажном паре. Влажностью $1-\chi$ называют долю кипящей жидкости в сухом паре. В 1 кг влажного пара сухостью $\chi=0,8$ содержится 0,8 кг сухого пара и 0,2 кг воды.

Если к сухому насыщенному пару подводить тепло, пар будет повышать температуру, т.е. перегреваться. Перегретым называют пар, имеющий более высокую температуру при данном давлении, чем сухой насыщенный пар. Температуру перегретого пара обозначают t . Разницу $t-t_n$ называют перегревом пара. Перегретый пар – ненасыщенный пар.

Энергия, затраченная на приготовление перегретого при данном давлении пара называется энтальпией (теплосодержанием) пара. Энтальпия пара может быть полностью обращена в работу.



Энтальпия перегретого пара

$$i = q_{\text{ж}} + r + q_{\text{пер}} = c_{\text{ж}} \cdot (t_n - t_0) + r + c_{\text{pm}} (t_{\text{п}} - t_n),$$

где:

$q_{\text{ж}} = c_{\text{ж}} \cdot (t_n - t_0)$ - тепло, потраченное на нагрев воды до температуры кипения (заштрихованная площадь $q_{\text{ж}}$ на T-s диаграмме),

$c_{\text{ж}} = 4,19 \text{ кДж} \cdot \text{кг} / \text{К}$ - теплоёмкость воды,

r - теплота парообразования (заштрихованная площадь r на T-s диаграмме),

$q_{\text{пер}} = c_{\text{pm}} (t_{\text{п}} - t_n)$ - теплота перегрева пара (заштрихованная площадь $q_{\text{пер}}$ на T-s диаграмме).

Водяной пар не является идеальным газом, поэтому параметры пара, а также совершаемую паром при расширении работу нельзя подсчитать по уравнению Менделеева-Клайперона. Тепловые расчеты пара производят по табличным данным, либо диаграммам пара.

Табличные значения параметров пара получены опытным путем. По этим же опытным данным составлены h-s диаграммы пара. В таблицах обозначения со штрихом' означают параметры воды, с двумя штрихами'' – насыщенного пара, без штриха – перегретого пара. Выдержки из таблиц «Александров А.А., Григорьев Б.А. Таблицы теплофизических свойств воды и водяного пара: Справочник. – М.: Издательство МЭИ. 1999. 168 с.; ил.» приведены ниже.

Таблица 7.2 Параметры насыщенного пара в зависимости от давления.

P , МПа	t_n , °C	v' , м³/кг	v'' , м³/кг	ρ'' , кг/м³	h' , кДж/кг	h'' , кДж/кг	g , кДж/кг	s , кДж/(кг·К)	s'' , кДж/(кг·К)
0,001	6,92	0,0010001	129,208	0,0077	29,32	2513,8	2484,5	0,1054	8,975
0,002	17,514	0,0010014	66,97	0,01493	73,52	2533	2459	0,2609	8,722
0,005	32,88	0,0010053	28,19	0,03547	137,83	2561	2423	0,4761	8,393
0,01	45,84	0,0010103	14,68	0,05812	191,9	2584	2392	0,6492	8,149
0,02	60,08	0,0010171	7,647	0,1308	251,4	2609	2358	0,8321	7,907
0,05	81,35	0,0010299	3,239	0,3087	340,6	2645	2305	1,0910	7,593
0,1	99,64	0,0010432	1,694	0,5903	417,4	2675	2258	1,3026	7,360
0,2	120,23	0,0010605	0,8854	1,129	504,8	2707	2202	1,5302	7,127
0,5	151,84	0,0010927	0,3247	2,669	640,1	2749	2109	1,860	6,822
0,8	170,42	0,0011149	0,2403	4,161	720,9	2769	2048	2,046	6,663
1,0	179,88	0,0011273	0,1946	5,139	762,7	2778	2015	2,138	6,587
1,2	187,95	0,0011385	0,1633	6,124	798,3	2785	1987	2,216	6,5233
1,5	198,28	0,0011539	0,1317	7,593	844,6	2792	1947	2,314	6,445
2,0	212,37	0,0011766	0,09958	10,041	908,5	2799	1891	2,447	6,340
2,5	223,93	0,0011972	0,07993	12,51	961,8	2802	1840	2,554	6,256
3,0	233,83	0,0012163	0,06665	15,0	1008,3	2804	1796	2,646	6,186
3,6	244,16	0,0012380	0,05543	18,04	1057,5	2802	1745	2,740	6,113
4,0	250,3	0,0012520	0,04977	20,09	1087,5	2800,6	1713,2	2,7965	6,0689
5,0	263,91	0,0012858	0,03943	25,36	1154,2	2792,8	1638,2	2,9209	5,9712
10,0	310,96	0,0014522	0,01803	95,47	1407,9	2724,8	1316,9	3,3601	5,6147
20,0	365,72	0,00203	0,00586	170,5	1826,8	2410,3	583,4	4,0147	4,9280

$P_{кр} = 22,129$ МПа; $t_{кр} = 374,15$ °C; $v_{кр} = 0,00326$ м³/кг,

Таблица 7.3 Параметры насыщенного пара в зависимости от температуры

t , °C	P , МПа	v' , м³/кг	v'' , м³/кг	ρ'' , кг/м³	h' , кДж/кг	h'' , кДж/кг	g , кДж/кг	s' , кДж/(кг·К)	s'' , кДж/(кг·К)
0	0,006108	0,0010002	206,3	0,0048	0,000	2501	2501	0	9,1544
10	0,001228	0,0010004	106,42	0,009398	42,04	2519	2477	0,1510	8,8994
20	0,002337	0,0010018	57,84	0,01729	83,90	2537	2454	0,2964	8,6665
50	0,01233	0,0010121	12,04	0,08306	209,3	2592	2383	0,7038	8,0753
80	0,04736	0,0010290	3,408	0,2934	334,9	2643	2308	1,0753	7,6116
100	0,10132	0,0010435	1,673	0,5977	419,1	2676	2257	1,3071	7,3547
125	0,23208	0,0010649	0,7704	1,298	525,0	2713	2188	1,5814	7,0777
150	0,476	0,0010906	0,3926	2,547	632,2	2746	2114	1,8418	6,8383
175	0,8925	0,0011208	0,2166	4,617	741,1	2773	2032	2,0909	6,6256
200	1,5551	0,0011565	0,1272	7,862	852,4	2793	1941	2,3308	6,4318
225	2,55	0,0011992	0,07837	12,76	966,9	2802	1835	2,5640	6,2488
250	3,98	0,0012512	0,05006	19,98	1085,7	2801	1715	2,7934	6,0721
275	5,95	0,0013168	0,03274	50,53	1210,7	2785	1574,2	3,0223	5,8938
300	8,59	0,0014036	0,02164	46,21	1344,9	2749	1404,2	3,2548	5,7049
325	12,06	0,001529	0,01417	70,57	1493,6	2684	1190,3	3,5002	5,4891
350	16,54	0,001741	0,008803	113,6	1671,5	2565	893,5	3,7786	5,2117
374	22,09	0,00280	0,00347	288,0	2039,2	2150,7	111,5	4,3258	4,5418

$P_{кр} = 22,129$ МПа; $t_{кр} = 374,15$ °C; $v_{кр} = 0,00326$ м³/кг.

Таблица 7.4 Параметры перегретого водяного пара.

P	2,0 МПа			3,0 МПа			5,0 МПа		
	$t_n = 212,37; \quad h'' = 2799;$ $v'' = 0,09958; \quad s'' = 6,340$			$t_n = 233,83; \quad h'' = 2804;$ $v'' = 0,06665; \quad s'' = 6,186$			$t_n = 263,91; \quad h'' = 2794;$ $v'' = 0,03944; \quad s'' = 5,973$		
$t, ^\circ\text{C}$	$v, \text{м}^3/\text{кг}$	$h, \text{кДж/кг}$	$s, \text{кДж/(кг}\cdot\text{К)}$	$v, \text{м}^3/\text{кг}$	$h, \text{кДж/кг}$	$s, \text{кДж/(кг}\cdot\text{К)}$	$v, \text{м}^3/\text{кг}$	$h, \text{кДж/кг}$	$s, \text{кДж/(кг}\cdot\text{К)}$
0	0,0009991	2,1	0,0000	0,0009986	3,1	0,0000	0,0009976	5,2	0,0004
50	0,0010112	210,9	0,7020	0,0010107	211,8	0,7018	0,0010098	213,6	0,7005
100	0,0010424	420,1	1,3048	0,0010419	420,9	1,3038	0,0010408	422,5	1,3020
150	0,0010895	632,8	1,838	0,0010889	633,4	1,837	0,0010876	634,7	1,835
200	0,0011561	852,4	2,328	0,0011551	852,6	2,326	0,0011530	853,6	2,322
250	0,1114	2900	6,539	0,07067	2853	6,283	0,0012492	1085,7	2,789
300	0,1255	3019	6,757	0,08119	2988	6,530	0,04539	2920	6,200
350	0,1384	3134	6,949	0,09051	3111	6,735	0,05195	063	6,440
400	0,1511	3246	7,122	0,09929	3229	6,916	0,05781	3193	6,640
450	0,1634	3357	7,282	0,1078	3343	7,080	0,06332	3315	6,815
500	0,1735	3468	7,429	0,1161	3456	7,231	0,06858	3433	6,974
550	0,1875	3578	7,569	0,1243	3569	7,373	0,07370	3550	6,120
600	0,1995	3690	7,701	0,1325	3682	7,506	0,07870	3666	7,257
650	0,2114	3802	7,827	0,1405	3796	7,633	0,08357	3782	7,787
700	0,2232	3917	7,947	0,1484	3911	7,755	0,08842	3899	7,510

Примечание. Подробные таблицы параметров водяного пара и параметров перегретого пара смотри в [2] – «Термодинамические свойства воды и водяного пара».

Пример 7.1

Избыточное давление в паровом котле равно 2 МПа. Принимая атмосферное давление равным 0,1 МПа, определить температуру пара в котле.

Решение:

1. Абсолютное давление в котле $P_{\text{абс}} = P_{\text{изб}} + P_{\text{атм}}$; $P_{\text{абс}} = 3,5 + 0,1 = 3,6$ МПа.
2. По табл. 7.2 находим при $P = 3,6$ МПа $t_n = 244,16^\circ\text{C}$.

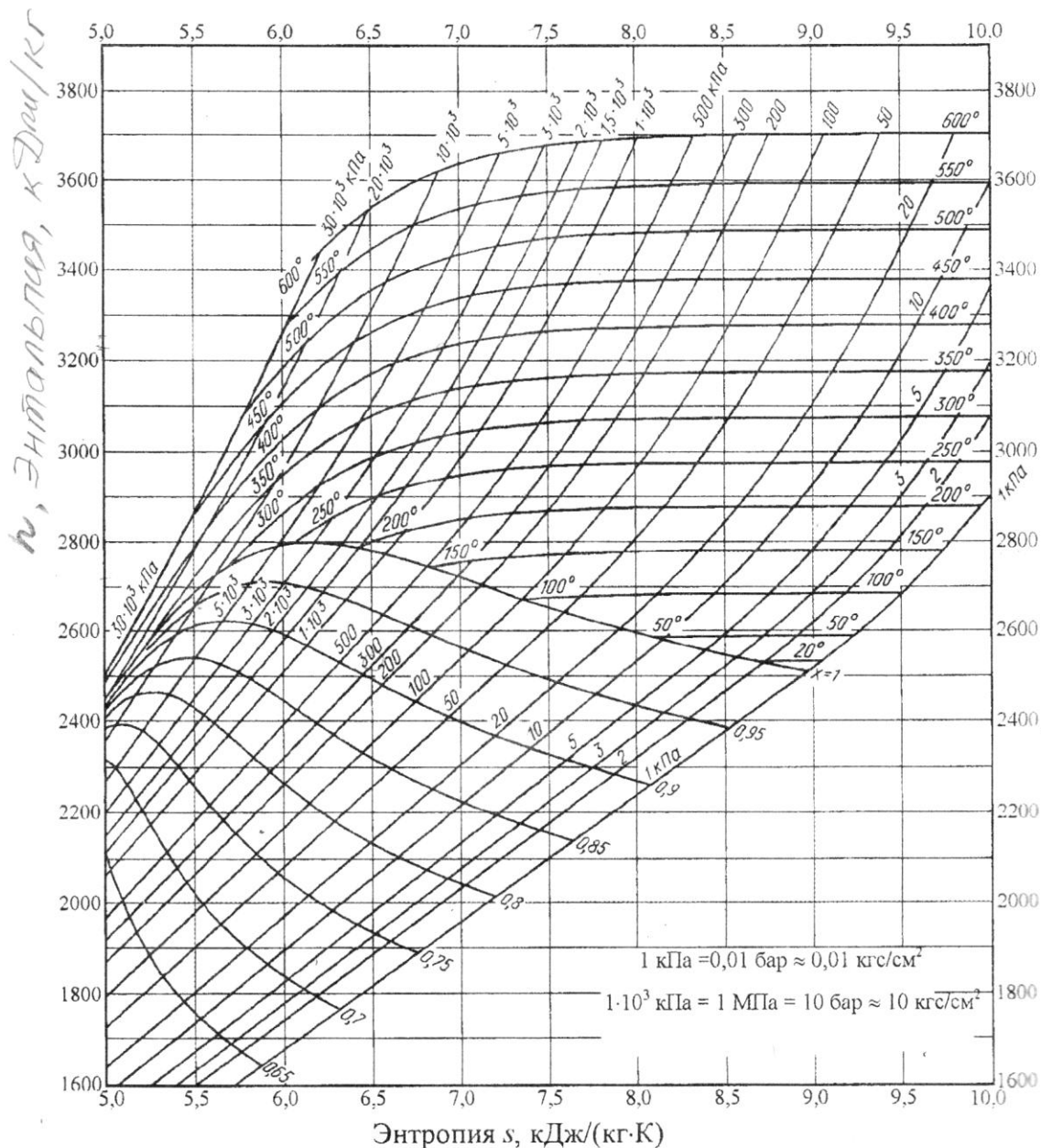
Ответ: температура пара в котле равна $244,16^\circ\text{C}$.

Пример 7.2

Пользуясь h - s диаграммой, определить энтальпию перегретого пара, если давление пара 3 МПа, а температура 400°C . Результат проверить по таблице 7.4.

Решение.

1. На h - s диаграмме водяного пара находим точку пересечения линии изобары $P = 3 \text{ МПа} = 3103 \text{ кПа}$ с линией изотермы 400°C .
2. Определяем ординату найденной точки на оси «Энтальпия» $h = 3250$ кДж/кг.
3. По таблице 1.15 определяем $h = 3229$ кДж/кг.



Ответ: Энтальпия перегретого пара по h - s диаграмме 3250 кДж/кг, по таблице – 3229 кДж/кг. Очевидно, значение энтальпии, найденное по диаграмме, менее точно, чем табличное, за счет погрешности определения координат на диаграмме.

Рис. 7.1

h - s диаграмма водяного пара.

Пример 7.3

Сто литров воды с начальной температурой 0°C в котле превращается в перегретый пар температурой 400°C при постоянном давлении 5 МПа. Определить расход мазута на приготовление пара, принимая теплотвор-

ную способность мазута $Q_n=40$ МДж/кг, коэффициент полезного действия котла $\eta_k=90\%$.

Решение.

1. По $h-s$ диаграмме (рис. 7.1) в точке пересечения изобары $p=5 \cdot 10^3$ кПа и изотермы $t=400^\circ\text{C}$ находим энтальпию перегретого пара $h=3200$ кДж/кг.
2. Масса нагреваемой воды (пара) $m=\rho \cdot v=1000 \text{ кг/м}^3 \cdot 0,1 \text{ м}^3=100$ кг.
3. Количество тепла, необходимого для сообщения пару такой энтальпии

$$Q_{\text{пара}}=m \cdot h=100 \cdot 3200=320000 \text{ кДж}=320 \text{ МДж}$$

4. Масса мазута, необходимая для выработки нужного количества тепла

$$M_{\text{мазута}}=Q_{\text{пара}}/(\eta \cdot Q_n)=320/0,9 \cdot 40=8,9 \text{ кг.}$$

Ответ: Расход мазута на приготовление 100 кг перегретого пара равен 8,9 кг.

Задача 7.1

При давлении в котле $P_{\text{изб}}=2,9$ МПа воду нагрели до $t=200^\circ\text{C}$. При помощи $h-s$ диаграммы определить, началось ли парообразование в котле?

Варианты заданий:

Номер варианта	$P_{\text{изб}}$, МПа	t , $^\circ\text{C}$
2	2,8	190
3	2,6	160
4	2,7	170
5	2,9	180
6	2,5	190
7	2,4	160
8	2,8	170
9	2,6	180
10	2,7	170
11	2,5	180
12	2,4	190
13	2,8	160
14	2,6	170
15	2,7	180
16	2,5	180
17	2,4	190
18	2,8	160
19	2,6	170
20	2,4	180

Задача 7.2

Пользуясь h - s диаграммой, определить энтальпию перегретого пара, если давление пара 2МПа, а температура 200⁰С. Результат проверить по таблице 1.15.

Варианты заданий:

Номер варианта	Давление пара, МПа	Температура, 0 ⁰ С
2	2	250
3	3	300
4	5	350
5	3	400
6	2	450
7	5	400
8	5	250
9	2	300
10	3	350
11	5	450
12	3	400
13	2	250
14	5	300
15	5	350
16	5	450
17	3	400
18	2	250
19	5	300
20	5	350

Задача 7.3

Кубометр воды с начальной температурой 0⁰С в котле превращается в перегретый пар температурой $t=500^{\circ}\text{C}$ при постоянном давлении $p=3\text{МПа}$. Определить расход мазута на приготовление пара, принимая теплотворную способность мазута $Q_n=40\text{МДж/кг}$, к.п.д. котла $\eta_k=90\%$. Решение выполнить с использованием h - s диаграммы пара.

Варианты заданий:

Номер варианта	T, 0 ⁰ С	P, МПа	Q _n , МДж/кг,	η _к , %
2	450	2	42	85
3	400	5	38	95
4	350	3	40	90
5	300	3	42	85
6	500	5	38	95
7	450	2	40	90
8	400	2	42	85

9	350	5	38	95
10	300	3	40	90
11	500	3	42	95
12	450	3	38	90
13	400	5	40	85
14	350	2	42	95
15	300	2	38	90
16	500	3	42	95
17	450	3	38	90
18	400	5	40	85
19	350	2	42	95
20	300	2	38	90

8 Теплопроводность

Теплообменом называется процесс передачи тепла от одного тела к другому. Тепло при теплообмене всегда передается от более нагретого тела к другому. Процесс теплообмена является очень сложным физическим процессом. Чтобы выявить законы передачи тепла, общий процесс теплообмена расчлениают на три основных вида: теплопроводность, конвекцию и тепловое излучение.

Теплопроводность – это перенос теплоты в сплошной среде, обусловленный наличием градиента температур в разных точках среды. Теплопроводность осуществляется тепловым движением микрочастиц тела (молекул, атомов, ионов, электронов). Передача тепла теплопроводностью в чистом виде встречается только в твердых телах.



Перенос теплоты теплопроводностью зависит от распределения температуры по объему тела. Если одна стенка твердой пластины толщиной δ нагрета до температуры t_{c1} а другая до температуры t_{c2} , то количество тепла Q , проходящего через поверхность площадью F определяется по закону Фурье:

$$Q = \frac{\lambda(t_{c1} - t_{c2})F}{\delta}, \text{ Вт};$$

где:

λ – коэффициент теплопроводности, Вт/м·К;

t_{c1} и t_{c2} – температура наружных стенок, °С;

F – площадь поверхности стенки, м²;

δ – толщина стенки, м.

Коэффициент теплопроводности λ – это количество тепла, проходящее через квадратный метр поверхности за секунду в направлении, перпендикулярном поверхности при градиенте температуры, равном единице.

Коэффициент теплопроводности

Теплопроводность λ , Вт/(м·К)

Хорошие проводники тепла		Плохие проводники тепла		Теплоизоляторы	
Серебро	407	Ртуть	8,2	Асбест	0,4–0,8
Медь	384	Котельная накипь	≈ 3	Поливинилхлорид	≈ 0,17
Золото	308	Мрамор	2,8	Кожа	≈ 0,15
Алюминий	209	Лед (0 °С)	2,23	Дерево	0,1–0,2
Латунь	111	Песчаник	≈ 2	Древесный уголь	0,1–0,17
Платина	70	Фарфор	≈ 1,4	Пробка	≈ 0,05
Олово	65	Кварцевое стекло	1,36	Стекловата	≈ 0,05
Серый чугун	50	Бетон	0,7–1,2	Шамот	0,04
Бронза	47–58	Стекло	≈ 0,7	Пенопласт	0,04
Сталь	47	Кирпич	≈ 0,7	Воздух	0,034
Свинец	35	Вода	0,58	Перо	0,02
				Вакуум	0,00

Изменение температуры по толщине стенки происходит по линейному закону. Если ввести следующие обозначения:

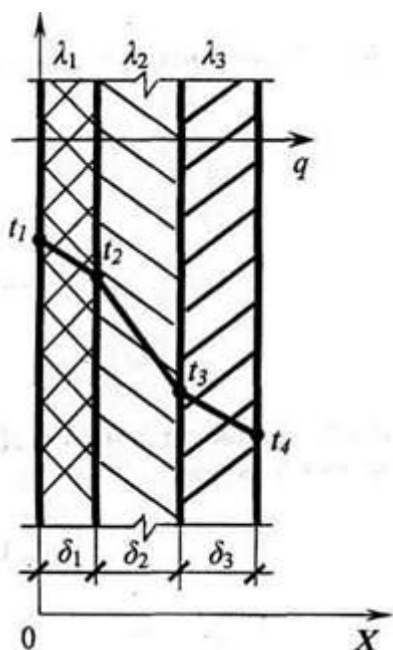
$\frac{(t_{c1}-t_{c2})}{\delta}$, °С/м – градиент температуры;

$q = \frac{Q}{F}$, Вт/м² – плотность теплового потока;

$\frac{\lambda}{\delta}$, Вт/м²·К – тепловая проводимость, и обратную величину $R = \frac{\delta}{\lambda}$, м²·К/Вт – термическое сопротивление, то плотность теплового потока будет равна:

$$q = \frac{t_{c1} - t_{c2}}{R}, \frac{\text{Вт}}{\text{м}}.$$

Из формулы следует, что плотность теплового потока через однослойную стенку прямо пропорциональна разности температур стенок и обратно пропорциональна термическому сопротивлению стенки.



Как правило теплопроводность осуществляется через многослойные стенки. (Например, в радиаторе отопления – слой краски, слой металла, слой ржавчины, слой глинистых отложений в трубе). При этом каждый слой стенки обладает собственным термическим сопротивлением R , а плотность теплового потока через каждый слой одинакова $q_1 = q_2 = q_3 = q$.

Плотность теплового потока через многослойную (в нашем случае, трехслойную) стенку будет равна:

$$q = \frac{t_1 - t_4}{\Sigma R}, \frac{\text{Вт}}{\text{м}};$$

а полный тепловой поток через стенку:

$$Q = \frac{(t_1 - t_4)F}{\Sigma R}, \text{Вт};$$

где:

t_1 и t_4 - температуры на внешних поверхностях стенки,

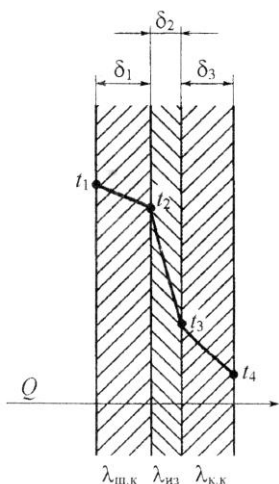
ΣR - сумма термических сопротивлений слоев стенки,

F - площадь поверхности теплообмена.

При решении задач по теплообмену теплопроводностью вычисляют количество тепла, проходящего через стенки при заданной разнице температур, или наоборот, вычислению температур стенок при известном тепловом потоке.

Пример 8.1

Стенка нагревательной печи имеет размеры 3×5 м. Толщина стенки 625 мм. Стенка состоит из трех слоев: слоя кирпича шамотного толщиной $\delta_1 = 250$ мм, слоя теплоизоляционной прослойки толщиной $\delta_2 = 125$ мм, слоя кирпича красного толщиной $\delta_3 = 250$ мм. Температура внутренней поверхности стенки печи $t_1 = 1300^\circ\text{C}$, наружной поверхности стенки $t_4 = 50^\circ\text{C}$. Коэффициенты теплопроводности шамотного кирпича, изоляционного материала и красного



кирпича равны соответственно $\lambda_{\text{ш.к.}} = 1,28 \text{ Вт}/(\text{м} \cdot \text{К})$, $\lambda_{\text{из.}} = 0,116 \text{ Вт}/(\text{м} \cdot \text{К})$, $\lambda_{\text{к.к.}} = 0,465 \text{ Вт}/(\text{м} \cdot \text{К})$.

Определить количество тепла, проходящее через стенку за $\tau=1$ час и температуры на границе теплоизоляционного слоя.

Решение:

1. Сопротивление теплопроводности сложной стенки:

$$\Sigma R = \frac{\delta_1}{\lambda_{\text{ш.к.}}} + \frac{\delta_2}{\lambda_{\text{из.}}} + \frac{\delta_3}{\lambda_{\text{к.к.}}} = \frac{0,25}{1,28} + \frac{0,125}{0,116} + \frac{0,25}{0,465} = 1,9 \frac{\text{м}^2 \cdot \text{К}}{\text{Вт}}.$$

2. Плотность теплового потока через стенку:

$$q = \frac{t_1 - t_4}{\Sigma R} = \frac{1300 - 50}{1,9} = 658 \frac{\text{Вт}}{\text{м}^2}.$$

3. Температуры на поверхностях теплоизоляционного слоя:

$$t_2 = t_1 - q \frac{\delta_1}{\lambda_{\text{ш.к.}}} = 1300 - 658 \frac{0,25}{1,28} = 1172^\circ\text{C},$$

$$t_3 = t_4 + q \frac{\delta_3}{\lambda_{\text{к.к.}}} = 50 + 658 \frac{0,25}{0,465} = 404^\circ\text{C}.$$

4. Количество тепла, переданного через стенку:

$$Q = q \cdot F \cdot \tau = 658(3 \times 5)1 = 9900 \text{ Вт} \cdot \text{ч} = 9,9 \text{ кВт} \cdot \text{ч}$$

Ответ: за один час через стенку проходит $9,9 \text{ кВт} \cdot \text{ч}$ тепла, температуры на поверхностях теплоизоляционного слоя 1172°C и 404°C .

Задача 8.1

Определить наружную температуру кладки печи, если ее площадь $F=140 \text{ м}^2$, тепловой поток $Q=120 \text{ кВт}$, а температура кладки внутри печи $t_1=1020^\circ\text{C}$. Кладка состоит из двух слоев: огнеупорного кирпича ($\delta_{\text{о.к.}}=250 \text{ мм}$, $\lambda_{\text{о.к.}}=0,34 \frac{\text{Вт}}{\text{м} \cdot \text{К}}$), и красного кирпича ($\delta_{\text{к.к.}}=250 \text{ мм}$, $\lambda_{\text{к.к.}}=0,68 \frac{\text{Вт}}{\text{м} \cdot \text{К}}$).

Варианты заданий:

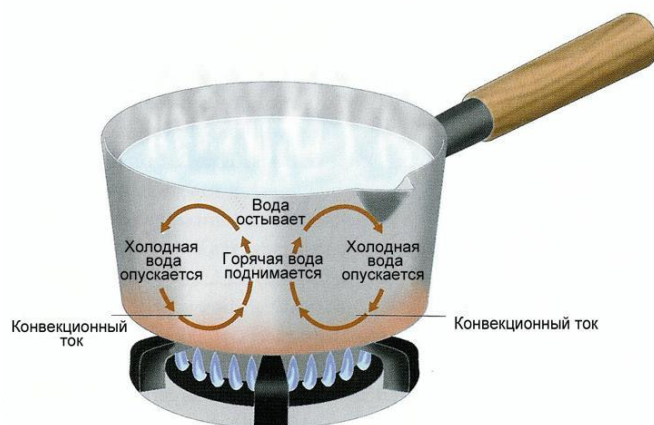
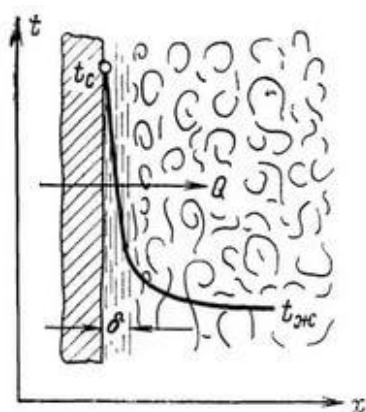
Номер варианта	$T, ^\circ\text{C}$	$Q, \text{ кВт}$	$\delta_{\text{о.к.}}, \text{ мм}$	$\delta_{\text{к.к.}}, \text{ мм}$
2	1000	50	250	75
3	1050	60	125	125
4	1100	70	375	250
5	1150	80	250	500
6	1200	90	125	75

7	1000	100	375	125
8	1050	110	250	250
9	1100	120	125	500
10	1150	50	375	75
11	1200	60	250	125
12	1000	70	125	250
13	1050	80	375	500
14	1100	90	250	75
15	1150	100	125	125
16	1200	110	375	250
17	1050	120	250	500
18	1100	80	125	75
19	1150	90	375	125
20	1200	100	250	250

9 Теплоотдача

Явление конвекции в жидкостях и газах и заключается в переносе тепла достаточно крупными частицами (макрочастицами). Одновременно с конвекцией в жидкости или газе происходит перенос тепла микрочастицами (теплопроводность). Совместный процесс конвекции и теплопроводности называют конвективным теплообменом или теплоотдачей. Поверхность тела, через которую переносится теплота, называется поверхностью теплообмена.

Обычно жидкости или газы воспринимают тепло при соприкосновении с поверхностями твердых тел (жидкость в теплообменнике нагревается от твердой поверхности трубы, воздух в комнате нагревается о стенки отопительных приборов).



Согласно закону Ньютона - Рихмана тепловой поток от жидкости к стенке равен:

$$Q = \alpha(t_{\text{ж}} - t_{\text{ст}})F, \text{ Вт};$$

а плотность теплового потока:

$$q = \alpha(t_{\text{ж}} - t_{\text{ст}}), \quad \frac{\text{Вт}}{\text{м}^2}.$$

Здесь:

F – площадь теплообмена, м^2 ;

$t_{\text{ж}}$ и $t_{\text{ст}}$ - температуры жидкости и стенки, $^{\circ}\text{C}$;

α – коэффициент теплоотдачи.

Коэффициент теплоотдачи численно равен количеству теплоты, переносимого в единицу времени через единицу поверхности при разнице температур жидкости и стенки в 1 градус.

$$\alpha = \frac{q}{(t_{\text{ж}} - t_{\text{ст}})}, \quad \frac{\text{Вт}}{\text{м}^2 \cdot \text{К}}.$$

Можно также записать

$$t_{\text{ст}} = t_{\text{ж}} - \frac{q}{\alpha}.$$

Величину, обратную коэффициенту теплоотдачи, называют термическим сопротивлением теплоотдачи:

$$R = \frac{1}{\alpha}, \quad \frac{\text{м}^2 \cdot \text{К}}{\text{Вт}}.$$

При расчете конвективного теплообмена задача расчета, как правило, сводится к определению коэффициента теплоотдачи α .

Коэффициент теплоотдачи α зависит от большого числа факторов.

Главные из них:

- Скорость и режим движения (ламинарный или турбулентный) движения теплоносителя (жидкости или газа).
- Физические свойства теплоносителя (плотность, вязкость, теплоемкость, теплопроводность).
- Размеры и форма поверхности теплообмена.

Зависимость коэффициента теплоотдачи от них весьма сложна и поэтому к настоящему времени не установлена теоретическим путем. Поэтому величину коэффициента находят, решая уравнение подобия (критериальное уравнение), которое получают в результате обработки многочисленных экспериментальных данных. Критерии подобия Нуссельта (Nu), Прандтля (Pr), Грассгофа (Gr) и

Рейнольдса (Re) позволяют корректировать данные, полученные экспериментально для одной из жидкостей, применительно к другой жидкости с учетом её свойств. При этом в расчетах критерии Re, Pr и Gr являются критериями определяющими, а критерий $Nu = \varphi(Re, Pr, Gr)$ – определяемым.

В расчетах для каждого конкретного условия теплообмена сначала определяются вид критериального уравнения, вычисляются либо по справочным данным подбираются определяющие критерии Re, Pr и Gr, затем по их значениям вычисляется критерий Nu, а затем уже вычисляется коэффициент теплоотдачи α .

Пример 9.1

Нагреватель, выполненный в виде трубы диаметром $d_n=15$ мм и длиной $l=1$ м, обдувается поперечным потоком воздуха со скоростью $v=1$ м/с и температурой $t_v=20^\circ\text{C}$. Определить количество теплоты, передаваемой нагревателем воздуху в единицу времени, если температура поверхности нагревателя составляет $t_n=80^\circ\text{C}$.

Решение:

1. В справочной литературе находим, что для расчета теплоотдачи при поперечном обтекании трубы потоком применяются критериальные уравнения вида:

$$\text{при } 1 < Re < 40 \quad Nu = 0,76Re^{0,4}Pr^{0,37} \quad (1)$$

$$\text{при } 40 \leq Re < 10^3 \quad Nu = 0,52Re^{0,5}Pr^{0,37} \quad (2)$$

$$\text{при } 10^3 \leq Re < 2 \cdot 10^5 \quad Nu = 0,26Re^{0,6}Pr^{0,4} \quad (3)$$

$$\text{при } 2 \cdot 10^5 \leq Re < 10^7 \quad Nu = 0,023Re^{0,8}Pr^{0,4} \quad (4)$$

2. По приложению 1 находим, что при температуре 20°C воздух имеет следующие физические свойства:

$$\nu = 15,06 \cdot 10^{-6} \frac{\text{м}^2}{\text{с}}; \quad \lambda = 0,0259 \frac{\text{Вт}}{\text{м} \cdot \text{К}}; \quad Pr = 0,703.$$

3. Определяем критерий Рейнольдса:

$$Re = v \frac{d}{\nu} = 1 \frac{0,015}{15,06 \cdot 10^{-6}} = 996.$$

4. Найденное значение укладывается в интервал $40 \leq Re < 10^3$, тогда расчет производим по уравнению (2).

$$Nu = 0,52Re^{0,5}Pr^{0,37} = 0,52 \cdot 996^{0,5} \cdot 0,703^{0,37} = 0,52 \cdot 31,56 \cdot 0,88 = 14,5$$

5. Определяем коэффициент теплоотдачи:

$$\alpha = Nu \frac{\lambda}{d} = 14,5 \frac{0,0259}{0,015} = 25 \frac{Вт}{м^2 \cdot К}.$$

6. Определяем количество теплоты, передаваемое от нагревателя в воздух:

$$Q = \alpha(t_n - t_b)F = \alpha(t_n - t_b)\pi \cdot d \cdot l =$$

$$= 14,5 \cdot (80 - 20) \cdot 3,14 \cdot 0,015 \cdot 1 = 70,65 Вт = \frac{Дж}{с}$$

(здесь $\pi \cdot d_n \cdot l$ - площадь наружной поверхности трубы, где d_n и l – наружный диаметр и длина трубы)

Ответ: Передача тепла воздуху подогревателем составляет 70,65 ватт или 70,65 Дж в секунду .

Задача 9.1

Трубка электроподогревателя диаметром $d=10$ мм и длиной $l=0,5$ м с температурой поверхности 300°C , обдувается поперечным потоком воздуха со скоростью $u = 10$ м/с и температурой $t_b = 20^\circ\text{C}$. Определить количество теплоты, передаваемой нагревателем воздуху в единицу времени, а также мощность, потребляемая нагревателем из сети.

Варианты заданий:

Номер варианта	d, мм	t, °C	u, м/с	t _в , °C.
2	10	400	5	-10
3	15	350	7	0
4	20	300	9	10
5	25	250	11	20
6	30	400	13	-10
7	25	350	15	0
8	20	300	5	10
9	15	250	7	20
10	10	400	9	-10
11	15	350	11	0
12	20	300	13	10
13	25	250	15	20
14	30	400	5	-10
15	25	350	7	0
16	20	300	9	10
17	15	250	11	-10
18	10	300	13	0
19	15	350	15	10
20	20	400	5	20

Приложение 1

Физические свойства сухого воздуха ($P=1,01 \cdot 10^5$ Па)

t, °C	ρ , кг/м ³	c_p , кДж/(кг К)	$\lambda 10^2$, Вт/(м К)	$\mu 10^6$, Па с	$\nu 10^6$, м ² /с	$\alpha 10^6$, м ² /с	Pr
-50	1,584	1,013	2,04	14,6	9,23	12,7	0,728
-40	1,515	1,013	2,12	15,2	10,04	13,8	0,728
-30	1,453	1,013	2,20	15,7	10,80	14,9	0,723
-20	1,395	1,009	2,28	16,2	12,79	16,2	0,716
-10	1,342	1,009	2,36	16,7	12,43	17,4	0,712
0	1,293	1,005	2,44	17,2	13,28	18,8	0,707
10	1,247	1,005	2,51	17,6	14,16	20,0	0,705
20	1,205	1,005	2,59	18,1	15,06	21,4	0,703
30	1,165	1,005	2,67	18,6	16,00	22,9	0,701
40	1,128	1,005	2,76	19,1	16,96	24,3	0,699
50	1,093	1,005	2,83	19,6	17,95	25,7	0,698
60	1,060	1,005	2,90	20,1	18,97	26,2	0,696
70	1,029	1,009	2,96	20,6	20,02	28,6	0,694
80	1,000	1,009	3,05	21,1	21,09	30,2	0,692
90	0,972	1,009	3,13	21,5	22,10	31,9	0,690
100	0,946	1,009	3,21	21,9	23,13	33,6	0,688
120	0,898	1,009	3,34	22,8	25,45	36,8	0,686
140	0,854	1,013	3,49	23,7	27,80	40,3	0,684
160	0,815	1,017	3,64	24,5	30,09	43,9	0,682
180	0,779	1,022	3,78	25,3	32,49	47,5	0,681
200	0,746	1,026	3,93	26,0	34,85	51,4	0,680
250	0,674	1,038	4,27	27,4	40,61	61,0	0,677
300	0,615	1,047	4,60	29,7	48,33	71,6	0,674
350	0,566	1,059	4,91	31,4	55,46	81,9	0,676
400	0,524	1,068	5,21	33,0	63,09	93,1	0,678
500	0,456	1,093	5,74	36,2	79,38	115,3	0,687
600	0,404	1,114	6,22	39,1	96,89	138,3	0,699
700	0,362	1,135	6,71	41,8	115,4	163,4	0,706
800	0,329	1,156	7,18	44,3	134,8	188,8	0,713
900	0,301	1,172	7,63	46,7	155,1	216,2	0,717
1000	0,277	1,185	8,07	49,0	177,1	245,9	0,719
1100	0,257	1,197	8,50	51,2	199,3	276,2	0,722
1200	0,239	1,210	9,15	53,5	233,7	316,5	0,724

10 Лучистый теплообмен

Особенностью лучистого теплообмена является отсутствие непосредственного соприкосновения обменивающихся телом тел. Тепло передается инфракрасным излучением. Излучение поглощается телами, причем при их поглощении лучистая энергия переходит в тепловую.

Тепловое излучение свойственно всем телам. Каждое тело, имеющее температуру выше абсолютного нуля, непрерывно излучает энергию. Лучистая энергия, падающая на тело, частично им отражается, частично поглощается, частично пропускается.

Тела, полностью отражающие падающую на них лучистую тепловую энергию, называются абсолютно белыми, полностью поглощающие лучистую энергию – абсолютно черными, полностью пропускающие её – абсолютно прозрачными.

Абсолютно белых, черных и прозрачных тел в природе не существует. К практически прозрачным телам относят одно- и двухатомные газы, к близким к абсолютно черным – сажа, черный бархат, поглощающие до 97% падающего теплового излучения, близким к абсолютно белым – полированные металлы, отражающие до 97% падающего излучения.

Поглощение и отражение тепловых лучей твердыми телами зависит от состояния их поверхностей; гладкие полированные поверхности хорошо отражают, а шероховатые поверхности хорошо поглощают падающее тепловое излучение.

Согласно закону Стефана-Больцмана, интенсивность излучения абсолютно черного тела, пропорциональна четвертой степени его абсолютной температуры:

$$Q = C \left(\frac{T}{100} \right)^4, \frac{\text{Вт}}{\text{м}^2}.$$

Количество тепла, выделяемого излучением равно:

$$Q = C \cdot F \left(\frac{T}{100} \right)^4, \text{Вт};$$

где C – коэффициент пропорциональности, называемый коэффициентом лучеиспускания.

Наибольшее значение имеет коэффициент лучеиспускания абсолютно черного тела $C_s = 5,68 \text{ Вт/м}^2\text{К}^4$. Излучение других тел называется излучением серых тел, которое всегда меньше излучения абсолютно черного тела и учитывается в формуле Стефана-Больцмана через коэффициент ε , называемый степенью черноты серого тела.

Коэффициент лучеиспускания серого тела:

$$C = \varepsilon \cdot C_s = 5,68 \cdot \varepsilon, \frac{\text{Вт}}{\text{м}^2 \cdot \text{К}^4}.$$

Значения степени черноты различных материалов приведены в приложении 1.

Установлена связь между лучеиспускательной и поглощательной способностью тела. Поглощательная способность тела равна степени его черноты. Чем больше поглощательная способность тела, тем больше его лучеиспускательная способность. Наоборот, тела, хорошо отражающие лучистую энергию, сами поглощают мало; для абсолютно белого и абсолютно прозрачного тела поглощательная способность равна нулю.

Количество тепла, отдаваемого телом с абсолютной температурой T_1 окружающим его более холодным телам с абсолютной температурой T_2 составляет:

$$Q = \frac{1}{\frac{1}{C_1} + \frac{1}{C_2} + \frac{1}{C_s}} \left[\frac{T_1}{100} - \frac{T_2}{100} \right] \cdot F, \text{ Вт};$$

где:

F - расчетная поверхность теплообмена,

C_s - коэффициент лучеиспускания абсолютно черного тела,

C_1 - коэффициент лучеиспускания первого тела,

C_2 - коэффициент лучеиспускания второго тела.

Пример 10.1

Определить интенсивность излучения стальной стенки, если температуры ее поверхности 227°С . Коэффициент лучеиспускания абсолютно черного тела $C_s = 5,68 \text{ Вт/м}^2\text{К}^4$.

Решение.

1. В приложении 1 находим степень черноты стали $\varepsilon = 0,8$.

2. Определяем коэффициент лучеиспускания стальной стенки:

$$C = \varepsilon \cdot C_S = 0,8 \cdot 5,68 = 4,54 \frac{\text{Вт}}{\text{м}^2 \cdot \text{К}^4}.$$

3. Переводим температуру из градусов Цельсия в Кельвины:

$$T = 227 + 273 = 500 \text{ К}.$$

4. Определяем интенсивность излучения стенки:

$$Q = C \left(\frac{T}{100} \right)^4 = 4,54 \cdot \left(\frac{500}{100} \right)^4 = 2837,5 \frac{\text{Вт}}{\text{м}^2} = 2,84 \frac{\text{кВт}}{\text{м}^2}.$$

Ответ: интенсивность излучения стальной стенки равна $2,84 \frac{\text{кВт}}{\text{м}^2}$.

Задача 10.1

Определить интенсивность излучения стенки, нагретой до 100°C . Материал стенки - бетон.

Варианты заданий:

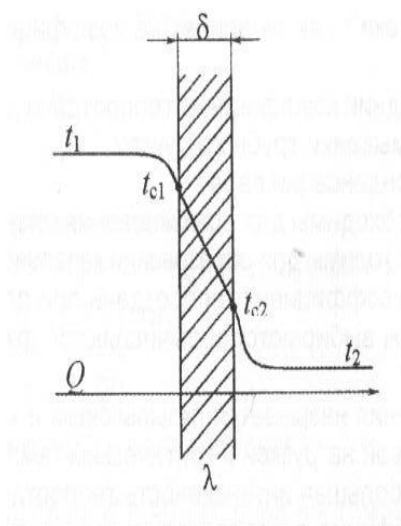
Номер варианта	Материал стенки	Температура стенки, $^\circ\text{C}$
2	Алюминий полированный	150
3	Алюминий окисленный	200
4	Латунь полированная	170
5	Латунь окисленная	250
6	Нержавеющая сталь полированная	300
7	Медь полированная	320
8	Медь окисленная	150
9	Золото полированное	200
10	Серебро полированное	170
11	Сталь полированная	250
12	Сталь окисленная	300
13	Бетон	320
14	Кирпич красный	150
15	Кирпич белый с	200
16	Дерево	127
17	Дерево, окрашенное масляной краской	120
18	Железо, окрашенное алюминиевой краской	130
19	Железо эмалированное белое	170
20	Шифер	150

Приложение 1. Степень черноты различных материалов

Материал	Степень черноты ε
Алюминий полированный	0,04
Алюминий окисленный	0,3
Латунь полированная	0,03
Латунь окисленная	0,6
Нержавеющая сталь полированная	0,25
Медь полированная	0,02
Медь окисленная	0,7
Золото полированное	0,02
Серебро полированная	0,01
Сталь полированная	0,07
Сталь окисленная	0,8
Бетон	0,94
Кирпич красный	0,93
Кирпич белый силикатный	0,29
Дерево	0,9
Краска масляная	0,95
Краска алюминиевая	0,6
Эмаль белая	0,9
Шифер	0,7
Толь кровельный	0,93

11 Теплопередача

Наиболее часто встречающийся случай теплообмена – теплообмен от одной жидкости (греющей) к другой (нагреваемой) через разделительную стенку. Этот случай является сложным процессом, в него входят теплопроводность и теплоотдача. Вначале происходит теплоотдача от греющей жидкости с температурой t_1 к стенке с температурой t_{c1} ; далее тепловой поток распространяется теплопроводностью к противоположной стенке с температурой t_{c2} , далее от этой стенки происходит теплоотдача к нагреваемой жидкости с температурой t_2 .



Плотность теплового потока для однослойной стенки будет равна:

$$q = \frac{t_1 - t_2}{\frac{1}{\alpha_1} + \frac{\delta}{\lambda} + \frac{1}{\alpha_2}} = K(t_1 - t_2) \frac{\text{Вт}}{\text{м}^2};$$

здесь:

t_1 – температура греющей жидкости

t_2 – температура нагреваемой жидкости,

α_1 - коэффициент теплоотдачи от греющей жидкости к стенке,

α_2 - коэффициент теплоотдачи от стенки к нагреваемой жидкости,

λ – коэффициент теплопроводности материала стенки,

δ – толщина стенки.

K - коэффициент теплопередачи, характеризует интенсивность процесса теплопередачи от одного теплоносителя к другому через разделяющую их плоскую стенку:

$$K = \frac{1}{\frac{1}{\alpha_1} + \frac{\delta}{\lambda} + \frac{1}{\alpha_2}}, \quad \frac{\text{Вт}}{\text{м}^2 \cdot ^\circ\text{C}};$$

Значение, находящееся в знаменателе дроби, называют термическим сопротивлением теплопередачи:

$$R = \frac{1}{\alpha_1} + \frac{\delta}{\lambda} + \frac{1}{\alpha_2}$$

Температуры поверхностей стенок, в $^\circ\text{C}$, можно определить по формулам:

$$t_{\text{ст } 1} = t_1 - \frac{q}{\alpha_1};$$

$$t_{\text{ст } 2} = t_2 + \frac{q}{\alpha_2}.$$

Рассмотрим теплопередачу через стенку цилиндрической трубы длиной l , внутренним диаметром d_1 и внешним диаметром d_2 . Стенка однородна и имеет коэффициент теплопроводности λ . Внутри трубы протекает горячая среда с температурой t_1 , снаружи - холодная среда с температурой t_2 . Коэффициент теплоотдачи со стороны горячей среды равен α_1 , а со стороны холодной среды - α_2 .

Удельный тепловой поток (на один метр длины трубы) определяется по формуле:

$$q_l = \frac{\pi \cdot (t_1 - t_2)}{\frac{1}{\alpha_1 \cdot d_1} + \frac{1}{2\lambda} \cdot \ln \frac{d_2}{d_1} + \frac{1}{\alpha_2 \cdot d_2}} = K_l \cdot \pi \cdot (t_1 - t_2), \quad \frac{\text{Вт}}{\text{м}}.$$

Линейный коэффициент теплопередачи (на один метр длины трубы) K_l определяется по формуле:

$$K_l = \frac{1}{\frac{1}{\alpha_1 \cdot d_1} + \frac{1}{2\lambda} \cdot \ln \frac{d_2}{d_1} + \frac{1}{\alpha_2 \cdot d_2}}, \quad \frac{\text{Вт}}{\text{м} \cdot ^\circ\text{C}}.$$

Величина, обратная линейному коэффициенту теплопередачи, называется линейным термическим сопротивлением теплопередачи и определяется по формуле:

$$R_l = \frac{1}{\alpha_1 \cdot d_1} + \frac{1}{2\lambda} \cdot \ln \frac{d_2}{d_1} + \frac{1}{\alpha_2 \cdot d_2}, \quad \frac{\text{м} \cdot ^\circ\text{C}}{\text{Вт}}.$$

Температуры внутренней и наружной поверхностей трубы $t_{\text{ст}1}$ и $t_{\text{ст}2}$ можно определить по формуле:

$$t_{\text{ст}1} = t_1 - \frac{q_l}{\pi} \cdot \frac{1}{\alpha_1 \cdot d_1}, \quad ^\circ\text{C};$$

$$t_{\text{ст}2} = t_1 - \frac{q_l}{\pi} \left(\frac{1}{\alpha_1 \cdot d_1} + \frac{1}{2\lambda} \cdot \ln \frac{d_2}{d_1} \right) = t_2 + \frac{q_l}{\pi} \cdot \frac{1}{\alpha_2 \cdot d_2}, \quad ^\circ\text{C}.$$

Пример 11.1

Определить удельный тепловой поток от продуктов сгорания топлива к воздуху через кирпичную стенку котла толщиной $\delta = 250$ мм, если их температура $t_1 = 600^\circ\text{C}$, температура воздуха $t_2 = 30^\circ\text{C}$, коэффициент теплоотдачи от газов к внутренней поверхности стенки $\alpha_1 = 23,6 \frac{\text{Вт}}{\text{м} \cdot ^\circ\text{C}}$, от наружной поверхности стенки к воздуху $\alpha_2 = 9,3 \frac{\text{Вт}}{\text{м} \cdot ^\circ\text{C}}$, и коэффициент теплопроводности стенки $\lambda = 0,81 \frac{\text{Вт}}{\text{м} \cdot ^\circ\text{C}}$. Определить также температуры внутренней и внешней поверхностей стенки.

Решение:

Определяем коэффициент теплопередачи для плоской стенки:

$$K = \frac{1}{\frac{1}{\alpha_1} + \frac{\delta}{\lambda} + \frac{1}{\alpha_2}} = \frac{1}{\frac{1}{23,6} + \frac{0,25}{0,81} + \frac{1}{9,3}} = 2,18 \frac{\text{Вт}}{\text{м}^2 \cdot ^\circ\text{C}}.$$

Определяем удельный тепловой поток через плоскую стенку:

$$q = K(t_1 - t_2) = 2,18(600 - 30) = 1243 \frac{\text{Вт}}{\text{м}^2}.$$

Определяем температуру на внутренней поверхности котла:

$$t_{\text{ст } 1} = t_1 - \frac{q}{\alpha_1} = 600 - \frac{1243}{9,3} = 547^\circ\text{C}.$$

Определяем температуру на наружной поверхности котла:

$$t_{\text{ст } 2} = t_2 + \frac{q}{\alpha_2} = 30 + \frac{1243}{9,3} = 164^\circ\text{C}.$$

Ответ: Тепловой поток от продуктов сгорания топлива к воздуху $1243 \frac{\text{Вт}}{\text{м}^2}$, температура на внутренней поверхности стенки котла 547°C , на наружной поверхности - 164°C .

Задача 11.1

Определить потери тепла через пластиковое окно размером $2\text{ м} \times 2\text{ м}$ если температура наружного воздуха равна $t_n = -30^\circ\text{C}$, температура внутри помещения $t_{\text{вн}} = +18^\circ\text{C}$, сопротивлений теплопередаче $R = 0,18 \frac{\text{м} \cdot ^\circ\text{C}}{\text{Вт}}$.

Примечание: приведенное в таблице сопротивление теплопередаче есть величина, обратная коэффициенту теплопередачи $R = \frac{1}{K}$.

Варианты заданий:

Тип окна, по таблице 2	Размер окна, м	$t_n, ^\circ\text{C}$
2	1,5× 2	-25
3	1,7× 2	-20
4	2× 2,5	-15
5	2× 3	-10
6	2× 4	-5
7	1,5× 2	-25
8	1,7× 2	-20
9	2× 2,5	-15
10	2× 3	-10
11	2× 4	-5
12	1,5× 2	-25
13	1,7× 2	-20
14	2× 2,5	-15
15	2× 3	-10
16	2× 4	-5
1	1,5× 2	-10
2	1,7× 2	-5
3	2× 2,5	-25
4	2× 3	-20

Таблица 2. Сопротивление теплопередаче различных конструкций окон

Тип окна	Сопротивление теплопередаче $R_{o,пр}$, $m^2 \cdot ^\circ C / Bt$		
	из обычного стекла	с селективным покрытием	
		твердым	мягким
1. Одинарное остекление в деревянных переплетах	0,18	-	-
2. Одинарное остекление в алюминиевых переплетах	0,15	-	-
3. Двойное остекление в алюминиевых отдельных переплетах	0,34	-	-
4. Двойное остекление в алюминиевых отдельных переплетах	0,31	-	-
5. Блоки стеклянные пустотелые без переплета с шириной швов между ними 6 мм,	0,31	-	-
6. Блоки стеклянные пустотелые без переплета	0,33	-	-
7. Двойное остекление в спаренных переплетах	0,40	0,55	-
8. Двойное остекление в отдельных переплетах	0,44	0,57	-
9. Тройное остекление в отдельно-спаренных переплетах	0,55	0,60	-
10. Однокамерный стеклопакет в одинарном переплете	0,38	0,51	0,56
11. Двухкамерный стеклопакет в одинарном переплете с межстекольным расстоянием 12 мм	0,54	0,58	0,68
12. Стекло и однокамерный стеклопакет в отдельных переплетах	0,56	0,65	0,72
13. Стекло и двухкамерный стеклопакет в отдельных переплетах	0,68	0,74	0,81
14. Два однокамерных стеклопакета в спаренных переплетах	0,70	-	-
15. Два однокамерных стеклопакета в отдельных переплетах	0,74	-	-
16. Четыре стекла в двух спаренных переплетах	0,80	-	-
Примечание: в позициях 7-17 переплеты деревянные или пластмассовые.			

Литература:

1. О.Н.Брюханов, А.Т.Мелик-Аракелян, В.И.Коробко Основы гидравлики и теплотехники. – М., Издательский центр «Академия», 2006 г.. – 253с. – 253с.
2. О.Н.Брюханов, В.И.Коробко, А.Т.Мелик-Аракелян Основы гидравлики, теплотехники и аэродинамики. – М., ИНФА-М, 2005 г. – 240 с.
3. В.В.Бухмиров, Г.Н.Щербакова, А.В.Пекунова Теоретические основы теплотехники в примерах и задачах. Учебное пособие. – Иваново, 2013. – 128с.
4. В.В.Бухмиров, Д.В.Ракутина, Ю.С.Солнышкова Справочные материалы для решения задач по курсу «теплообмен». Учебное пособие. – Ивановский Государственный энергетический университет, 1996 г. – 104 с.