

Документ подписан простой электронной подписью
Информация о владельце:
ФИО: Емельянов Сергей Геннадьевич
Должность: ректор
Дата подписания: 19.09.2024 10:01:07
Уникальный программный ключ:
9ba7d3e34c012eba476ffd2d064cf2781953be730df2374d16f3c0ce536f0fc6

МИНОБРНАУКИ РОССИИ

Федеральное государственное бюджетное
образовательное учреждение высшего образования
«Юго-Западный государственный университет»
(ЮЗГУ)

Кафедра инфраструктурных энергетических систем

УТВЕРЖДАЮ

Проректор по учебной работе

О.Г. Доктионова

«28» 08 (ЮЗГУ) 2024 г.



ТЕХНИЧЕСКАЯ ТЕПЛОТЕХНИКА

Методические указания к практическим занятиям и
самостоятельной работе студентов направления подготовки
08.05.01 «Строительство уникальных зданий и сооружений» очной
и заочной форм обучения

Курск 2024

УДК 536.2, 536.3, 536.7

Составитель: В.А. Жмакин

Рецензент

Кандидат технических наук, доцент кафедры
инфраструктурных энергетических систем Н.Е. Семичева

Техническая теплотехника: методические указания к
практическим занятиям и для самостоятельной работы студентов
направления подготовки 08.05.01 «Строительство уникальных
зданий и сооружений» очной и заочной форм обучения / Юго-
Зап. гос. ун-т; сост.: В.А. Жмакин. – Курск, 2024. – 46 с.: ил. 13,
табл. 18, прилож. 8. – Библиогр.: с. 39.

Приводятся задания к практическим занятиям и для
самостоятельной работы по технической теплотехнике и
методики решения задач, а также необходимый справочный
материал в виде таблиц и диаграмм.

Методические указания предназначены для студентов
направления подготовки 08.05.01 «Строительство уникальных
зданий и сооружений» очной и заочной форм обучения и могут
быть использованы студентами как для аудиторных практических
занятий, так и для самостоятельной работы.

Текст печатается в авторской редакции

Подписано в печать 28.08.24. Формат 60x84 1/16.
Усл. печ.л. 2,67. Уч. изд.л. 2,42. Тираж 50 экз. Заказ 788 .
Бесплатно.

Юго-Западный государственный университет.
305040, г. Курск, ул. 50 лет Октября, 94.

Содержание

Общие методические рекомендации	4
Задача № 1: Уравнение состояния идеального газа	4
Задача № 2: Смесь идеальных газов	5
Задача № 3: Теплоемкость газов	7
Задача № 4: Термодинамический газовый процесс	8
Задача № 5: Расчет цикла поршневого компрессора	11
Задача № 6: Расчет цикла поршневого двигателя внутреннего сгорания	15
Задача № 7: Процессы изменения состояния водяного пара	21
Задача № 8: Процессы изменения состояния влажного воздуха	24
Задача № 9: Теплообмен теплопроводностью	27
Задача № 10: Лучистый теплообмен. Экранирование	29
Задача № 11: Лучисто-конвективный сложный теплообмен	32
Задача № 12: Теплопередача	35
Библиографический список	39
Приложения	40
Таблица П.1 – Физические константы некоторых газов	40
Таблица П.2 – Интерполяционные формулы для истинных и средних молярных теплоемкостей газов при $P=Const$	40
Рисунок П.1 – $h-s$ диаграмма состояния водяного пара	41
Рисунок П.2 – $h-d$ диаграмма состояния влажного воздуха при атмосферном давлении $B=745$ мм рт.ст.	42
Таблица П.3 – Физические свойства воздуха при атмосферном давлении $B=1,013 \cdot 10^5$ Па	43
Таблица П.4 – Степень черноты для различных материалов	44
Таблица П.5 – Физические свойства воды на линии насыщения	45
Таблица П.6 – Физические свойства некоторых металлов	46

ОБЩИЕ МЕТОДИЧЕСКИЕ РЕКОМЕНДАЦИИ

1. Работа должна выполняться самостоятельно, после проработки соответствующих теоретических разделов курса.

2. Перед решением задач необходимо разобрать условие задачи и по последней и предпоследней цифрам учебного шифра выбрать в таблицах свои исходные данные.

3. При выполнении расчетной работы расчеты необходимо оформить в следующем виде: расчетная формула — формула с числовыми значениями всех входящих величин — результат вычисления (результаты промежуточных расчетов по формуле не приводить!) — единицы измерения рассчитываемой величины.

Задача № 1: Уравнение состояния идеального газа

Определить массовый расход газа G кг/с при известном объемном расходе V м³/мин, температуре t °С и манометрическом давлении P_m кПа. Барометрическое давление $B=98100$ Па. Исходные данные взять из таблицы 1.1 согласно варианту задания.

Таблица 1.1- Исходные данные к расчету

Последняя цифра шифра	Газ	V , м ³ /мин	Предпоследняя цифра шифра	t , °С	P_m , кПа
0	СО	0,4	0	80	40
1	СО ₂	0,5	1	65	42
2	N ₂	0,6	2	70	50
3	Воздух	0,1	3	75	70
4	O ₂	0,5	4	85	45
5	СО ₂	0,4	5	80	50
6	СН ₄	0,2	6	70	60
7	Воздух	0,3	7	75	72
8	O ₂	0,4	8	65	80
9	N ₂	0,2	9	85	55

Исходные данные: $V=...$, м³/мин; $t=...$, °С; $P_m=...$, кПа; газ - ...

Решение:

1. Перевод единицы измерения объемного расхода газа из м³/мин в м³/с:

$$V = V/60 = \quad \text{м}^3/\text{с}. \quad (1.1)$$

2. Абсолютное давление газа:

$$P = B + 1000 P_m = \text{Па.} \quad (1.2)$$

3. Массовый расход газа (из уравнения состояния идеального газа $p V = G R T$):

$$G = P \cdot V / (R \cdot T) = \text{кг/с,} \quad (1.3)$$

где P , Па — абсолютное давление газа; V , м³/с — объемный расход газа; R — индивидуальная газовая постоянная, Дж/(кг К);

$$R = 8314 / \mu = \text{Дж/(кг К)} \quad (1.3.1)$$

μ — молекулярная масса газа, кг/кмоль (см. Прилож. табл. П.1);

T — абсолютная температура газа, К:

$$T = t + 273 = \text{К} \quad (1.3.2)$$

Задача № 2: Смесь идеальных газов

Смесь газов, для которой известен объемный состав: находится при давлении $P_{см.}$ и температуре $t_{см.}$. Определить молекулярную массу смеси и ее газовую постоянную, плотность и удельный объем смеси при заданных условиях и при нормальных условиях, а также парциальные давления компонентов смеси.

Таблица 2.1 - Исходные данные к расчету

Посл. цифра шифра	$P_{см.}$, мм рт.ст.	$t_{см.}$, °С	Предпол. цифра шифра	Объемный состав смеси, %			
				N ₂	O ₂	CO ₂	H ₂ O
0	748	150	0	40	20	30	10
1	750	250	1	50	25	13	12
2	760	350	2	60	30	2	8
3	740	450	3	70	25	1	4
4	752	150	4	80	10	5	5
5	758	250	5	85	11	3	1
6	760	150	6	75	17	4	4
7	768	100	7	65	23	4	8
8	770	100	8	55	27	8	10
9	768	200	9	45	22	18	15

Исходные данные: $r_{N_2} = \dots \%$; $r_{O_2} = \dots \%$; $r_{CO_2} = \dots \%$;
 $r_{H_2O} = \dots \%$; $t_{см.} = \dots \text{ }^\circ\text{C}$; $P_{см.} = \dots \text{ мм рт. ст.}$

Решение:

1. Перевод единицы измерения давления из мм рт. ст. в Па:

$$P_{см.} = P_{см.рт.ст.} \cdot 133,3 = \quad \text{Па}; \quad (2.1)$$

2. Кажущаяся молекулярная масса смеси:

$$\mu_{см.} = (\mu_{N_2} \cdot r_{N_2}) + (\mu_{O_2} \cdot r_{O_2}) + (\mu_{CO_2} \cdot r_{CO_2}) + (\mu_{H_2O} \cdot r_{H_2O}) = \quad \text{кг/кмоль}, \quad (2.2)$$

где $\mu_{N_2} = 28$, $\mu_{O_2} = 32$, $\mu_{CO_2} = 44$, $\mu_{H_2O} = 18$ — молекулярные массы азота, кислорода, углекислого газа и водяного пара, кг/кмоль;
 r_{N_2} , r_{O_2} , r_{CO_2} , r_{H_2O} — объемные доли компонентов смеси (в долях единицы).

3. Газовая постоянная смеси:

$$R_{см.} = 8314 / \mu_{см.} = \quad \text{Дж/(кг К)}. \quad (2.3)$$

4. Удельный объем смеси (из уравнения состояния $P_{см.} \cdot v_{см.} = R_{см.} T_{см.}$) и плотность смеси при заданных условиях:

$$v_{см.} = R_{см.} T_{см.} / P_{см.} = \quad \text{м}^3/\text{кг} \quad (2.4.1)$$

$$\rho_{см.} = 1 / v_{см.} = \quad \text{кг/м}^3, \quad (2.4.2)$$

где $P_{см.}$ — давление смеси, Па;
 $T_{см.}$ — абсолютная температура смеси:

$$T_{см.} = t_{см.} + 273 = \quad \text{К} \quad (2.5)$$

5. Удельный объем смеси $v_{см.0}$ и плотность смеси $\rho_{см.0}$ при нормальных условиях:

$$v_{см.0} = R_{см.} T_{см.0} / P_{см.0} = \quad \text{м}^3/\text{кг} \quad (2.6.1)$$

$$\rho_{см.0} = 1 / v_{см.0} = \quad \text{кг/м}^3, \quad (2.6.2)$$

где $P_{см.0} = 1,013 \cdot 10^5$ Па и $T_{см.0} = 273$ К — давление смеси и ее абсолютная температура при нормальных условиях.

6. Парциальные давления компонентов смеси:

$$P_{N_2} = P_{см.} \cdot r_{N_2} = \quad \text{Па}; \quad (2.7.1)$$

$$P_{O_2} = P_{см.} \cdot r_{O_2} = \quad \text{Па}; \quad (2.7.2)$$

$$P_{CO_2} = P_{см.} \cdot r_{CO_2} = \quad \text{Па}; \quad (2.7.3)$$

$$P_{H_2O} = P_{см.} \cdot r_{H_2O} = \quad \text{Па}, \quad (2.7.4)$$

где r_{N_2} , r_{O_2} , r_{CO_2} , r_{H_2O} — объемные доли компонентов смеси (в долях

единицы).

Задача № 3: Теплоемкость газов

Определить средние массовые и объемные теплоемкости газа при условии $P=\text{Const}$ и $v=\text{Const}$ в интервале температур $t_1 \div t_2$. Вычислить также удельную теплоту изохорного процесса для данного интервала температур, считая зависимость теплоемкости от температуры линейной.

Таблица 3.1 - Исходные данные к расчету
(по последней цифре шифра)

Шифр	0	1	2	3	4	5	6	7	8	9
Газ	O ₂	N ₂	CO ₂	SO ₂	H ₂ O	H ₂	N ₂	O ₂	N ₂	CO
t ₁ , °C	50	120	55	20	25	18	22	28	30	45
t ₂ , °C	250	350	300	450	400	150	180	220	280	150

Исходные данные: t₁ = ... °C; t₂ = ... °C; газ -

Решение:

1. Средняя изобарная мольная теплоемкость газа, μC_{pm} , в интервале температур $t_1 \div t_2$ (выбираем формулу $\mu C_{pm} =$ по Прилож., табл. П.2 для заданного газа, среднюю):

$$\mu C_{pm} = \quad \text{кДж}/(\text{К} \cdot \text{кмоль}), \quad (3.1)$$

где $t = t_1 + t_2 = \quad , ^\circ\text{C}$ — определяющая температура.

2. Средняя изохорная мольная теплоемкость газа в интервале температур $t_1 \div t_2$ (из уравнения Майера):

$$\mu C_{vm} = \mu C_{pm} - 8,314 = \quad \text{кДж}/(\text{К} \cdot \text{кмоль}), \quad (3.2)$$

где 8,314 — универсальная газовая постоянная, кДж/(кмоль·К).

3. Средние массовые изобарная и изохорная теплоемкости газа в интервале температур $t_1 \div t_2$:

$$C_{pm} = \mu C_{pm} / \mu = \quad \text{кДж}/(\text{кг} \cdot \text{К}); \quad (3.3.1)$$

$$C_{vm} = \mu C_{vm} / \mu = \quad \text{кДж}/(\text{кг} \cdot \text{К}); \quad (3.3.2)$$

где μ — молекулярная масса газа, кг/кмоль, (см. Прилож., табл.П.1).

4. Средние объемные изобарная и изохорная теплоемкости

газа в интервале температур $t_1 \div t_2$:

$$C'_{pm} = \mu C_{pm} / V_{\mu} = \text{кДж}/(\text{нм}^3 \cdot \text{К}); \quad (3.4.1)$$

$$C'_{vm} = \mu C_{vm} / V_{\mu} = \text{кДж}/(\text{нм}^3 \cdot \text{К}); \quad (3.4.2)$$

где $V_{\mu} = 22,4$ — объем одного кмоль газа при нормальных условиях, $\text{м}^3/\text{кмоль}$.

5. Удельная теплота изохорного процесса:

$$q = C_{vm} \cdot (t_2 - t_1) = \text{кДж}/\text{кг}. \quad (3.5)$$

Задача № 4: Термодинамический газовый процесс

Газ объемом $V_1 \text{ м}^3$ с начальным давлением P_1 и начальной температурой t_1 сжимается до изменения объема в ε раз ($\varepsilon = v_1/v_2$). Сжатие происходит политропное с показателем политропы n . Определить массу газа, конечные объем, давление и температуру газа, работу сжатия, количество отведенного тепла, изменения внутренней энергии, энтальпии и энтропии газа. (При расчете процесса принять теплоемкость газа не зависящей от температуры, т.е. $C = \text{const}$).

Изобразить процесс сжатия в P - v и T - s координатах и обозначить основные термодинамические процессы.

Таблица 4.1 - Исходные данные к расчету

Последняя цифра шифра	Газ	$V_1, \text{ м}^3$	$P_1, \text{ МПа}$	Предпол. цифра шифра	ε	$t_1, \text{ }^\circ\text{C}$	n
0	CO ₂	50	0,1	0	10	10	1,35
1	N ₂	55	0,15	1	8	15	1,32
2	H ₂	60	0,17	2	7	17	1,20
3	O ₂	65	0,12	3	12	20	1,25
4	воздух	70	0,11	4	15	25	1,3
5	N ₂	45	0,14	5	17	30	1,22
6	H ₂	40	0,18	6	10	5	1,18
7	воздух	30	0,2	7	13	15	1,28
8	CO	50	0,19	8	9	25	1,26
9	O ₂	60	0,15	9	15	35	1,38

Исходные данные: газ -....; $V_1 = \dots \text{ м}^3$; $P_1 = \dots \text{ МПа}$; $\varepsilon = \dots$; $t_1 = \dots \text{ }^\circ\text{C}$; $n = \dots$

Решение:

Изображаем процесс в P - v и T - s координатах, см. рис. 4.1.

По условию задачи исследуемый процесс — процесс сжатия с показателем политропы в пределах от 1 до k ($k=1,4$), следовательно, в P - v координатах процесс расположен в области сжатия между изотермическим процессом ($n=1$) и адиабатным процессом ($n=k$), процесс 1-2. Отмечаем в виде площадей работу процесса (в P - v координатах) и теплоту процесса (в T - s координатах) с их знаками.

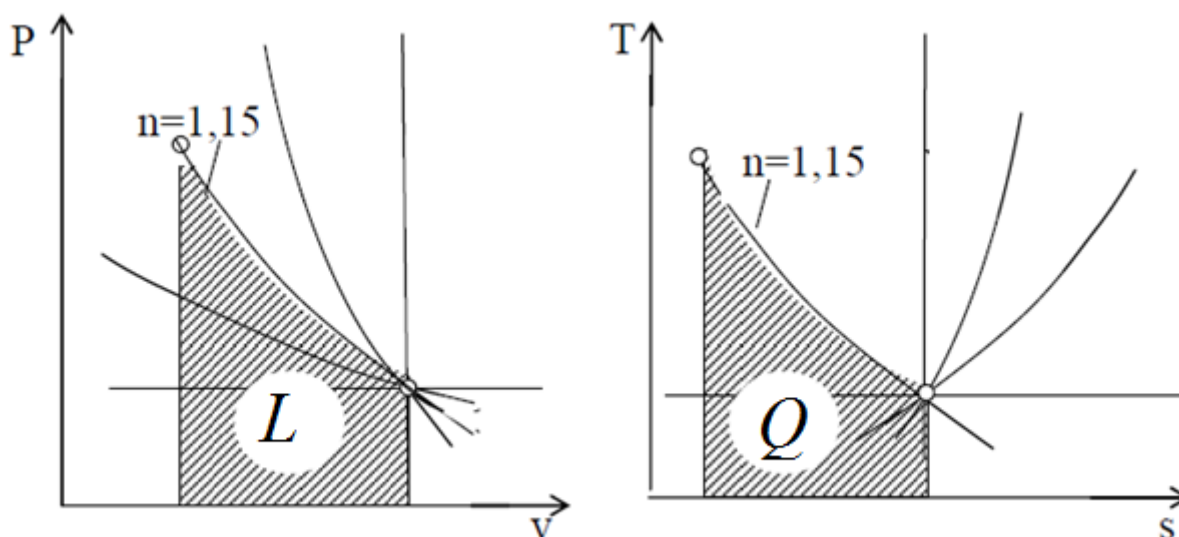


Рисунок 4.1 – Политропический процесс сжатия в P - v и T - s координатах

Решение:

1. Масса газа (из уравнения состояния) :

$$m = (P_1 \cdot V_1) / (R \cdot T_1) = \quad \text{кг}, \quad (4.1)$$

где P_1 — давление в точке 1, Па ($1 \text{ МПа} = 10^6 \text{ Па}$);

V_1 — объем в первой точке, м^3 ;

R — индивидуальная газовая постоянная, Дж/кг·К:

$$R = 8314 / \mu = \quad \text{Дж}/(\text{кг} \cdot \text{К}); \quad (4.1.1)$$

μ — молекулярная масса газа, кг/кмоль (см. Прилож., табл.П.1);

T_1 — абсолютная температура в первой точке, К:

$$T_1 = 273 + t_1 = \quad \text{К} \quad (4.1.2)$$

2. Определяем недостающие параметры состояния в т.т.1 и 2.

а) полный и удельный объемы газа в конечной точке (т.2)

$$V_2 = V_1 / \varepsilon = \quad \text{м}^3; \quad (4.2.1)$$

$$v_2 = V_2 / m = \quad \text{м}^3/\text{кг}; \quad (4.2.2)$$

б) удельный объем газа в начальной точке (т.1):

$$v_1 = V_1/m = \text{м}^3/\text{кг}; \quad (4.2.3)$$

в) давление и температуру газа в конце сжатия определяем из формул соотношения между параметрами политропного процесса:

$$P_2/P_1 = (v_1/v_2)^n; \quad (4.2.4)$$

$$T_2/T_1 = (P_2/P_1)^{(n-1)/n}; \quad (4.2.5)$$

$$T_2/T_1 = (v_1/v_2)^{n-1}. \quad (4.2.6)$$

Давление в конце сжатия:

$$P_2 = P_1 (v_1/v_2)^n = P_1 \cdot \varepsilon^n = \text{МПа}; \quad (4.2.7)$$

Температура в конце сжатия:

$$T_2 = T_1 (v_1/v_2)^{n-1} = T_1 \cdot \varepsilon^{n-1} = \text{К}, \quad (4.2.8)$$

где P_1 , T_1 — см. п.1; и n — см. условие задачи.

3. Определяем теплоемкость политропного процесса:

$$C = C_v (n-k)/(n-1), \text{ кДж}/(\text{кг} \cdot \text{К}). \quad (4.3)$$

где n — показатель политропы; k — показатель адиабаты ($k = C_p/C_v$), C_p и C_v — массовые теплоемкости газа.

По условию $C = \text{const}$, т.е. теплоемкость не зависит от температуры. В этом случае она зависит только от числа атомов в молекуле газа. Для двухатомных газов (N_2 , H_2 , O_2 , H_2 , CO , воздух) значения мольных теплоемкостей $\mu C_p = 29,31 \cdot \text{кДж}/(\text{кмоль К})$ и $\mu C_v = 20,93 \text{ кДж}/(\text{кмоль К})$; для многоатомных газов (CO_2 , H_2O , SO_2 , CH_4) — $\mu C_p = 37,68 \text{ кДж}/(\text{кмоль К})$ и $\mu C_v = 29,31 \text{ кДж}/(\text{кмоль К})$.

Массовые изобарная и изохорная теплоемкости газа равны:

$$C_p = \mu C_p / \mu = \text{кДж}/(\text{кг} \cdot \text{К}); \quad (4.3.1)$$

$$C_v = \mu C_v / \mu = \text{кДж}/(\text{кг} \cdot \text{К}), \quad (4.3.2)$$

И окончательно теплоемкость политропного процесса:

$$C = C_v (n-k)/(n-1) = \text{кДж}/(\text{кг} \cdot \text{К}).$$

4. Изменения внутренней энергии газа (ΔU), энтальпии (ΔH) и энтропии (ΔS):

$$\Delta U = m C_v (t_2 - t_1) = \text{кДж}; \quad (4.4.1)$$

$$\Delta H = m C_p (t_2 - t_1) = \text{кДж}; \quad (4.4.2)$$

$$\Delta S = m C \ln(T_2/T_1) = \text{кДж}/\text{К}, \quad (4.4.3)$$

где C — теплоемкость политропического процесса, см. п. 3.

5. Теплота процесса:

$$Q = m C (t_2 - t_1) = \text{кДж} \quad (4.5)$$

6. Работа процесса:

$$L = m R (T_1 - T_2) / (n - 1) = \quad \text{кДж} \quad (4.6)$$

7. Проверка решения по первому закону термодинамики:

$$Q = \Delta U + L = \quad \text{кДж} \quad (4.7)$$

(подставить результаты расчета из пунктов 4, 5, 6).

Задача № 5: Расчет цикла поршневого компрессора

Поршневой 2-х ступенчатый компрессор производительностью V м³/мин засасывает атмосферный воздух при температуре t_1 °С и давлении P_1 бар и сжимает его до конечного давления P_k бар. Процессы сжатия в компрессоре адиабатные.

Определить: 1) давления воздуха по ступеням: P_1, P_2, P_k ; 2) температуру воздуха в конце сжатия T_2 ; 3) теоретическую мощность привода компрессора N ; 4) количество теплоты, отведенное от воздуха в промежуточных холодильниках 1-ой и 2-ступеней $Q_{\text{хол1}}, Q_{\text{хол2}}$; 5) расход воды на охлаждение $G_{\text{в}}$, если ее температура повышается на Δt °С. Как изменятся температура в конце сжатия, работа и расход воды на охлаждение, если сжатие будет происходить в одну ступень до того же конечного давления P_k ? Представить схему 2-х ступенчатого компрессора и процессы сжатия в P - v и T - s координатах.

Таблица 5.1 - Исходные данные к расчету

Последняя цифра шифра	P_1 , бар	t_1 , °С	Предпол. цифра шифра	V , м ³ /мин	P_k , бар	Δt , °С
0	1,0	10	0	3,0	8	13
1	0,8	15	1	10,0	25	8
2	0,9	20	2	8,5	9	10
3	0,98	25	3	3,5	36	12
4	1,00	30	4	10,0	36	20
5	0,89	5	5	4,0	15	18
6	0,90	0	6	4,5	20	15
7	1,00	15	7	9,0	14	16
8	1,00	25	8	6,0	8	12
9	0,98	35	9	10,0	10	25

Исходные данные: $P_1 = \dots$ бар; $P_k = \dots$ бар; $t_1 = \dots$ °C; $V_1 = \dots$ м³/мин;
 $\Delta t = \dots$ °C.

Решение:

Изображаем схему 2-х ступенчатого компрессора (рис. 5.1) и процессы сжатия в P - v и T - s координатах (см. рис.5.2).

1. Массовая производительность компрессора:

$$G = V \cdot \rho / 60 = \quad \text{кг/с}, \quad (5.1.1)$$

где $V = \dots$, м³/мин — объемная производительность компрессора;

ρ — плотность воздуха на входе в компрессор, кг/м³ :

$$\rho = P_1 / (R \cdot T_1) = \quad \text{кг/м}^3 \quad (5.1.2)$$

$R = 287$ Дж/(кг·К) — индивидуальная газовая постоянная для воздуха;

T_1 — абсолютная температура воздуха на входе в компрессор, К:

$$T_1 = 273 + t_1 = \quad \text{К}, \quad (5.1.3)$$

$P_1 = \dots$ Па (1 бар = 10^5 Па) — давление воздуха на входе в компрессор, Па.

2. Расчет работы компрессора в две ступени.

1) Степень увеличения давления по ступеням:

$$\lambda = (P_k / P_1)^{0,5} = \quad (5.2.1)$$

где $P_k = \dots$ и $P_1 = \dots$ бар — конечное давление сжатия и давление при всасывании.

2) Давления по ступеням: 1-я ступень: давление воздуха на входе $P_1 = \dots$ бар, на выходе:

$$P_2 = P_1 \cdot \lambda = \quad \text{бар}; \quad (5.2.2)$$

2-я ступень: давление воздуха на входе $P_2 = \dots$ бар, на выходе из цилиндра $P_k = \dots$ бар.

3) Температура воздуха в конце сжатия:

$$T_2 = T_1 \lambda^{(k-1)/k} = \quad \text{К}; \quad (5.2.3)$$

$$t_2 = T_2 - 273 = \quad \text{°C}, \quad (5.2.3.1)$$

где $T_1 = \dots$ К (см. п.1); $k = 1,4$ — показатель адиабаты для воздуха.

4) Теоретическая работа привода компрессора 1-й ступени:

$$\ell_{\text{ад}} = k \cdot R \cdot T_1 [\lambda^{(k-1)/k} - 1] / (k-1) = \quad \text{Дж/кг}, \quad (5.2.4)$$

5) Работа 2-х ступенчатого компрессора:

$$\ell_k = \ell_{\text{ад}} \cdot z = \quad \text{Дж/кг}, \quad (5.2.5)$$

где $z = 2$ — число ступеней.

6) Мощность привода компрессора

$$N = G \cdot \ell_k = \text{Вт}, \quad (5.2.6)$$

где $G =$ кг/с — производительность компрессора (см. п.1).

7) Количество теплоты, отводимое от воздуха в холодильниках 1-й и 2-й ступеней.

Исходя из условий многоступенчатого сжатия, теплота, отводимая от воздуха в каждом из холодильников будет одинаковой, т.е. $Q_{\text{хол1}} = Q_{\text{хол2}}$, а общее количество отведенного тепла от ступеней компрессора:

$$Q_{\text{хол}} = z \cdot Q_{\text{хол1}} = z \cdot G \cdot c_p \cdot (t_2 - t_1) = \text{Вт}, \quad (5.2.7)$$

где $z=2$ — число холодильников;

$c_p = 1005$ Дж/(кг·К) — теплоемкость воздуха;

t_1 и t_2 , °С — температуры воздуха на входе в холодильники и на выходе из них, соответственно.

8) Расход воды на охлаждение воздуха в холодильниках 1-й и 2-й ступеней:

$$G_B = Q_{\text{хол}} / (c_B \cdot \Delta t) = \text{кг/с}, \quad (5.2.8)$$

где $Q_{\text{хол}}$ — количество теплоты, которое забирает вода от воздуха в холодильнике (см. предыдущий пункт);

$c_B = 4186$ Дж/(кг·К) — удельная массовая теплоемкость воды;

$\Delta t =$ °С — увеличение температуры воды при прохождении ее через холодильник (см. задание).

3. Расчет компрессора, в котором сжатие происходит в одну ступень до того же конечного давления P_k .

На рис. 5.2 процесс сжатия воздуха в одну ступень изображается линией 1-2*.

1) Степень увеличения давления:

$$\lambda^* = P_k / P_1 = \quad (5.3.1)$$

где $P_k =$ и $P_1 =$ бар — конечное давление сжатия и давление всасывания.

2) Температура воздуха в конце сжатия.

$$T_2^* = T_1 \lambda^{*(k-1)/k} = \text{К}; \quad (5.3.2)$$

$$t_2^* = T_2^* - 273 = \text{°С}, \quad (5.3.2.1)$$

где $T_1 =$ К, (см.п.1); $k=1,4$ — показатель адиабаты для воздуха.

3) Теоретическая работа привода компрессора:

$$\ell_k^* = k R \cdot T_1 [\lambda^{*(k-1)/k} - 1] / (k-1) = \text{Дж/кг}, \quad (5.3.3)$$

где $R=287$ Дж/(кг·К) — индивидуальная газовая постоянная для воздуха.

4) Мощность привода компрессора:

$$N^* = G \ell_k^* = \text{Вт}, \quad (5.3.4)$$

где $G =$ кг/с — производительность компрессора.

5) Количество теплоты, отводимое от воздуха в холодильнике:

$$Q_{\text{хол}}^* = G \cdot c_p \cdot (t_2^* - t_1) = \text{Вт}, \quad (5.3.5)$$

где $G =$ кг/с — производительность компрессора; $c_p = 1005$ Дж/(кг·К) теплоемкость воздуха; t_2^* и $t_1 =$ °С — температуры воздуха на входе в холодильник и на выходе из него, соответственно.

6) Расход воды на охлаждение воздуха в холодильнике:

$$G_B^* = Q_{\text{хол}}^* / (c_B \Delta t) = \text{кг/с}, \quad (5.3.6)$$

где $Q_{\text{хол}}^*$ — количество теплоты, которое забирает вода от воздуха в холодильнике (см. предыдущий пункт);

$c_B = 4186$ Дж/(кг·К) — удельная массовая теплоемкость воды;

$\Delta t =$ °С — увеличение температуры воды при прохождении ее через холодильник (см. задание).

Полученные результаты сводим в таблицу сравнительных данных и сравниваем между собой.

Таблица 5.2 - Таблица сравнительных данных

Наименование величины	2-х ступенчатое сжатие	Одноступенчатое сжатие до давления P_K
Температура в конце сжатия, °С	$t_2 =$	$t_2^* =$
Теоретическая мощность привода компрессора, Вт	$N =$	$N^* =$
Расход воды на охлаждение, кг/с	$G_B =$	$G_B^* =$

Из таблицы видно, что работа компрессора в две ступени по всем показателям экономичнее, чем при работе компрессора в одну ступень при одинаковом конечном давлении сжатия.

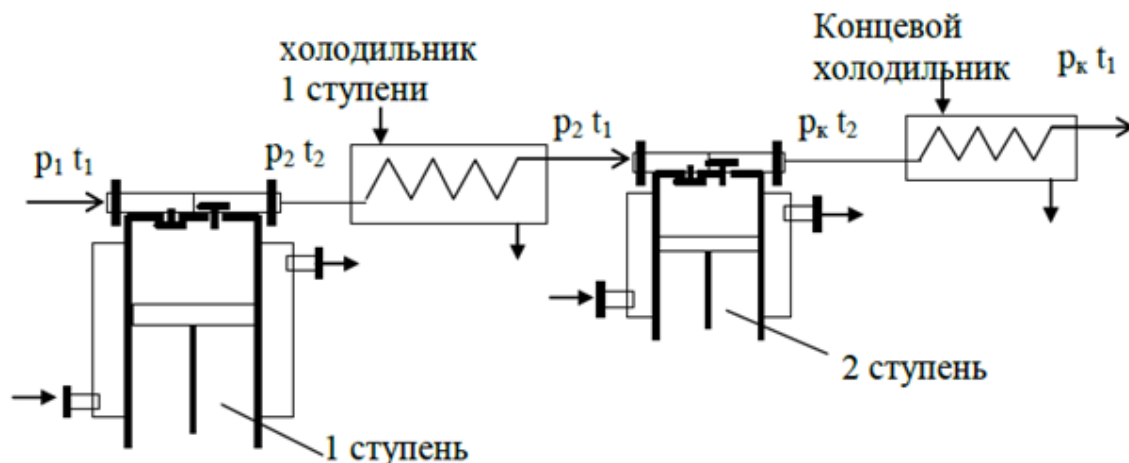


Рисунок 5.1 – Схема двухступенчатого поршневого компрессора

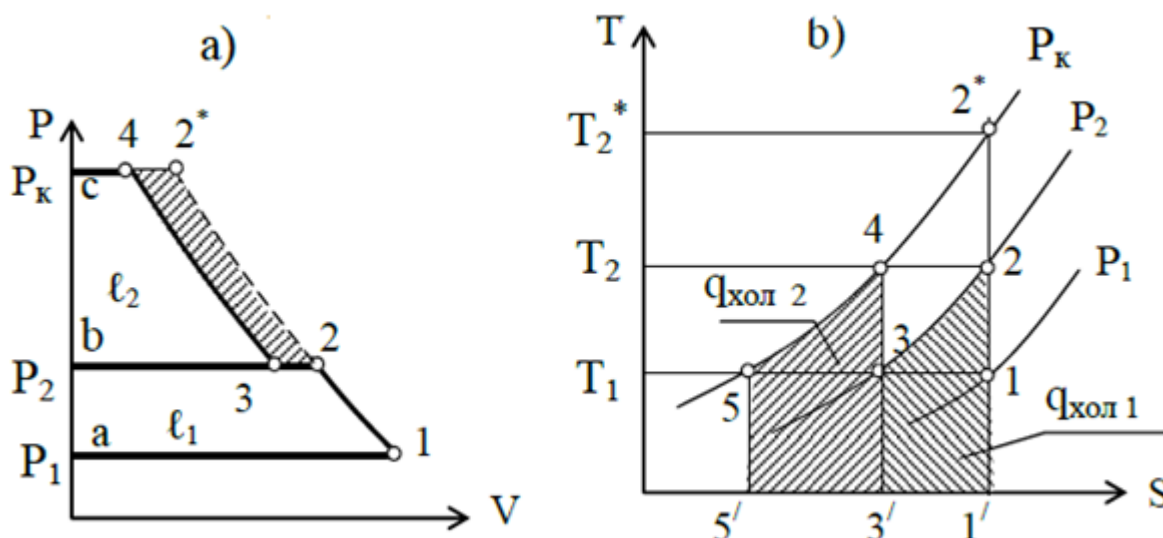


Рисунок 5.2 – Процессы сжатия газа в двухступенчатом компрессоре

Задача 6: Расчет цикла поршневого двигателя внутреннего сгорания

Рассчитать цикл поршневого двигателя внутреннего сгорания с изохорным подводом тепла (рис. 6.1), заданного параметрами: начальное давление P_1 бар и температура t_1 °C, степень сжатия $\varepsilon = v_1/v_2$; степень повышения давления $\lambda = P_3/P_2$. Цикл отнесен к 1 кг воздуха. Теплоемкости принять постоянными и равными: $C_p = 1,005$ кДж/(кг К), $C_v = 0,718$ кДж/(кг К). Исходные данные для расчетов взять из таблицы 6.1.

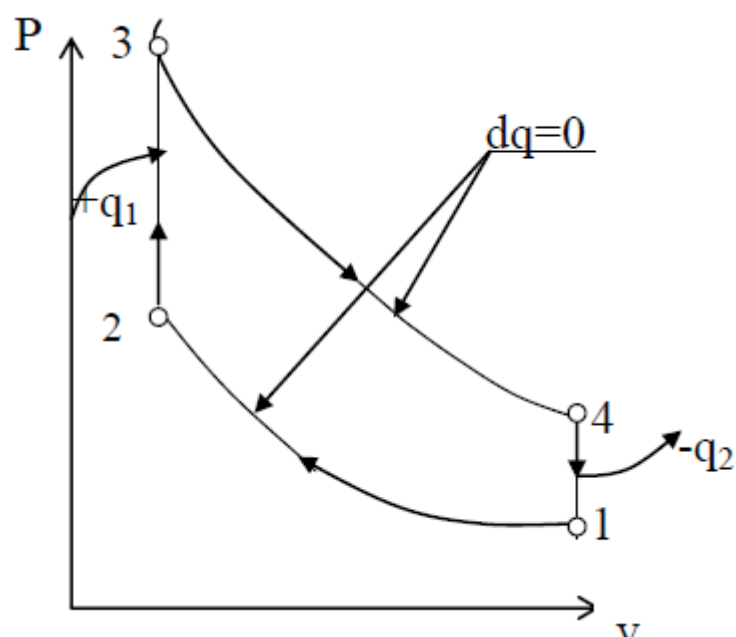


Рисунок 6.1 – Цикл ДВС с изохорным подводом тепла

Таблица 6.1 - Исходные данные для расчета.

Последняя цифра шифра	ε	λ	Предпоследняя цифра шифра	P_1 , бар	t_1 , °C
0	10,0	3,0	0	0,98	12
1	6,14	3,5	1	0,97	15
2	6,10	3,8	2	1,04	20
3	5,04	4,0	3	1,12	25
4	10,0	4,0	4	1,08	28
5	8,0	3,6	5	1,10	25
6	6,0	3,8	6	0,99	22
7	6,7	3,0	7	0,89	10
8	6,9	3,2	8	1,04	24
9	6,8	3,5	9	1,02	18

Исходные данные: $P_1 = \dots$ бар; $t_1 = \dots$ °C; $\varepsilon = v_1/v_2 = \dots$; $\lambda = P_3/P_2 = \dots$

Определить:

- 1) недостающие параметры узловых точек цикла;
- 2) для каждого из процессов цикла подсчитать изменение внутренней энергии Δu , изменение энтальпии Δh и изменение энтропии Δs ;
- 3) подводимую теплоту q_1 и отводимую теплоту q_2 в цикле;

- 4) работу цикла $\ell_{ц}$;
- 5) термический КПД цикла η_t ;
- 6) Вычислить термический КПД цикла Карно, η^k , осуществляемого в том же интервале температур, и относительный КПД цикла;
- 7) Дать сводку полученных величин в прилагаемых таблицах 6.2, 6.3, 6.4.

Таблица 6.2 - Параметры узловых точек цикла

Точка	P, бар	v, м ³ /кг	T, К	t, °С
1				
2				
3				
4				

Таблица 6.3 - Расчетные характеристики процессов цикла

Процессы	C, кДж/(кг·К)	Δu , кДж/кг	Δh , кДж/кг	Δs , кДж/(кг·К)	q, кДж/кг
1 - 2					0
2 - 3					
3 - 4					0
4 - 1					
		$\sum \pm \Delta u =$	$\sum \pm \Delta h =$	$\sum \pm \Delta s =$	$\sum \pm q =$

Таблица 6.4 - Характеристика цикла

Название величины	Обозначение, размерность	Результаты расчета
Подведенная теплота в цикле	$q_{\text{подв.}}$, кДж/кг	
Отведенная теплота в цикле	$q_{\text{хол.}}$, кДж/кг	
Полезная теплота цикла	$q_{\text{пол.}}$, кДж/кг	
Термический КПД цикла	η_t	
Термический КПД цикла Карно	η_k	
Относительный КПД цикла	$\eta_{\text{от}}$	

Решение:

1. Определяем параметры рабочего тела в узловых точках цикла (см. рис. 6.1), для этого последовательно, один за другим, рассчитываем все процессы заданного цикла.

1) Процесс 1-2. Узловые точки: 1 и 2.

Определяем параметры рабочего тела в точке 1, (P_1, v_1, T_1) .

Для точки 1 по условию задачи известны давление P_1 и температура t_1 . Определяем третий параметр, удельный объем:

$$v_1 = R \cdot T_1 / P_1 = \quad \text{м}^3/\text{кг}, \quad (6.1.1)$$

где $R=287$ Дж/(кг К) — индивидуальная газовая постоянная воздуха; P_1 — давление в первой точке, Па;

$T_1 = 273 + t = \quad \text{К}$ — абсолютная температура для первой точки.

Определяем параметры рабочего тела в точке 2, (P_2, v_2, T_2) .

Т.к. процесс 1-2 — адиабатный, то из формул соотношений между параметрами для этого процесса имеем:

$$P_2 = P_1 \cdot \varepsilon^k = \quad \text{Па}; \quad (6.1.2)$$

$$v_2 = v_1 / \varepsilon = \quad \text{м}^3/\text{кг}, \quad (6.1.3)$$

$$T_2 = T_1 \cdot \varepsilon^{k-1} = \quad \text{К}, \quad (6.1.4)$$

где $k=1.4$ — показатель адиабаты; ε — степень сжатия (из условия задачи).

2) Процесс 2-3. Узловые точки процесса: 2 и 3. Параметры точки 2 уже определены. Определяем параметры рабочего тела в точке 3, (P_3, v_3, T_3) .

Для данного цикла процесс 2-3 — изохорный, следовательно, из условия $P_3/P_2 = T_3/T_2 = \lambda$ имеем:

$$P_3 = P_2 \cdot \lambda = \quad \text{Па}; \quad (6.1.5)$$

$$v_3 = v_2 = \quad \text{м}^3/\text{кг} \quad (6.1.6)$$

$$T_3 = T_2 \cdot \lambda = \quad \text{К}, \quad (6.1.7)$$

где λ — степень увеличения давления (из условия задачи).

2) Процесс 3-4. Узловые точки процесса 3 и 4. Параметры точки 3 определены выше, поэтому вычисляем параметры рабочего тела в точке 4, (P_4, v_4, T_4) .

Для двигателей с изохорным подводом тепла процесс 3-4 —

адиабатный, следовательно:

$$P_4 = P_3 \cdot (v_3/v_4)^k = \text{Па.} \quad (6.1.8)$$

3) Параметры v_4 и T_4 можно определить так: процесс 4-1 для данного типа двигателя — изохорный, поэтому $v_4 = v_1 = \dots$, м³/кг и температура:

$$T_4 = T_1 (P_4/P_1) = \text{К.} \quad (6.1.9)$$

Определение параметров в узловых точках цикла закончено.

Вычисленные параметры в узловых точках этого цикла заносим в таблицу 6.2.

2. Вычисляем для всех процессов цикла ДВС величины:

Δu , Δh , Δs .

Изменения внутренней энергии Δu и энтальпии Δh для каждого из процессов цикла определяются по общим формулам:

$$\Delta u = C_v (T_{\text{кон}} - T_{\text{нач}}) = \text{кДж/кг}; \quad (6.2.1)$$

$$\Delta h = C_p (T_{\text{кон}} - T_{\text{нач}}) = \text{кДж/кг}, \quad (6.2.2)$$

где $C_v = 0,718$ кДж/(кг·К) — изохорная массовая теплоемкость воздуха, $C_p = 1,005$ кДж/(кг·К) — изобарная массовая теплоемкость воздуха по условию задачи; $T_{\text{кон}}$, $T_{\text{нач}}$ — конечная и начальная абсолютные температуры каждого из рассматриваемых процессов, К.

Определяем изменение энтальпии Δh для всех процессов в цикле:

$$\Delta u_{1-2} = C_v (T_2 - T_1) = \text{кДж/кг} \quad (6.2.3)$$

$$\Delta u_{2-3} = C_v (T_3 - T_2) = \text{кДж/кг} \quad (6.2.4)$$

$$\Delta u_{3-4} = C_v (T_4 - T_3) = \text{кДж/кг} \quad (6.2.5)$$

$$\Delta u_{4-1} = C_v (T_1 - T_4) = \text{кДж/кг} \quad (6.2.6)$$

(Значения Δu_{3-4} и Δu_{4-1} будут отрицательные. Знак минус нужно сохранить.)

Точно так же определяем изменение энтальпии Δh для всех процессов в цикле:

$$\Delta h_{1-2} = C_p (T_2 - T_1) = \text{кДж/кг} \quad (6.2.7)$$

$$\Delta h_{2-3} = C_p (T_3 - T_2) = \text{кДж/кг} \quad (6.2.8)$$

$$\Delta h_{3-4} = C_p (T_4 - T_3) = \text{кДж/кг} \quad (6.2.9)$$

$$\Delta h_{4-1} = C_p (T_1 - T_4) = \text{кДж/кг} \quad (6.2.10)$$

Изменение энтропии для всех процессов цикла:

$$\Delta s_{1-2} = 0 \quad (6.2.11)$$

$$\Delta s_{2-3} = C_v \ln(T_3/T_2) = \text{кДж}/(\text{кг}\cdot\text{К}) \quad (6.2.12)$$

$$\Delta s_{3-4} = 0 \quad (6.2.13)$$

$$\Delta s_{4-1} = C_v \ln(T_1/T_4) = \text{кДж}/(\text{кг}\cdot\text{К}) \quad (6.2.14)$$

размерность всех вычисленных значений Δs — кДж/(кг К), знак (-) в Δs_{4-1} сохранить. Результаты вычислений по п. 2 заносим в таблицу 6.3.

3. Определяем подводимую к газу теплоту, q_1 и отводимую от газа теплоту, q_2 :

$$q_1 = q_{2-3} = C_v (T_3 - T_2) = \text{кДж}/\text{кг}; \quad (6.3.1)$$

$$q_2 = q_{4-1} = C_v (T_1 - T_4) = \text{кДж}/\text{кг}, \quad (6.3.2)$$

где q_{2-3} — теплота изохорного процесса 2–3; q_{4-1} — теплота изохорного процесса 4–1. Теплота процессов $q_{1-2} = 0$ и $q_{3-4} = 0$, т.к. это процессы адиабатные. Результаты вычислений по пункту 3 заносим в таблицу 6.4.

3. Определяем работу цикла:

$$\ell_{\text{ц}} = q_{\text{пол}} = q_1 - |q_2| = \text{кДж}/\text{кг} \quad (6.3.1)$$

4. Определяем термический КПД цикла:

$$\eta_t = \ell_{\text{ц}}/q_{\text{подв.}} = \ell_{\text{ц}}/q_1 = \quad (6.4.1)$$

5. Определяем термический КПД цикла Карно, который осуществляется в том же интервале температур, что и заданный цикл:

$$\eta^K = (T_3 - T_1)/T_3 = \quad (6.5.1)$$

при этом η_t должен быть меньше η^K .

6. Определяем относительный КПД (должен быть меньше 1)

$$\eta_{\text{от}} = \eta_t/\eta_t^K = \quad (6.6.1)$$

Результаты вычислений по п.п. 3, 4, 5, 6, 7 заносим в таблицу 6.4.

7. Рисуем заданный цикл ДВС в масштабе в P-v и T-s координатах (см. рис. 6.2) по значениям температур из таблицы 6.2 и значениям Δs из таблицы 6.3.

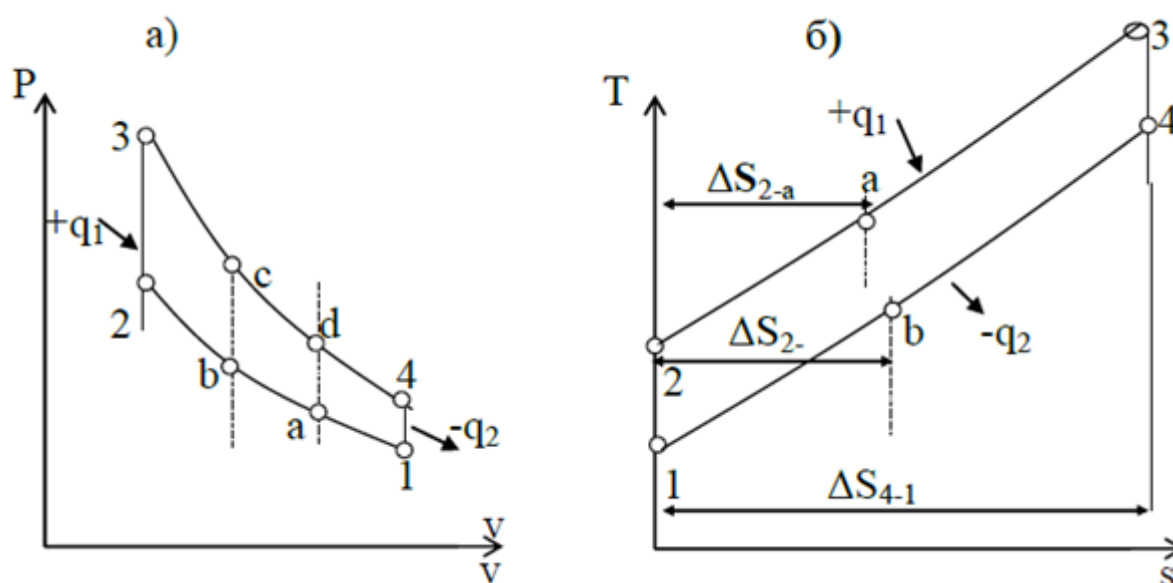


Рисунок 6.2 – Теоретический цикл ДВС с изохорным сгоранием в P-v (а) и T-s (б) координатах

Задача № 7: Процессы изменения состояния водяного пара

Из котла влажный пар с параметрами P_1 кПа и сухостью x_1 (см. табл. 7.1) поступает в пароперегреватель, где в процессе $P=\text{const}$ подсушивается до состояния сухого насыщенного пара, а затем перегревается до температуры t °С. Полученный перегретый пар на лопатках турбины адиабатно расширяется до давления P_4 .

Таблица 7.1 - Исходные данные к расчету

Последняя цифра шифра	x_1	P_1 , кПа	Предпол. цифра шифра	t_3 , °С	P_4 , кПа
0	0,9	500	0	300	2
1	0,95	1000	1	400	5
2	0,95	1000	2	450	10
3	0,98	500	3	350	3
4	0,95	1500	4	400	4
5	0,93	2000	5	450	5
6	0,9	3000	6	500	5
7	0,9	1500	7	450	2
8	0,95	2000	8	400	3
9	0,9	3000	9	350	4

Исходные данные: $P_1 = \dots$ кПа; $x_1 = \dots$; $t_3 = \dots$ °С; $P_4 = \dots$ кПа.

Определить параметры пара (P , t , v , h , s) в начале и в конце каждого из процессов: 1-2, 2-3 и 3-4, изменения внутренней энергии, энтальпии и энтропии пара в процессах, работу и теплоту процессов. Результат решения свести в таблицу 7.2.

Таблица 7.2 - Параметры точек в процессах: 1-2, 2-3 и 3-4

Точка	Исходные параметры	P , кПа	t , °С	v , м ³ /кг	h , кДж/кг	s , кДж/(кг К)
1	$P_1 = \dots$, кПа; $x_1 = \dots$					
2	$P_2 = P_1 = \dots$; $x_2 = 1$					
3	$P_3 = P_1 = \dots$; $t_3 = \dots$, °С					
4	$P_4 = \dots$, кПа; $s_4 = s_3$					

Решение:

На h - s диаграмме водяного пара (см. приложение, рис. П.1) находим изобару P_1 и на пересечении ее с линией сухости x_1 определяем точку, соответствующую началу процесса — точку 1 (рис. 7.1). Из этой точки поднимаемся по данной изобаре P_1 до пересечения с верхней пограничной кривой ($x=1$). Получаем точку 2 и заданный процесс подсушки 1-2. В данном процессе пар из влажного насыщенного переходит в сухой насыщенный.

Температуры в точках 1 и 2 одинаковые и равняются температуре насыщения при давлении P_1 , т.е. $t_1 = t_2 = t_{н1}$, см.рис.7.1.

При дальнейшем подводе тепла в пароперегревателе сухой насыщенный пар начинает перегреваться при том же давлении P_1 до температуры t_3 . Точка 3 определяется пересечением изобары P_1 с изотермой t_3 . Процесс 2-3 — процесс перегрева пара относительно температуры насыщения.

Далее следует адиабатное расширение пара до давления P_4 . Адиабатный процесс изображается вертикальной линией ($s = \text{Const}$) от t_3 до пересечения с изобарой P_4 . Получаем точку 4 и процесс 3-4. Температура в t_4 определяется изотермой, проходящей через эту точку. Через точки 1,2,3,4 проводим

основные линии: линии объема v_1, v_2, v_3, v_4 ; линии энтальпии h_1, h_2, h_3, h_4 и линии энтропии s_1, s_2, s_3, s_4 . По h - s диаграмме снимаем показания всех перечисленных параметров и заносим их в таблицу 7.2. Далее следует расчет всех процессов: 1-2, 2-3 и 3-4.

Процесс 1-2 — подсушка пара:

изменение внутренней энергии:

$$\Delta u = (h_2 - h_1) - P_1 (v_2 - v_1) = \text{кДж/кг}; \quad (7.1.1)$$

изменение энтальпии:

$$\Delta h = h_2 - h_1 = \text{кДж/кг}; \quad (7.1.2)$$

изменение энтропии:

$$\Delta s = s_2 - s_1 = \text{кДж/(кг} \cdot \text{К)}; \quad (7.1.3)$$

работа процесса:

$$\ell = P_1 (v_2 - v_1) = \text{кДж/кг}; \quad (7.1.4)$$

теплота процесса:

$$q = h_2 - h_1 = \text{кДж/кг}. \quad (7.1.5)$$

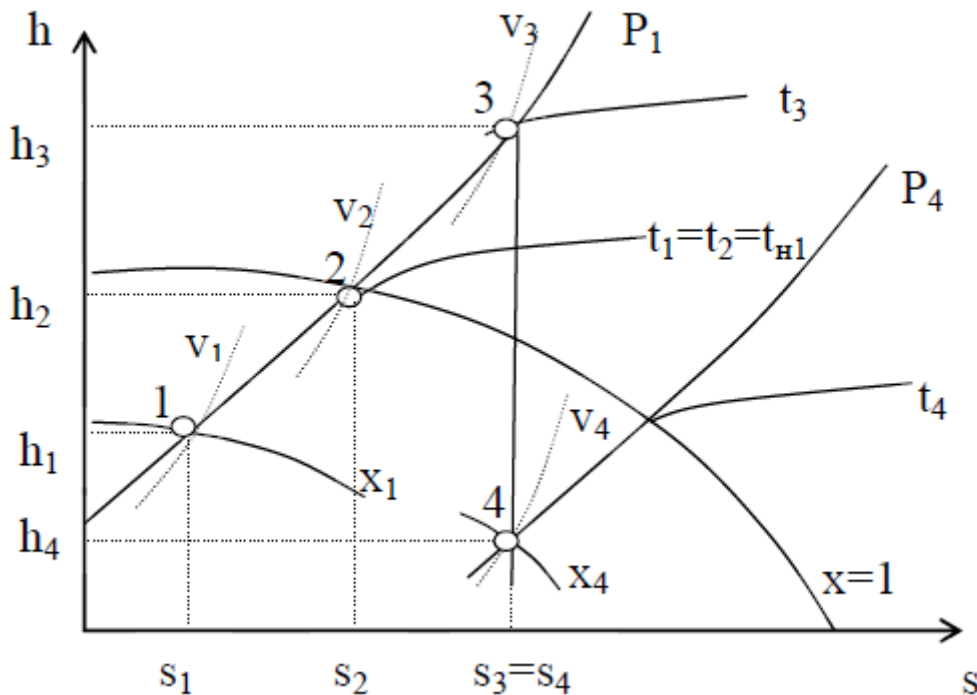


Рисунок 7.1 – Термодинамические процессы изменения состояния водяного пара:

1 – 2 — подсушки пара; 2 – 3 — перегрев пара; 3 - 4 — расширения пара в турбине в h - s координатах

Процесс 2-3 — перегрев пара:

изменение внутренней энергии:

$$\Delta u = (h_3 - h_2) - P_2 (v_3 - v_2) = \text{кДж/кг}; \quad (7.2.1)$$

изменение энтальпии:

$$\Delta h = h_3 - h_2 = \text{кДж/кг}; \quad (7.2.2)$$

изменение энтропии:

$$\Delta s = s_3 - s_2 = \text{кДж/(кг} \cdot \text{К)}; \quad (7.2.3)$$

работа процесса:

$$\ell = P_1 (v_3 - v_2) = \text{кДж/кг}; \quad (7.2.4)$$

теплота процесса:

$$q = h_3 - h_2 = \text{кДж/кг}. \quad (7.2.5)$$

Процесс 3-4 — адиабатное расширение пара:

изменение внутренней энергии:

$$\Delta u = (h_4 - h_3) - (P_4 v_4 - P_3 v_3) = \text{кДж/кг}; \quad (7.3.1)$$

изменение энтальпии:

$$\Delta h = h_4 - h_3 = \text{кДж/кг}; \quad (7.3.2)$$

изменение энтропии:

$$\Delta s = s_4 - s_3 = 0; \quad (7.3.3)$$

работа процесса:

$$\ell = -\Delta u, \text{ кДж/кг}; \quad (7.3.4)$$

теплота процесса: $q=0$.

Примечание: Размерность давлений во всех перечисленных выше формулах — кПа.

Задача № 8: Процессы изменения состояния влажного воздуха

В калорифер поступает атмосферный воздух с температурой t_1 °С и относительной влажностью φ_1 %. В нем воздух нагревается до температуры t_2 °С. Подогретый воздух направляется в сушилку, где в процессе сушки материала его температура снижается до t_3 °С.

Определить конечное влагосодержание воздуха, количество поглощенной из материала влаги, расход воздуха и тепла на один кг испаренной влаги. Процессы подогрева воздуха и сушки изобразить в H-d диаграмме.

Таблица 8.1 - Исходные данные для расчета

Последняя цифра шифра	$t_1, ^\circ\text{C}$	$\varphi_1, \%$	Предпол. цифра шифра	$t_2, ^\circ\text{C}$	$t_3, ^\circ\text{C}$
0	10	80	0	98	35
1	12	75	1	96	36
2	15	70	2	94	37
3	20	65	3	92	38
4	20	60	4	90	39
5	25	65	5	88	40
6	22	50	6	85	40
7	24	45	7	85	42
8	26	40	8	80	45
9	28	35	9	80	45

Исходные данные: $t_1 = \dots ^\circ\text{C}$; $\varphi_1 = \dots \%$; $t_2 = \dots ^\circ\text{C}$; $t_3 = \dots ^\circ\text{C}$.

Решение:

По H - d диаграмме влажного воздуха (см. приложение, рис. П.2), находим начальное состояние воздуха на пересечении изотермы сухого термометра t_1 с линией относительной влажности φ_1 , (точка 1), для которой снимаем параметры d_1 и H_1 (рис.8.1).

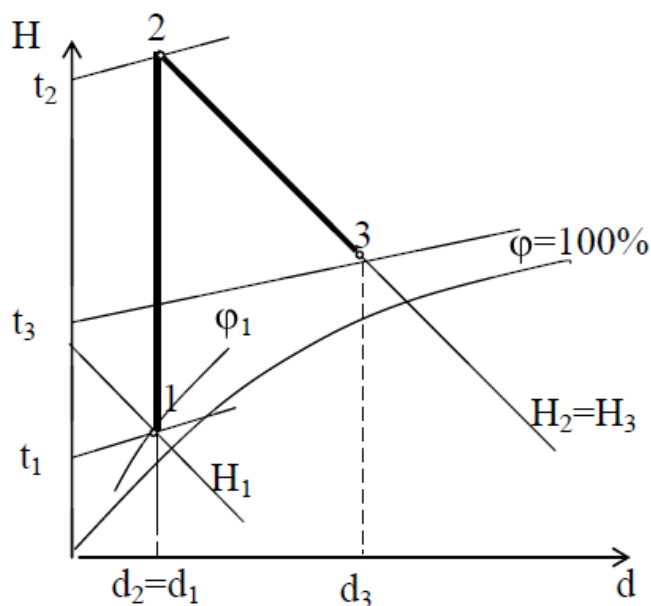


Рисунок 8.1 – Схема термодинамических процессов изменения состояния влажного воздуха в сушильной установке:

- 1-2 — процесс подогрева воздуха в калорифере;
2-3 — процесс идеальной сушки (испарения влаги).

Процесс подогрева воздуха будет изображаться вертикальной прямой ($d_1=Const$), процесс 1-2. Положение точки 2 определяется пересечением линий $d_1=Const$ и изотермой сухого термометра t_2 . Через точку 2 проводим линию $H_2=Const$ и снимаем ее показание.

После калорифера воздух с температурой t_2 поступает в сушильную камеру, где испаряет влагу из высушиваемого материала, а сам увлажняется. Процесс адиабатного увлажнения воздуха в сушильной камере изображается линией $H_2=Const$ до пересечения с изотермой t_3 , процесс 2-3. Точка 3 характеризует состояние воздуха после сушильной камеры. Для этой точки снимаем показания d_3 , г/кг с. в.; φ_3 , %. Параметры точек вносим в таблицу 8.2.

Таблица 8.2 – Параметры состояния влажного воздуха

Параметры	Точки		
	1	2	3
$t, ^\circ\text{C}$			
$d, \text{ г/кг с.в}$			
$H, \text{ кДж/кг с.в.}$			

Производим основные вычисления:

1) Количество влаги, которое принимает в сушилке каждый кг сухого воздуха:

$$\Delta d = d_3 - d_2 = \quad \text{г/кг с.в;} \quad (8.1)$$

2) Количество сухого воздуха, необходимого на испарение 1 кг влаги испаренной влаги:

$$\ell = 1000 / (d_3 - d_2) = \quad \text{кг с.в./1 кг} \quad (8.2)$$

3) Расход теплоты в калорифере:

$$q_{1-2} = H_2 - H_1 = \quad \text{кДж/кг с.в.;} \quad (8.3)$$

4) Расход тепла на 1 кг испаренной влаги:

$$Q_{1-2} = q_{1-2} \square \ell = \quad \text{кДж/1 кг} \quad (8.4)$$

Задача №9: Теплообмен теплопроводностью

Обмуровка печи состоит из слоев шамотного кирпича толщиной δ_1 , [$\lambda_1=1,14$ Вт/(м·К)] и красного кирпича толщиной δ_3 , [$\lambda_3=0,76$ Вт/(м·К)], между которыми расположена засыпка из изоляционного материала толщиной $\delta_2 = 125$ мм (см. рис.9.1).

Определить тепловые потери через 1 м^2 поверхности стенки, если на внутренней стороне шамотного кирпича температура равна t_{w1} , а на наружной стороне красного кирпича t_{w2} . Какой толщины потребуется слой из красного кирпича δ_3^* , если отказаться от применения засыпки из изоляционного материала (см.рис.9.2) при тех же температурных условиях и неизменном тепловом потоке? Данные, необходимые для решения задачи выбрать из табл. 9.1

Таблица 9.1 – Исходные данные к расчету

Вариант П	δ_1 , мм	t_{w1} , °С	Вариант ПП	δ_3 , мм	t_{w2} , °С	Изоляционный материал	
						Название	$\lambda_2=f(t)\dots$, Вт/(м·К)
0	80	1050	0	60	90	Совелит	$\lambda_2=0,0901+0,000087\times t$
1	90	980	1	60	85	Новоасбозурит	$\lambda_2=0,144+0,00014\times t$
2	80	1070	2	120	93	Диатомит молот.	$\lambda_2=0,091+0,00028\times t$
3	100	950	3	60	97	Вермикулит	$\lambda_2=0,072+0,000362\times t$
4	120	1030	4	125	86	Асбослюда	$\lambda_2=0,120+0,000148\times t$
5	120	945	5	125	82	Асботермит	$\lambda_2=0,109+0,000145\times t$
6	80	1020	6	125	94	Асбозонолит	$\lambda_2=0,143+0,00019\times t$
7	90	990	7	60	78	Асбозурит	$\lambda_2=0,1622+0,000169\times t$
8	80	1140	8	120	89	Диатомит молот	$\lambda_2=0,091+0,00028\times t$
9	120	1135	9	60	91	Шлаковая вата	$\lambda_2=0,05+0,000145\times t$

Примечания:

- 1) $t=(t_{w1}+t_{w2})/2$;
- 2) Расчетное значение толщины красного кирпича округлить (в сторону увеличения) до величины, кратной 120 мм.

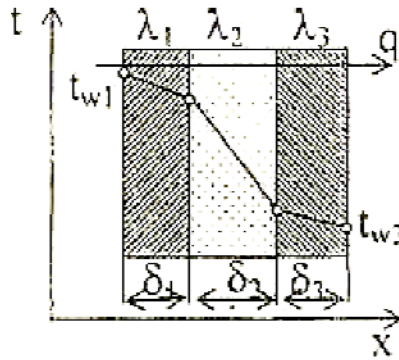


Рисунок 9.1 – Расчетная схема 3-х слойной плоской стенки

Решение:

1) Удельный тепловой поток q , Вт/м², через 3-х слойную плоскую стенку (см. рис.9.1) определяем по формуле:

$$q = (t_{w1} - t_{w2}) / (\delta_1 / \lambda_1 + \delta_2 / \lambda_2 + \delta_3 / \lambda_3) \quad (9.1)$$

где t_{w1} , t_{w2} — температуры поверхностей стенки, °С;

$\delta_1, \delta_2, \delta_3$ — толщины слоев, м;

$(\delta_1 / \lambda_1 + \delta_2 / \lambda_2 + \delta_3 / \lambda_3)$ — сумма термических сопротивлений слоев стенки, м²·К/Вт.

Но предварительно определяем коэффициент теплопроводности λ_2 , Вт/(м·К), слоя теплоизоляции по формуле согласно исходным данным (см. табл.9.1):

$$\lambda_2 = a + v \cdot t \quad (9.2)$$

где $t = 0,5(t_{w1} + t_{w2}) =$ °С — средняя температура слоя засыпки (приблизительно).

Подставляем полученное значение λ_2 в формулу (9.1) и вычисляем удельный тепловой поток:

$$q = (t_{w1} - t_{w2}) / (\delta_1 / \lambda_1 + \delta_2 / \lambda_2 + \delta_3 / \lambda_3) = \text{Вт/м}^2.$$

2) Если отказаться от слоя засыпки, то стенка станет 2-х слойной (см. рис. 9.2). Обозначения на рисунке оставляем теми же, кроме новой толщины слоя красного кирпича δ_3 .

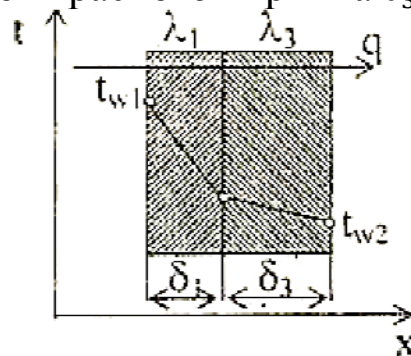


Рисунок 9.2 – Расчетная схема 2-х слойной плоской стенки

Удельный тепловой поток через 2-х слойную стенку:

$$q=(t_{w1} - t_{w2})/(\delta_1/\lambda_1+\delta_3^*/\lambda_3), \text{ Вт/м}^2. \quad (9.3)$$

Так как q и $(t_{w1} - t_{w2})$ по условию задачи остались такими же, то термические сопротивления 3-х слойной и 2-х слойной стенок должны быть одинаковые, т.е.

$$(\delta_1/\lambda_1+\delta_2/\lambda_2+\delta_3/\lambda_3)=(\delta_1/\lambda_1 +\delta_3^*/\lambda_3), \quad (9.4)$$

Отсюда находим толщину слоя красного кирпича:

$$\delta_3^*=\lambda_3 (\delta_2/\lambda_2 +\delta_3/\lambda_3) = \quad (9.5)$$

Округляем эту величину до значения кратного 120 мм (ширина кирпича) в большую сторону и получаем $\delta_3^* = \dots$ мм.

Ответ: удельный тепловой поток $q = \dots$ Вт/м²; толщина красного кирпича при отказе от слоя засыпки увеличится до $\delta_3^* = \dots$ мм вместо до $\delta_3 = \dots$ мм.

Задача №10: Лучистый теплообмен. Экранирование

Определить удельный лучистый тепловой поток q между двумя параллельно расположенными плоскими стенками, имеющими температуры t_{w1} и t_{w2} , и степени черноты ε_1 и ε_2 , если между ними нет экрана. Определить также удельный тепловой поток при наличии экрана $q^э$ со степенью черноты $\varepsilon^э$ (см. табл. П.4). Данные, необходимые для решения задачи, выбрать из табл.10.1.

Таблица 10.1 – Исходные данные к расчету

Вариант П	ε_1	ε_2	Материал экрана	Вариант ПП	t_{w1} , °С	t_{w2} , °С
0	0,5	0,6	Алюминий полиров	0	200	30
1	0,55	0,52	Латунь полированная	1	250	35
2	0,60	0,70	Хром полированный	2	300	25
3	0,52	0,72	Алюминий шероховат.	3	350	20
4	0,58	0,74	Латунь прокатная	4	400	40
5	0,58	0,74	Хром полированный	4	400	40
6	0,70	0,58	Медь полированная	6	500	50
7	0,65	0,62	Алюминий шероховат	7	550	55
8	0,75	0,73	Латунь полированная	8	600	60
9	0,80	0,77	Сталь полированная	9	650	65

Решение:

1) Между поверхностями НЕТ экрана, рис. 10.1.

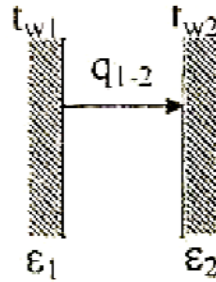


Рисунок 10.1 – Лучистый теплообмен между поверхностями без экрана

Определяем удельный тепловой поток q_{1-2} , Вт/м², между плоскими поверхностями по формуле:

$$q_{1-2} = \epsilon_{\text{пр}} C_0 \left[\left(\frac{T_{w1}}{100} \right)^4 - \left(\frac{T_{w2}}{100} \right)^4 \right] \quad (10.1)$$

где $C_0 = 5,67$ Вт/(м²·К⁴) — коэффициент лучеиспускания абсолютно черного тела;

T_{w1} и T_{w2} — абсолютные термодинамические температуры поверхностей, К, вычисляются по общей формуле:

$$T_w = t_w + 273 = \text{К} \quad (10.2)$$

$\epsilon_{\text{пр}}$ — приведенная степень черноты поверхностей, участвующих в теплообмене.

Для 2-х параллельно расположенных поверхностей $\epsilon_{\text{пр}}$:

$$\epsilon_{\text{пр}} = \frac{1}{\frac{1}{\epsilon_1} + \frac{1}{\epsilon_2} - 1} = \quad (10.3)$$

где ϵ_1 и ϵ_2 — степень черноты материалов поверхностей, см. таблицу 10.1 (согласно варианту).

Подставляем полученное значение $\epsilon_{\text{пр}}$ в формулу теплового потока (10.1) и вычисляем удельный тепловой поток q_{1-2} :

$$q_{1-2} = \epsilon_{\text{пр}} C_0 \left[\left(\frac{T_{w1}}{100} \right)^4 - \left(\frac{T_{w2}}{100} \right)^4 \right] = \text{Вт/м}^2.$$

2) Между поверхностями расположен ОДИН экран (рис.10.2):

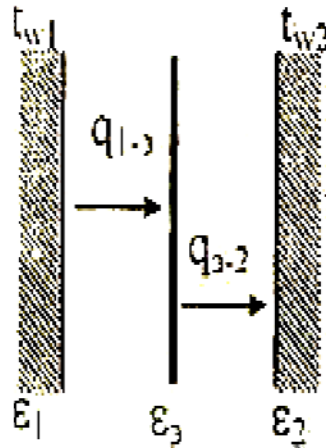


Рисунок 10.2 – Лучистый теплообмен между поверхностями с одним экраном

При установившихся условиях:

$$q_{1-3} = q_{3-2} = q_{1-3-2} \equiv q_{1-2}^{\text{э}},$$

где $q_{1-2}^{\text{э}}$ — удельный тепловой поток между 1-ой и 2-ой поверхностями при наличии экрана.

Удельный тепловой поток при наличии экрана $q_{1-2}^{\text{э}}$, Вт/м²:

$$q_{1-2}^{\text{э}} = \varepsilon_{\text{пр}}^{\text{э}} C_0 \left[\left(\frac{T_{w1}}{100} \right)^4 - \left(\frac{T_{w2}}{100} \right)^4 \right] \quad (10.4)$$

где $\varepsilon_{\text{пр}}^{\text{э}}$ — приведенная степень черноты поверхностей, участвующих в теплообмене, при наличии между ними экрана (одного или нескольких).

Если число плоских экранов n , приведенную степень черноты $\varepsilon_{\text{пр}}^{\text{э}}$ считают по формуле:

$$\varepsilon_{\text{пр}}^{\text{э}} = \frac{1}{\frac{1}{\varepsilon_1} + \frac{1}{\varepsilon_2} + 2 \sum_{i=1}^n \left(\frac{1}{\varepsilon_i^{\text{э}}} \right) - (n+1)} \quad (10.5)$$

В данной задаче один экран, т.е. $n=1$. Степень черноты экрана принимаем по табл. П.4 согласно варианту задания (см. табл. 10.1).

Подставляем в формулу $\varepsilon_{\text{пр}}^{\text{э}}$ значения $n=1$ и $\varepsilon^{\text{э}} = \dots$ и вычисляем:

$$\varepsilon_{\text{пр}}^{\text{э}} = \frac{1}{\frac{1}{\varepsilon_1} + \frac{1}{\varepsilon_2} + 2 \sum_{i=1}^n \left(\frac{1}{\varepsilon_i^{\text{э}}} \right) - (n+1)} = \dots$$

Определяем удельный тепловой поток при наличии экрана по

формуле (10.4):

$$q_{1-2}^3 = \varepsilon_{\text{пр}}^3 C_0 \left[\left(\frac{T_{w1}}{100} \right)^4 - \left(\frac{T_{w2}}{100} \right)^4 \right] = \text{Вт/м}^2.$$

Ответ: без экрана между поверхностями удельный тепловой поток $q_{1-2} = \text{Вт/м}^2$; при наличии одного экрана между поверхностями удельный тепловой поток составляет $q_{1-2}^3 = \text{Вт/м}^2$, т.е. тепловой поток при установке экрана уменьшился в $q_{1-2}/q_{1-2}^3 = \dots$ раз.

Задача № 11: Лучисто-конвективный сложный теплообмен

Определить потери теплоты конвекцией и излучением (отдельно и общие) за сутки горизонтально расположенного трубопровода диаметром d мм и длиной ℓ м (см. рис.11.1), охлаждаемого свободным потоком воздуха, если температура поверхности трубопровода t_w , температура воздуха в помещении t_f (степень черноты трубы ε см. табл. П.4). Данные, необходимые для решения задачи, взять из табл.11.1.

Таблица 11.1 – Исходные данные к расчету

Вариант П	d , мм	ℓ , м	Вариант ПП	t_w , °С	t_f , °С	Поверхность трубы
0	230	3	0	150	15	Жесть белая старая
1	220	5	1	140	20	Асбестовый картон
2	250	7	2	130	25	Лак белый
3	240	9	3	120	35	Лак черный матовый
4	210	11	4	110	25	Железо оцинкованное
5	270	6	5	100	20	Масляная краска
6	340	4	6	190	15	Сталь шероховатая
7	320	12	7	180	10	Алюминиевая краска
8	360	8	8	170	5	Сталь окисленная
9	300	10	9	160	0	Чугун шероховатый

Решение:

Общие тепловые потери Q_o , Вт, трубы составляют:

$$Q_o = Q_k + Q_{\text{л}}, \quad (11.1)$$

где Q_k — тепловые потери свободной конвекцией воздуха, Вт;
 $Q_{\text{л}}$ — тепловые потери тепловым излучением, Вт.

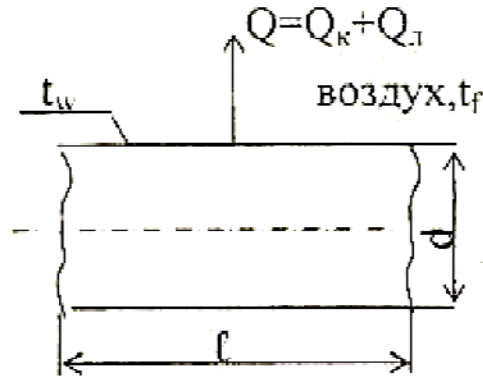


Рисунок 11.1 – Расчетная схема для определения сложной теплоотдачи конвекцией и излучением

Решение задачи состоит из двух частей.

А) Тепловые потери за счет свободной конвекции воздуха у горячей трубы

Тепловые потери конвекцией Q_k , Вт, определяются по уравнению Ньютона-Рихмана:

$$Q_k = \alpha(t_w - t_f) \cdot F, \quad (11.2)$$

где α — коэффициент теплоотдачи при свободном движении воздуха, Вт/(м²·К);

F — поверхность трубы, м², вычисляем по формуле:

$$F = \pi \cdot d \cdot l = \quad (11.3)$$

Коэффициент теплоотдачи α для горизонтальной трубы определяется из критериального уравнения:

$$Nu_f = 0,5 \cdot (Pr_f \cdot Gr_f)^{0,25} \cdot (Pr_f / Pr_w)^{0,25}, \quad (11.4)$$

где $Nu_f = \alpha \cdot d / \lambda_f$ — критерий Нуссельта. (11.5)

Pr_f — критерий Прандтля при температуре теплоносителя (воздуха) t_f определяется по приложению из таблицы П.3;

Pr_w — критерий Прандтля при температуре стенки трубы t_w определяется также по приложению из таблицы П.3;

Отношение Pr_f / Pr_w для газов равняется 1, т.е. $Pr_f / Pr_w = 1$;

Gr_f — критерий Грасгофа при температуре теплоносителя t_f определяется по формуле:

$$Gr = g \cdot d^3 \cdot \beta \cdot (t_w - t_f) / \nu^2 \quad (11.6)$$

где $g = 9,81 \text{ м/с}^2$ — ускорение свободного падения;

β — коэффициент объемного расширения воздуха, $1/\text{K}$, вычисляем по формуле:

$$\beta = 1/(273 + t_f) = 1/\text{K}; \quad (11.7)$$

Для определения критериев Прандтля, Грасгофа и Нуссельта необходимо задать определяющую температуру, равной температуре окружающей среды t_f ; и определяющий размер, равный наружному диаметру трубы d .

1) Выбираем свойства воздуха при температуре окружающей среды $t_f = \dots^\circ\text{C}$ по таблице П.3 теплофизических свойств воздуха (см. приложения в конце методических указаний):

$\lambda = \dots \text{Вт}/(\text{м} \cdot \text{K})$ — коэффициент теплопроводности воздуха;

$\nu = \dots \cdot 10^{-6} \text{ м}^2/\text{с}$ — коэффициент кинематической вязкости воздуха;

$\text{Pr}_f = \dots$ — критерий Прандтля для воздуха.

2) Вычисляем критерий Грасгофа по формуле (11.6):

$$\text{Gr} = g \cdot d^3 \cdot \beta \cdot (t_w - t_f) / \nu^2 =$$

3) Решаем критериальное уравнение (11.4), подставив в него найденные критерии Прандтля Pr_f и Грасгофа Gr_f :

$$\text{Nu}_f = 0,5 \cdot (\text{Pr}_f \cdot \text{Gr}_f)^{0,25} =$$

4) Коэффициент теплоотдачи α , $\text{Вт}/(\text{м}^2 \cdot \text{K})$, определяем выразив его из формулы (11.5) критерия Нуссельта:

$$\alpha = \text{Nu}_f \cdot \lambda_f / d =$$

5) Вычисляем тепловые потери за счет свободной конвекции воздуха по уравнению Ньютона-Рихмана (11.2):

$$Q_K = \alpha \cdot (t_w - t_f) \cdot F = \text{Вт.}$$

Это потери тепла в секунду ($\text{Вт} = \text{Дж}/\text{с}$).

За сутки потери тепла конвекцией составят:

$$Q_K^{\text{сут}} = Q_K \cdot 3600 \cdot 24 \cdot 10^{-3} = \text{кДж.} \quad (11.8)$$

(Множитель 10^{-3} означает перевод размерности Дж в кДж.)

Б) Тепловые потери тепловым излучением определяем по закону Стефана-Больцмана:

$$Q_{\text{л}} = \varepsilon_{\text{пр}} C_0 \left[\left(\frac{T_w}{100} \right)^4 - \left(\frac{T_f}{100} \right)^4 \right] \cdot F, \text{ Вт,} \quad (11.9)$$

где $\varepsilon_{\text{пр}}$ — приведенная степень черноты, определяется по формуле:

$$\varepsilon_{np} = \frac{1}{\frac{1}{\varepsilon_w} + \frac{F_w}{F_f} \left(\frac{1}{\varepsilon_f} - 1 \right)} \quad (11.10)$$

При условии, что площадь поверхности трубы F_w намного меньше площади поверхности стен F_f в цехе ($F_w/F_f \rightarrow 0$), получаем:

$$\varepsilon_{np} = \varepsilon_w. \quad (11.11)$$

По таблице П.4 выбираем для излучающей поверхности трубы степень черноты $\varepsilon_w = \dots$

Подставляя исходные данные в формулу (11.9), вычисляем тепловой поток излучением, Вт:

$$Q_{л} = \varepsilon_{np} C_0 \left[\left(\frac{T_w}{100} \right)^4 - \left(\frac{T_f}{100} \right)^4 \right] \cdot F = \quad \text{Вт.}$$

За сутки потери тепла тепловым излучением составят:

$$Q_{л}^{\text{сут}} = Q_{л} \cdot 3600 \cdot 24 \cdot 10^{-3} = \quad \text{кДж.} \quad (11.12)$$

Определяем общие теплотери за сутки:

$$Q_0^{\text{сут}} = Q_k^{\text{сут}} + Q_{л}^{\text{сут}} = \quad \text{кДж.} \quad (11.13)$$

Ответ: потери тепла горячей трубой за сутки составляют: общие кДж, конвективным путем кДж, тепловым излучением кДж.

Задача №12: Теплопередача

По горизонтально расположенной стальной трубе (см. рис.12.1) с коэффициентом теплопроводности стенки трубы $\lambda=20$ Вт/(м·°С) течёт вода со скоростью w , м/с, имеющая температуру t_1 , °С. Снаружи труба охлаждается окружающим воздухом, температура которого t_2 °С. Определить коэффициенты теплоотдачи α_1 и α_2 , Вт/(м²·°С), соответственно от воды к внутренней стенке трубы и от наружной стенки трубы к воздуху, а также коэффициент теплопередачи k_{ℓ} , Вт/(м·°С), и тепловой поток q_{ℓ} , Вт/м, отнесённые к 1 м длины трубы, если внутренний диаметр трубы равен d_1 , мм, внешний — d_2 , мм. Данные, необходимые для решения задачи, взять из табл. 12.1.

При определении коэффициентов теплоотдачи α_1 и α_2 принять температуру поверхностей трубы t_w , равной $t_w=(t_1+t_2)/2$, °С.

Задачу выполнить по формулам для цилиндрической стенки.

Таблица 12.1 – Исходные данные к расчету

Вариант П	t_1 °C	W , м/с	Вариант ПП	t_2 , °C	d_1 , мм	d_2 ,мм
0	140	0,25	0	18	190	210
1	150	0,36	1	16	180	200
2	120	0,27	2	14	170	190
3	160	0,38	3	12	160	180
4	150	0,19	4	10	150	170
5	190	0,21	5	8	140	160
6	170	0,23	6	6	130	150
7	210	0,42	7	4	120	140
8	200	0,43	8	2	110	130
9	220	0,44	9	0	100	120

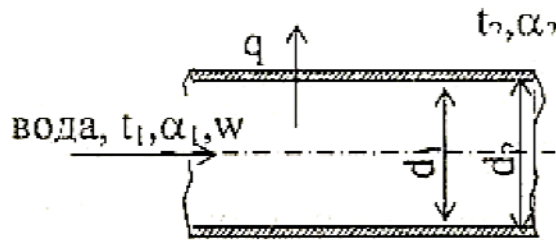


Рисунок 12.1 – Расчетная схема теплопередачи через цилиндрическую стенку

Решение:

А) Определение коэффициента теплоотдачи α_1 от воды к внутренней стенке трубы.

Внутри трубы вода движется с заданной скоростью, следовательно, тепловой поток от воды к трубе отдается вынужденной конвекцией.

1) Свойства воды определяем при температуре $t_1 = \dots$ °C (выбираем по таблице физических свойств воды, табл. П.5):

$\lambda_1 = \dots$ Вт/(м·°C) — коэффициент теплопроводности воды;

$\nu_1 = \dots \cdot 10^{-6}$ м²/с — коэффициент кинематической вязкости воды;

$Pr_1 = \dots$ — критерий Прандтля при температуре воды $t_1 = \dots$ °C;

$Pr_w = \dots$ — критерий Прандтля для воды при температуре стенки трубы (температуру стенки трубы принимаем равной среднеарифметическому значению температур воды и воздуха):

$$t_w = 0,5(t_1 + t_2) = \dots \text{ } ^\circ\text{C} \quad (12.1)$$

2) Определяем критерий Рейнольдса по формуле:

$$Re_1 = w \cdot d_1 / \nu_1 = \quad (12.2)$$

3) Выбираем критериальное уравнение:

Вид критериального уравнения зависит от режима движения теплоносителя. При турбулентном режиме движения теплоносителя в трубе ($Re > 10000$) критериальное уравнение имеет вид:

$$Nu_1 = 0,021 \cdot Re_1^{0,8} \cdot Pr_1^{0,43} \cdot (Pr_1 / Pr_w)^{0,25}. \quad (12.3)$$

При ламинарном режиме движения жидкости в трубе ($Re \leq 2300$) критериальное уравнение имеет вид:

$$Nu_1 = 0,15 \cdot Re_1^{0,33} \cdot Pr_1^{0,43} \cdot Gr^{0,1} \cdot (Pr_1 / Pr_w)^{0,25}. \quad (12.4)$$

При переходном режиме ($2300 \leq Re < 10000$):

$$Nu_1 = 0,008 Re_1^{0,8} \cdot Pr_1^{0,43} (Pr_1 / Pr_w)^{0,25}. \quad (12.5)$$

В данной задаче режим движения воды в трубе турбулентный, т.к. полученное значение $Re > 10000$, поэтому используем формулу (12.3).

4) Подставляем исходные и полученные данные в критериальное уравнение (12.3) и вычисляем критерий Нуссельта:

$$Nu_1 = 0,021 \cdot Re_1^{0,8} \cdot Pr_1^{0,43} \cdot (Pr_1 / Pr_w)^{0,25} =$$

5) Вычисляем коэффициент теплоотдачи по формуле (12.6):

$$\alpha_1 = Nu_1 \cdot \lambda_1 / d_1 = \quad \text{Вт}/(\text{м}^2 \cdot \text{К}).$$

Б) Определение коэффициента теплоотдачи от наружной поверхности трубы к воздуху α_2 .

Снаружи труба омывается окружающим воздухом. Следовательно, имеет место теплообмен при свободной конвекции.

Критериальное уравнение для горизонтальной трубы при свободной конвекции воздуха имеет следующий вид:

$$Nu_2 = 0,5 (Pr \cdot Gr)_2^{0,25} \quad (12.7)$$

6) Свойства воздуха при температуре $t_2 = \dots \text{ } ^\circ\text{C}$ (выбираем из Приложения по таблице физических свойств воздуха, табл. П.3):

$\lambda_2 = \dots$ Вт/(м·°С) — коэффициент теплопроводности воздуха;
 $\nu_2 = \dots \cdot 10^{-6}$ м²/с — коэффициент кинематической вязкости воздуха;

$Pr_2 = \dots$ — критерий Прандтля для воздуха.

7) Критерий Грасгофа определяем по формуле:

$$Gr_2 = g \cdot d_2^3 \cdot \beta \cdot (t_w - t_2) / \nu_2^2 \quad (12.8)$$

8) Решаем критериальное уравнение (12.7):

$$Nu_2 = 0,5 \cdot (Pr \cdot Gr)_2^{0,25} =$$

9) Вычисляем коэффициент теплоотдачи:

$$\alpha_2 = Nu_2 \cdot \lambda_2 / d_2 = \quad (12.9)$$

В) Определение коэффициента теплопередачи.

10) По условию задачи коэффициент теплопередачи и тепловой поток следует определять по формулам для криволинейных поверхностей, следовательно, линейный коэффициент теплопередачи будет равен:

$$k_\ell = \frac{1}{\frac{1}{(\alpha_1 \cdot d_1)} + \frac{1}{2\lambda} \cdot \ln\left(\frac{d_2}{d_1}\right) + \frac{1}{(\alpha_2 \cdot d_2)}}, \text{ Вт/(м} \cdot \text{°С)}. \quad (12.10)$$

где λ — коэффициент теплопроводности материала трубы (сталь 20) выбираем по табл. П.6 $\lambda = 51$ Вт/(м·°С).

Вычисляем линейный коэффициент теплопередачи:

$$k_\ell = \frac{1}{\frac{1}{(\alpha_1 \cdot d_1)} + \frac{1}{2\lambda} \cdot \ln\left(\frac{d_2}{d_1}\right) + \frac{1}{(\alpha_2 \cdot d_2)}} = \quad \text{Вт/(м} \cdot \text{°С)}.$$

11) Линейный тепловой поток q_ℓ , Вт/м, вычисляем по формуле:

$$q_\ell = \pi \cdot k_\ell (t_1 - t_2) = \quad \text{Вт/м}. \quad (12.11)$$

Ответ:

- коэффициенты теплоотдачи: от воды к внутренней поверхности трубы $\alpha_1 = \dots$ Вт/(м²·К); от наружной поверхности трубы к воздуху $\alpha_2 = \dots$ Вт/(м²·К); линейный коэффициент теплопередачи $k_\ell = \dots$ Вт/(м·К); линейный тепловой поток $q_\ell = \dots$ Вт/м.

Библиографический список

1. Мирам, Андрей Олегович. Техническая термодинамика. Тепломассообмен [Текст] : учебник для студентов, обучающихся по направлению 270100 "Строительство" / А. О. Мирам, В. А. Павленко. - Москва : АСВ, 2017. - 352 с.
2. Теплотехника: [Текст]: учебник / под ред. А. П. Баскакова. - 3-е изд., перераб. и доп. - М.: БАСТЕТ, 2010. - 328 с.
3. Примеры и задачи по тепломассообмену [Текст] : [учебное пособие] / В. С. Логинов [и др.]. - Изд. 2-е, испр. и доп. - Санкт-Петербург : Лань , 2011. - 256 с.
4. Оболенский, Н. В. Практикум по теплотехнике [Электронный ресурс] : учебное пособие / Н. В. Оболенский ; В. Л. Осокин. - Княгинино : НГИЭИ, 2010. - 236 с. - Режим доступа : biblioclub.ru
5. Амирханов, Д. Г. Техническая термодинамика : учебное пособие / Д. Г. Амирханов, Р. Д. Амирханов. - Казань : Издательство КНИТУ, 2014. - 264 с.
6. Дерюгин, Виктор Владимирович. Тепломассообмен : учебное пособие для студентов высших учебных заведений, обучающихся по направлениям подготовки бакалавриата "Строительство" и "Теплоэнергетика и теплотехника" / В. В. Дерюгин, В. Ф. Васильев, В. М. Уляшева. - Изд. 3-е, стер. - Санкт-Петербург : Лань, 2020. - 240 с. - Текст : непосредственный.
7. Техническая термодинамика и теплотехника: [Текст]: учебное пособие / под ред. А. А. Захаровой. - 2-е изд., испр. - М.: Академия, 2008. - 272 с.
8. Ерофеев В.А., Семёнов П.Д., Пряхин А.С. Теплотехника/Под ред. В.П. Ерофеева. - М.:Академкнига, 2006. 456 с.

ПРИЛОЖЕНИЯ

Таблица П.1 - Физические константы некоторых газов

Вещество	Формула	Мол. масса, μ , кг/кмоль	Плотн. газа, ρ , кг/м ³	R, Дж/(кг К)
Воздух	-	28,96	1,29	287,0
Кислород	O ₂	32,00	1,429	259,8
Азот	N ₂	28,026	1,252	296,8
Водород	H ₂	2,016	0,090	4124,0
Окись углерода	CO	28,01	1,250	296,8
Углекислый газ	CO ₂	44,01	1,977	188,9
Сернистый газ	SO ₂	64,06	2,926	129,8
Метан	CH ₄	16,032	0,717	518,8
Этилен	C ₂ H ₄	28,052	1,251	296,6
Коксовый газ	-	11,50	0,515	721,0
Аммиак	NH ₃	17,032	0,771	488,3
Водяной пар	H ₂ O	18,016	0,804	461,0

Таблица П.2 - Интерполяционные формулы для истинных и средних молярных теплоемкостей газов при P=Const

Газ	Истинная теплоемкость μC_p , кДж/(кмоль К)	Средняя теплоемкость μC_{pm} , кДж/(кмоль К)
В пределах от 0 до 1000 ^o C		
O ₂	$\mu C_p = 29,5802 + 0,0069706 t$	$\mu C_{pm} = 29,2080 + 0,0040717 t$
N ₂	$\mu C_p = 28,5372 + 0,0053905 t$	$\mu C_{pm} = 28,7340 + 0,0023488 t$
CO	$\mu C_p = 28,7395 + 0,0058862 t$	$\mu C_{pm} = 28,8563 + 0,0026808 t$
SO ₂	$\mu C_p = 42,8728 + 0,0132043 t$	$\mu C_{pm} = 40,4386 + 0,0099562 t$
Воздух	$\mu C_p = 28,7558 + 0,0057208 t$	$\mu C_{pm} = 28,8270 + 0,0027080 t$
H ₂ O	$\mu C_p = 32,8367 + 0,0116611 t$	$\mu C_{pm} = 33,1494 + 0,0052749 \cdot t$
В пределах от 0 до 1500 ^o C		
H ₂	$\mu C_p = 28,3446 + 0,003519 t$	$\mu C_{pm} = 28,7210 + 0,0012008 t$
CO ₂	$\mu C_p = 41,3597 + 0,0144985 t$	$\mu C_{pm} = 38,3955 + 0,0105838 t$

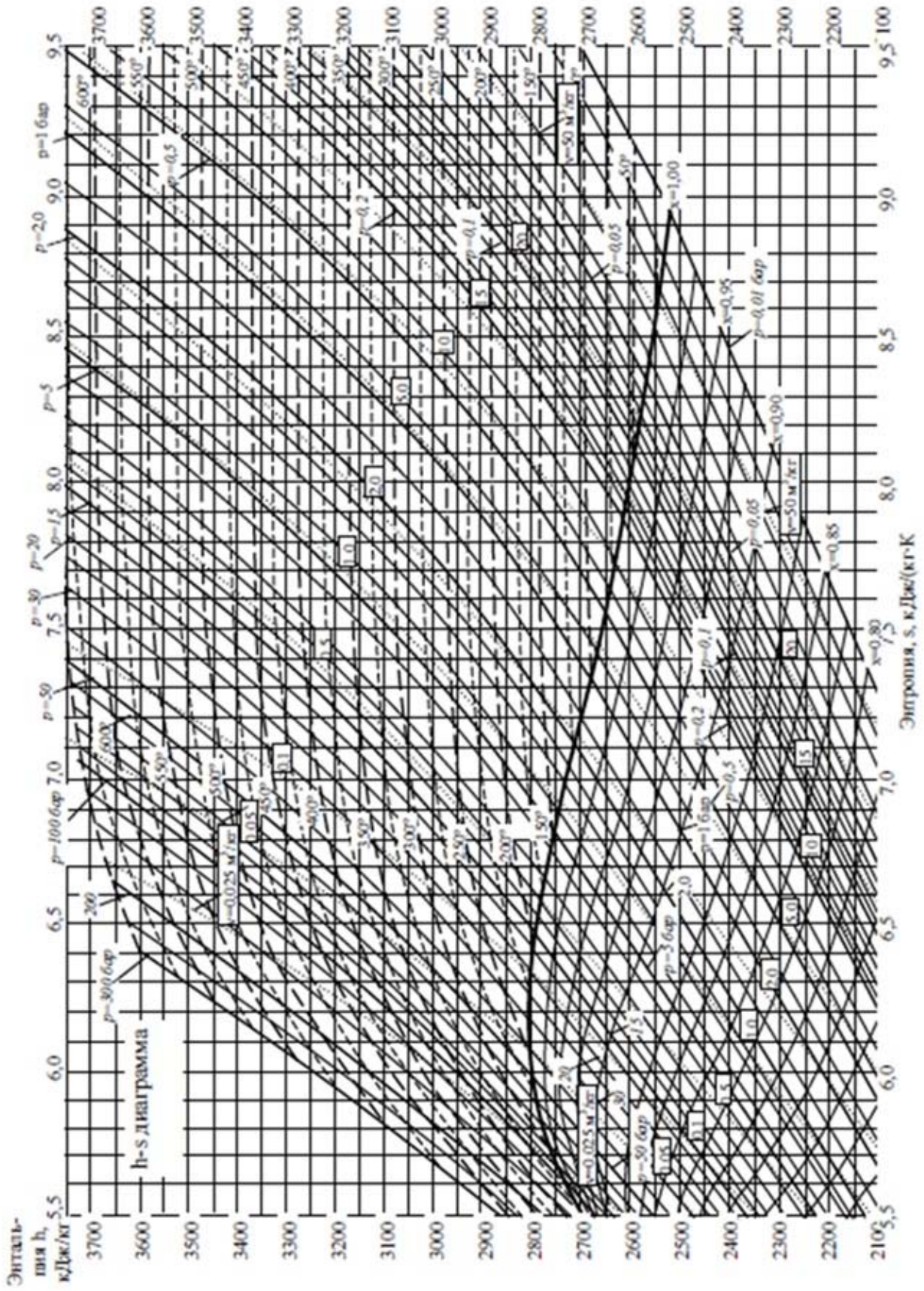


Рисунок П.1 — h-s диаграмма состояния водяного пара

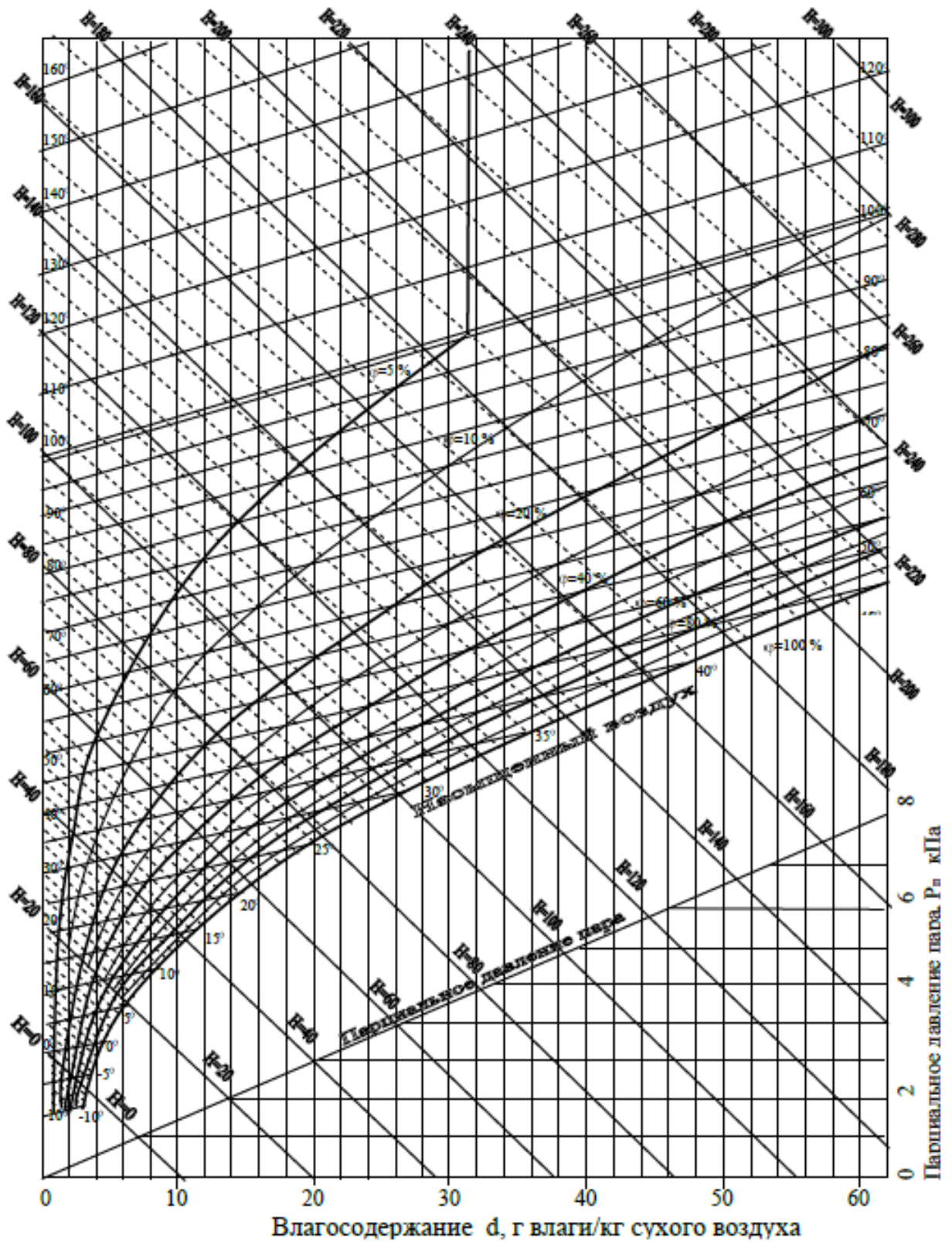


Рисунок П.2 – h-d диаграмма состояния влажного воздуха при атмосферном давлении $B = 745$ мм рт.ст.

Таблица П.3 – Физические свойства сухого воздуха при атмосферном давлении $B=1,013 \cdot 10^3$ Па

t, °C	ρ , кг/м ³	C_p , кДж/(кг·°C)	λ , Вт/(м·К)	$\nu \cdot 10^6$, м ² /с	Pr
-50	1,584	1,013	0,0204	9,23	0,728
-40	1,515	1,013	0,0212	10,04	0,728
-30	1,453	1,013	0,0220	10,80	0,723
-20	1,395	1,009	0,0228	11,79	0,716
-10	1,342	1,009	0,0236	12,43	0,712
0	1,293	1,005	0,0244	13,28	0,707
10	1,247	1,005	0,0251	14,16	0,705
20	1,205	1,005	0,0259	15,06	0,703
30	1,165	1,005	0,0267	16,00	0,701
40	1,128	1,005	0,0276	16,96	0,699
50	1,093	1,005	0,0283	17,95	0,698
60	1,060	1,005	0,0290	18,97	0,696
70	1,029	1,009	0,0296	20,02	0,694
80	1,000	1,009	0,0305	21,09	0,692
90	0,972	1,009	0,0313	22,10	0,690
100	0,946	1,009	0,0321	23,13	0,688
120	0,898'	1,009	0,0334	25,45	0,686
140	0,854	0,013	0,0349	27,80	0,684
160	0,815	1,017	0,0364	30,09	0,682
180	0,779	1,022	0,0378	32,49	0,681
200	0,746	1,026	0,0393	34,85	0,680
250	0,674	1,038	0,0427	40,61	0,677
300	0,615	1,047	0,0460	48,33	0,674
350	0,566	1,059	0,0491	55,46	0,678
400	0,524	1,068	0,0521	63,09	0,678
500	0,456	1,093	0,0574	79,38	0,687
600	0,404	1,114	0,0622	96,89	0,699
700	0,362	1,135	0,0671	115,4	0,706
800	0,329	1,156	0,0718	134,8	0,713
900	0,301	1,172	0,0763	155,1	0,717
1000	0,277	1,185	0,0807	177,1	0,719

Таблица П.4 – Степень черноты различных металлов

Наименование материала	t, °C	ε
Алюминиевая краска	-	0,50
Алюминий полированный	50÷500	0,04÷0,06
Алюминий с шероховатой поверхностью	20÷50	0,06÷0,07
Асбестовый картон	20	0,96
Жесть белая старая	20	0,28
Железо оцинкованное	30	0,23
Кирпич красный шероховатый	20	0,88÷0,93
Лак черный матовый	40÷100	0,96÷0,98
Лак белый	40÷100	0,80÷0,95
Латунь полированная	200	0,03
Латунь листовая прокатная	20	0,06
Масляная краска	-	0,94
Медь окисленная	500	0,88
Медь полированная	50÷1000	0,02
Снег	-	0,96
Сталь окисленная	-	0,80
Сталь полированная	-	0,54
Сталь с шероховатой поверхностью	50	0,56
Стекло	250÷1000	0,87÷0,72
Хром полированный	-	0,17
Чугун шероховатый	-	0,96
Эмаль белая	20	0,90

Таблица П.5 – Физические свойства воды на линии насыщения

t , °C	$P \cdot 10^{-5}$, Па	ρ , кг/м ³	c_p , кДж/(кг·°C)	λ , Вт/(м·K)	$\nu \cdot 10^6$, м ² /с	$\beta \cdot 10^4$, K ⁻¹	P_r
0	1,013	999,9	4,212	0,55	1,789	-0,63	13,67
10	1,013	999,7	4,191	0,57	1,306	0,70	9,52
20	1,013	998,2	4,183	0,60	1,006	1,82	7,02
30	1,013	995,7	4,174	0,62	0,805	3,21	5,42
40	1,013	992,2	4,174	0,64	0,659	3,87	4,31
50	1,013	988,1	4,174	0,65	0,556	4,49	3,54
60	1,013	983,2	4,179	0,66	0,478	5,11	2,98
70	1,013	977,8	4,187	0,67	0,415	5,70	2,55
80	1,013	971,8	4,195	0,67	0,365	6,32	2,21
90	1,013	965,3	4,208	0,68	0,326	6,95	1,95
100	1,013	958,4	4,220	0,68	0,295	7,52	1,75
110	1,43	951,0	4,233	0,69	0,272	8,08	1,60
120	1,98	943,1	4,250	0,69	0,252	8,64	1,47
130	2,70	934,8	4,266	0,69	0,233	9,19	1,36
140	3,61	926,1	4,287	0,69	0,217	9,72	1,16
150	4,76	917,0	4,313	0,68	0,203	10,3	1,17
160	6,18	907,4	4,346	0,68	0,191	10,7	1,10
170	7,92	897,3	4,380	0,68	0,181	11,3	1,05
180	10,03	886,9	4,417	0,67	0,173	11,9	1,00
190	12,55	876,0	4,459	0,67	0,165	12,6	0,96
200	15,55	863,0	4,505	0,66	0,158	13,3	0,9
210	19,08	852,8	4,555	0,66	0,153	14,1	0,9
220	23,20	840,3	4,614	0,65	0,148	14,8	0,89
230	27,98	827,3	4,681	0,64	0,145	15,9	0,88
240	33,48	813,6	4,756	0,63	0,141	16,8	0,87
250	39,78	799,0	4,844	0,62	0,137	18,1	0,86
260	46,94	784,0	4,949	0,61	0,135	19,7	0,87
270	55,05	767,9	5,070	0,59	0,133	21,6	0,88
280	64,19	750,7	5,230	0,57	0,131	23,7	0,90
290	74,45	732,3	5,485	0,56	0,129	26,2	0,93
300	85,92	712,5	5,736	0,54	0,128	29,2	0,97
320	112,90	667,1	6,574	0,51	0,128	38,2	1,11
340	146,08	610,1	8,165	0,46	0,127	53,4	1,39

$t, ^\circ\text{C}$	$P \cdot 10^{-5}, \text{Па}$	$\rho, \text{кг/м}^3$	$c_p, \text{кДж/(кг} \cdot ^\circ\text{C)}$	$\lambda, \text{Вт/(м} \cdot \text{К)}$	$\nu \cdot 10^6, \text{м}^2/\text{с}$	$\beta \cdot 10^4, \text{К}^{-1}$	Pr
350	165,37	574,4	9,504	0,43	0,126	66,8	1,60
360	186,74	528,0	13,984	0,40	0,126	109	2,3
370	210,53	450,5	40,321	0,34	0,126	264	6,79

Таблица П.6 – Физические свойства некоторых металлов

Наименование материала	$\rho, \text{кг/м}^3$	$t, ^\circ\text{C}$	$\lambda, \text{Вт/(м} \cdot ^\circ\text{C)}$	$c_p, \text{кДж/(кг} \cdot ^\circ\text{C)}$
Алюминий	2700	0	209	0,896
Бронза	8800	20÷200	48,2	0,368
Латунь	8500	20÷200	109	0,392
Медь	8930	0	390	0,388
Нержав, сталь 1Х18Н10Т	7860	20÷200	16,3	0,494
Серебро	10500	0	419	0,234
Сталь 20	7830	20÷200	51,0	0,494
Сталь 45	7830	20÷200	47,8	0,490
Титан	4540	0	15,1	0,531