

Документ подписан простой электронной подписью
Информация о владельце:
ФИО: Емельянов Сергей Геннадьевич
Должность: ректор
Дата подписания: 17.05.2024 11:39:38
Уникальный программный ключ:
9ba7d3e34c012eba476ffd2d064cf2781953be730df2374d16f3c0ce536f0fc6

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

Кафедра теплогазоводоснабжения

УТВЕРЖДАЮ

Проректор по учебной работе

О.Г. Локтионова

«3» 11

2023 г.



ТЕХНИЧЕСКАЯ ТЕРМОДИНАМИКА

Методические указания к практическим занятиям и
самостоятельной работе для студентов направлений подготовки
08.03.01 Строительство, 13.03.01 Теплоэнергетика и теплотехника,
21.05.04 Горное дело, обучающихся
на очной, очно-заочной и заочной формах обучения

Курск 2023

УДК 536.7

Составитель: В.А. Жмакин

Рецензент

Доктор технических наук, профессор кафедры
теплогазоводоснабжения В.С. Ежов

Техническая термодинамика: методические указания к практическим занятиям и для самостоятельной работы студентов очной, очно-заочной и заочной форм обучения направлений подготовки 08.03.01 Строительство, 13.03.01 Теплоэнергетика и теплотехника, 21.05.04 Горное дело / Юго-Зап. гос. ун-т; сост.: В.А. Жмакин. – Курск, 2023. – 33 с.: ил. 9, табл. 15, прилож. 4. – Библиогр.: с. 30.

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

Методические указания предназначены для студентов направлений подготовки 08.03.01 Строительство, 13.03.01 Теплоэнергетика и теплотехника, 21.05.04 Горное дело очной, очно-заочной 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 . Формат 60x84 1/16.
Усл. печ.л. 1,92. Уч. изд.л. 1,74. Тираж 100 экз. Заказ 1252.
Бесплатно.

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

Методические указания к заданиям и самостоятельной работе.

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

Определить массовый расход газа (кг/с) при известном объемном расходе V м³/мин, температуре t °С и манометрическом давлении P_m кПа. Барометрическое давление составляет $B=98100$ Па.

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:

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

2. Абсолютное давление газа:

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

3. Массовый расход газа (из уравнения состояния идеального газа $pV = GRT$):

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

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

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

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

T – абсолютная температура газа, К:

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

ЗАДАЧА № 2

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: $r_{N_2} = \quad \%$; $r_{O_2} = \quad \%$; $r_{CO_2} = \quad \%$
 $r_{H_2O} = \quad \%$; $t_{см.} = \quad \text{°С}$; $P_{см.} = \quad \text{мм рт.ст.}$.

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:

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

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;
 Γ_{N_2} , Γ_{O_2} , Γ_{CO_2} , Γ_{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 объём 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 объём 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:

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

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

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

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

где Γ_{N_2} , Γ_{O_2} , Γ_{CO_2} , Γ_{H_2O} – объемные доли компонентов смеси (в долях единицы).

ЗАДАЧА № 3

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 $t = t_1 + t_2 =$, °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 $t_1 \div t_2$:

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

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

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

5. Удельная теплота изохорного процесса:

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

ЗАДАЧА № 4

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 - ; $V_1 = \quad , \text{ м}^3$; $P_1 = \quad , \text{ МПа}$; $\varepsilon = \quad$; $t_1 = \quad , \text{ }^\circ\text{C}$; $n = \quad$.

Решение

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

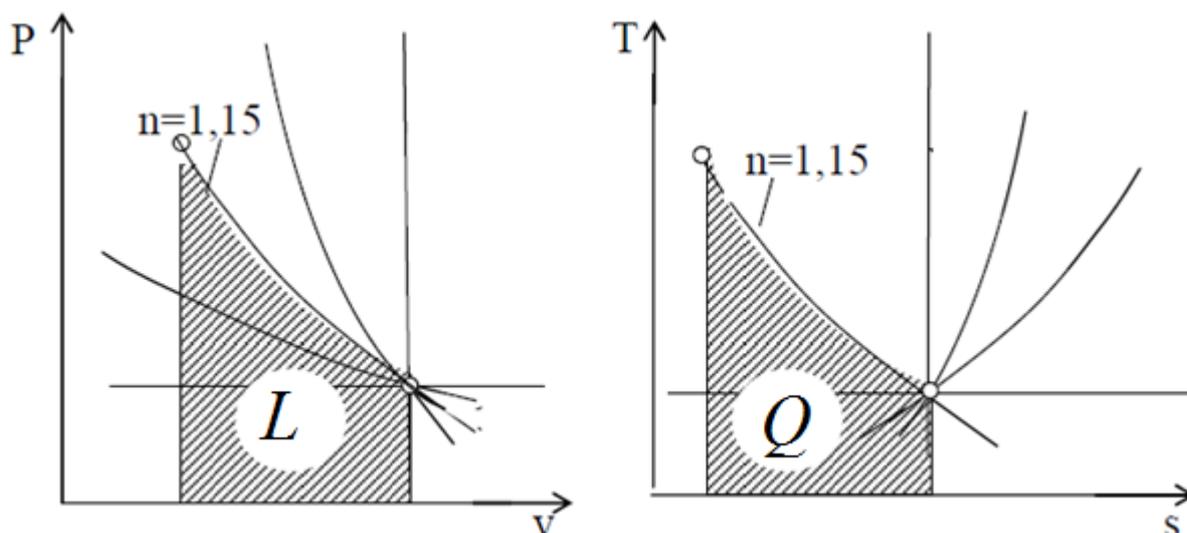


Рис.1. Политропический процесс сжатия в P - v и T - s координатах

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):

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

в) давление и температуру газа в конце сжатия определяем из формул соотношения между параметрами для политропического 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:

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

Температура в конце сжатия:

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

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 (из условия задачи); 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 $\mu C_p=29,31$ кДж/(кмоль К) и $\mu C_v=20,93$ кДж/(кмоль К); для многоатомных газов (CO_2 , H_2O , SO_2 , CH_4) значения мольных теплоемкостей $\mu C_p=37,68$ кДж/(кмоль К) и $\mu C_v=29,31$ кДж/(кмоль К).

Массовые изобарная и изохорная теплоемкости газа равны:

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

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

И окончательно теплоемкость политропного процесса:

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

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

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

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

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

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

5. Теплота процесса:

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

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

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 $Q_{хол1}, Q_{хол2}$; 5) расход воды на охлаждение G_w , 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: $P_1 =$, бар; $P_k =$, бар; $t_1 =$, °С; $V_1 =$, м³/мин; $\Delta t =$, °С

Решение

Изображаем схему 2-х ступенчатого компрессора (см. рис.2) и процессы сжатия в P - v и T - s координатах (см. рис.3).

1. Массовая производительность компрессора:

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

где $V = \quad , \text{ м}^3/\text{мин}$ – объемная производительность компрессора;

ρ - плотность воздуха на входе в компрессор, кг/м^3 :

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

$R = 287 \text{ Дж}/(\text{кг} \cdot \text{К})$ - индивидуальная газовая постоянная для воздуха;

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

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

$P_1 = \quad \text{ Па}$ ($1 \text{ бар} = 10^5 \text{ Па}$) – давление воздуха на входе в компрессор, Па.

2. Расчет работы компрессора в две ступени.

1) Степень увеличения давления по ступеням:

$$\lambda = (P_k / P_1)^{0.5} = \quad , \quad (5.2.1)$$

где $P_k = \quad$ и $P_1 = \quad , \text{ бар}$ - конечное давление сжатия и давление при всасывании.

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

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

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

3) Температура воздуха в конце сжатия:

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

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

где $T_1 = \quad , \text{ К}$, (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

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

где $G = \quad , \text{ кг/с}$ - 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. $Q_{\text{хол } 1} = Q_{\text{хол } 2}$, а общее количество отведенного тепла от ступеней компрессора:

$$Q_{\text{хол}} = z \cdot Q_{\text{хол } 1} = z \cdot G \cdot c_p \cdot (t_2 - t_1) = \quad , \text{ Вт}, \quad (5.2.7)$$

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:

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

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

1) Степень увеличения давления:

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

где $P_K=$ и $P_1=$, бар - конечное давление сжатия и давление всасывания.

2) Температура воздуха в конце сжатия.

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

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

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

3) Теоретическая работа привода компрессора:

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

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

4) Мощность привода компрессора:

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

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

5) Количество теплоты, отводимое от воздуха в холодильнике:

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

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.

б) 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.

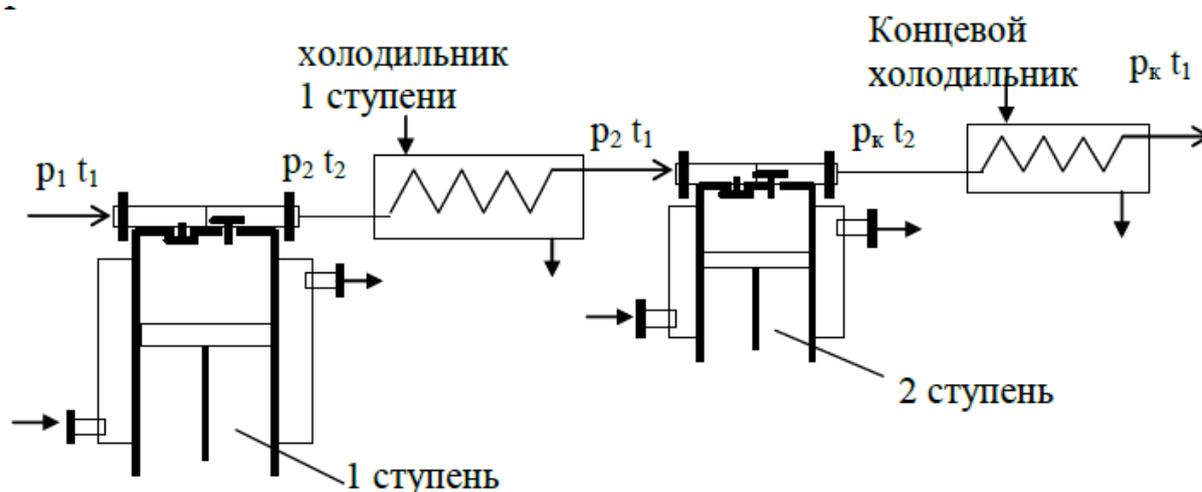


Рис2. Схема 2-х ступенчатого компрессора

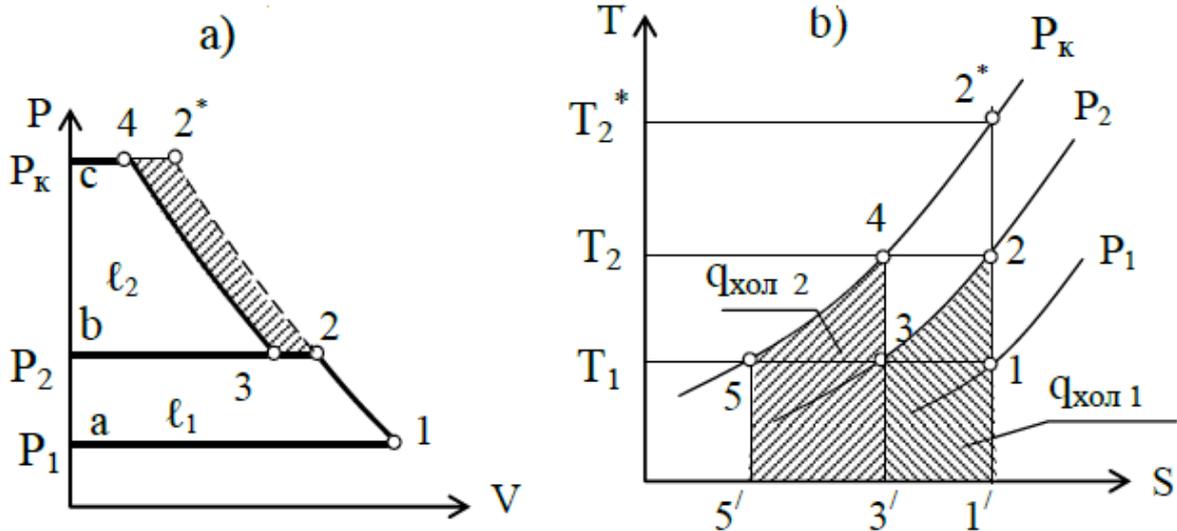


Рис.3 Процессы сжатия газа в двухступенчатом компрессоре

ЗАДАЧА 6

Рассчитать цикл поршневого двигателя внутреннего сгорания с изохорным подводом тепла (рис. 4), заданного параметрами: начальное давление P_1 бар и температура t_1 °С, 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.

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) Построить в масштабе цикл ДВС в координатах P - v и T - s .
 Дать сводку полученных величин в прилагаемых таблицах 6.2, 6.3, 6.4.

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

Таблица 6.2 - Параметры узловых точек цикла

Точка	P , бар	v , м ³ /кг	T , К	t , °C
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	$q_{\text{хол.}}, \text{ кДж/кг}$	
Полезная теплота цикла	$q_{\text{пол.}}, \text{ кДж/кг}$	
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, для этого последовательно, один за другим, рассчитываем все процессы заданного цикла.

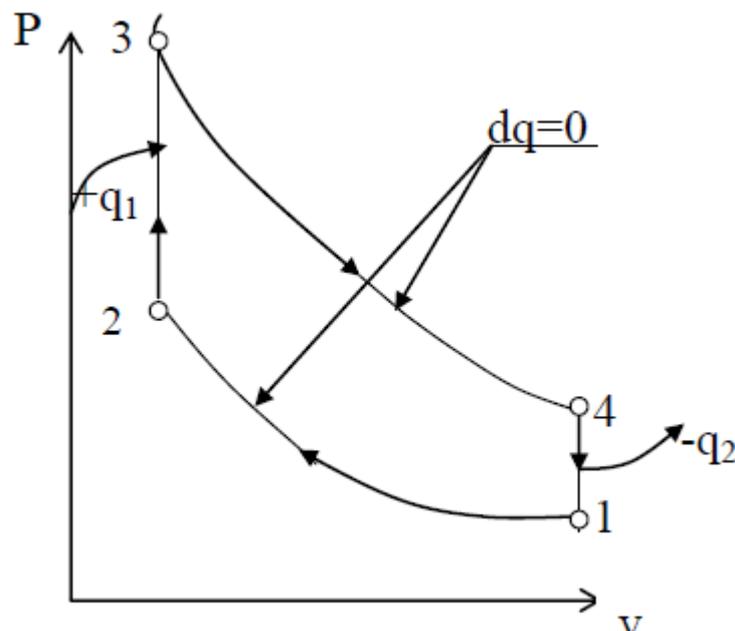


Рис.4. Цикл ДВС с изохорным подводом тепла

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 $R=287 \text{ Дж}/(\text{кг К})$ – 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:

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

3) Параметры v_4 и T_4 можно определить так: процесс 4-1 для данного типа двигателя – изохорный, поэтому $v_4 = v_1 = \quad , \text{ м}^3/\text{кг}$ и температура:

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

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:

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

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

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:

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

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

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

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

(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:

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

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

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

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

Изменение энтропии для всех процессов цикла:

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

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

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

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

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 :

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

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

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:

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

4. Определяем термический КПД цикла:

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

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

$$\eta^{\text{К}} = (T_3 - T_1) / T_3 = \quad , \quad (6.5.1)$$

при этом η_t должен быть меньше $\eta^{\text{К}}$.

6. Определяем относительный КПД (должен быть меньше 1)

$$\eta_{\text{от}} = \eta_t / \eta^{\text{К}} = \quad , \quad (6.6.1)$$

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

7. Выполняем графическую часть задания в масштабе строим заданный цикл ДВС в координатах P-v и T-s.

По полученным результатам: температурам из таблицы 6.2 и значениями Δs из таблицы 6.3 рисуем в масштабе цикл ДВС в координатах T-s:

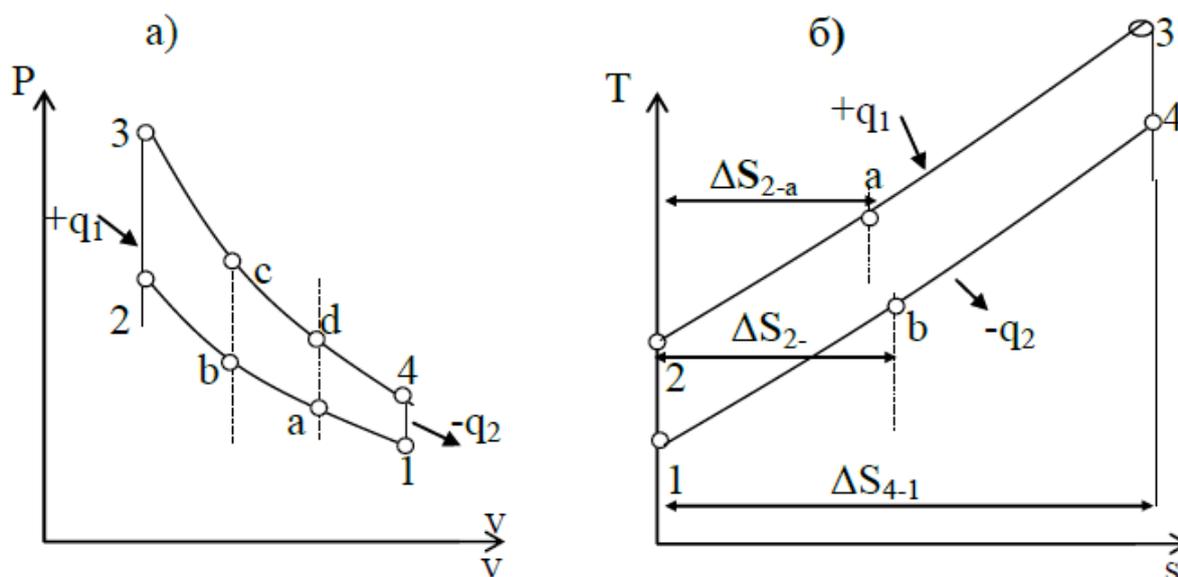


Рис.5 Теоретический цикл ДВС с изохорным сгоранием в P-v (а) и T-s (б) координатах

ЗАДАЧА № 7

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 адиабатного расширяется до давления P_4 .

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 7.1 - Таблица исходных данных.

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: $P_1=$, кПа; $x_1=$; $t_3=$, °С; $P_4=$, кПа.

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

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

Решение

На h - s диаграмме водяного пара (см. приложение, рис. 8) находим изобару P_1 и на пересечении ее с линией сухости x_1 определяем точку, соответствующую началу процесса – точку 1 (рис. 6). 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 т.т. 1 и 2 одинаковые и равняются температуре насыщения при давлении P_1 , т.е. $t_1=t_2=t_{н1}$, см. рис.6.

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 ($s=Const$) от т.3 до пересечения с изобарой P_4 . Получаем точку 4 и процесс 3-4. Температура в т.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 выше приведенную таблицу. 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:

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

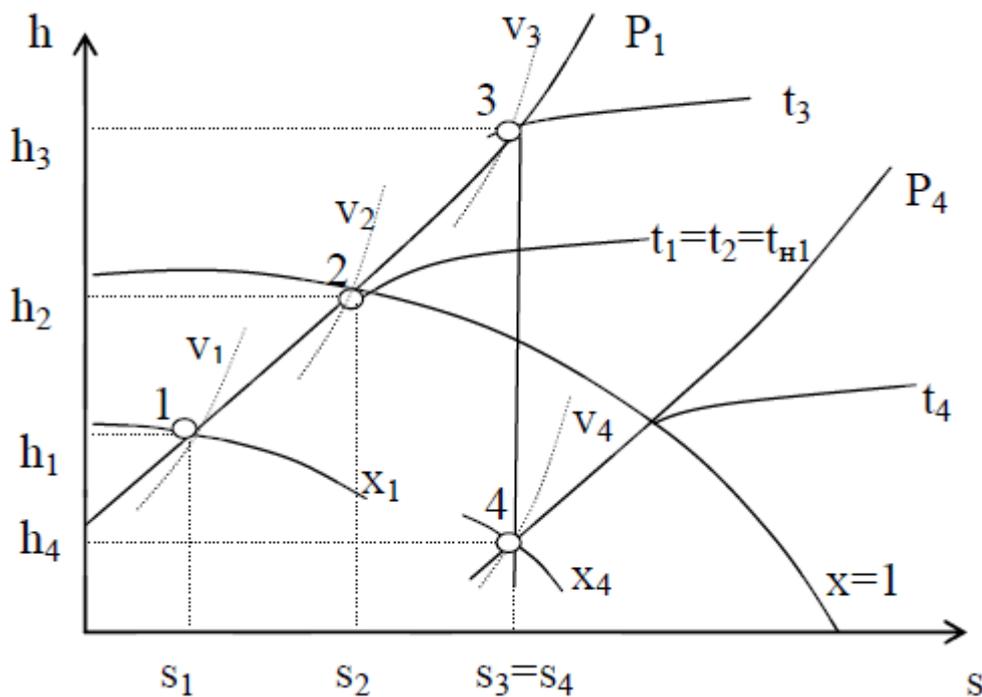


Рис.6. Процессы: 1 – 2 - подсушки пара, 2 – 3 - перегрев пара, 3 - 4 - расширения пара в турбине в h-s координатах

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:

$$\Delta s = s_3 - s_2 = \text{, кДж/(кг·K)}; \quad (7.2.3)$$

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:

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

теплота процесса: $q=0$.

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

ЗАДАЧА № 8

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 Н-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: $t_1 = , ^\circ\text{C}$; $\varphi_1 = , \%$; $t_2 = , ^\circ\text{C}$; $t_3 = , ^\circ\text{C}$.

Решение.

По Н-d диаграмме влажного воздуха (см. приложение, рис. 9), 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.7).

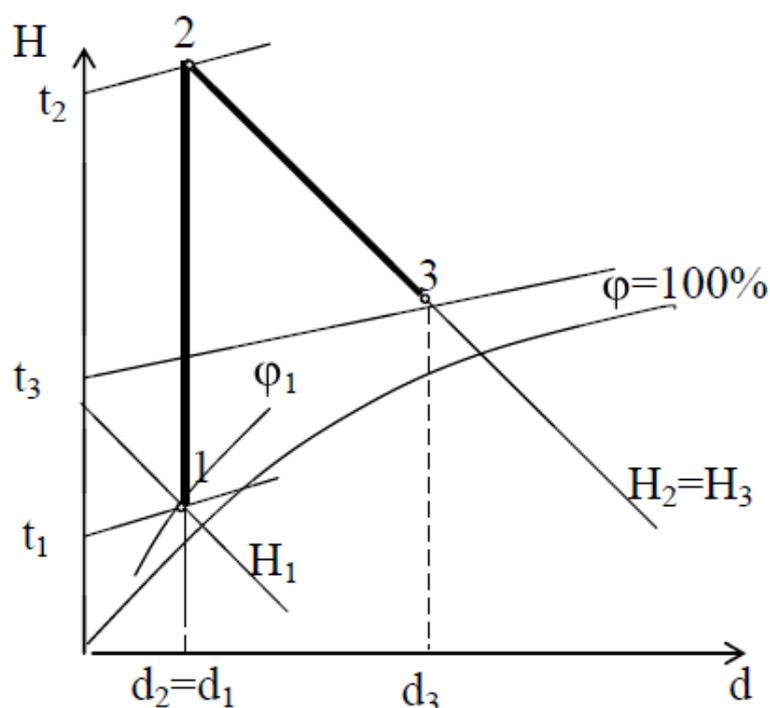


Рис.7. Схема процессов во влажном воздухе в сушильной установке: 1-2-процесс подогрева воздуха в калорифере; 2-3-процесс идеальной сушки (испарения влаги).

Процесс подогрева воздуха будет изображаться вертикальной прямой ($d_1 = \text{Const}$), процесс 1-2. Положение точки 2 определяется пересечением линий $d_1 = \text{Const}$ и изотермы сухого термометра t_2 . Через точку 2 проводим линию $H_2 = \text{Const}$ 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 $H_2 = \text{Const}$ 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, °С			
d, г/кг с.в			
H, 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:

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

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:

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

КОНТРОЛЬНЫЕ ВОПРОСЫ

Таблица выбора №№ контрольных вопросов

Последняя цифра шифра	№№ контрольн. вопросов	Предпоследн. цифра шифра	№№ контрольн. вопросов
0	1, 11	0	21, 40
1	2, 12	1	22, 30
2	3, 13	2	23, 31
3	4, 14	3	24, 32
4	5, 15	4	25, 33
5	6, 16	5	26, 34
6	7, 19	6	27, 35
7	8, 17	7	28, 36
8	9, 18	8	39, 37
9	10, 20	9	29, 38

Контрольные вопросы

1. Что такое параметр состояния? Какие параметры приняты в технической термодинамике за основные?

2. Какие диаграммы имеют наибольшее практическое применение в термодинамике и почему? В какой из диаграмм площадь под кривой процесса определяет работу этого процесса? Какие знаки работы? В какой из диаграмм площадь под кривой процесса определяет теплоту этого процесса? Какие знаки теплоты?

3. Уравнение состояния идеального газа. Индивидуальная и универсальная газовые постоянные.

4. Что такое массовый и объемный составы смеси идеальных газов и как можно перейти от одного состава к другому?

5. Первый закон термодинамики. Аналитическое выражение первого закона термодинамики.

6. Основные термодинамические процессы идеальных газов. Их изображение в координатах $P-v$ и $T-s$.

7. Что такое теплоемкость? Виды теплоемкостей. Связь между различными теплоемкостями.

8. Что такое процессы испарения и кипения? Чем они

отличаются друг от друга? Являются ли температура и давление при кипении независимыми параметрами?

9. Виды паров. Какие параметры характеризуют каждый из паров? Укажите области существования этих паров в системах координат: P - v , T - s и h - s .

10. Дайте определение перегретого, сухого насыщенного и влажного паров. Укажите область расположения этих паров в диаграммах: P - v , T - s и h - s для пара. Как найти параметры перегретого пара?

11. Покажите с помощью h - s диаграммы для пара изотермический и изобарный процессы расширения пара. Как будут изменяться параметры пара? (каждый из процессов начинается в области влажного пара и заканчивается в области перегретого пара).

12. Сущность графического метода расчета паровых процессов. Чем он отличается от расчета процессов для идеальных газов?

13. Какой воздух называется влажным воздухом? Что такое насыщенный и ненасыщенный воздух?

14. Что такое влагосодержание, относительная влажность и степень насыщения влажного воздуха? Как определить эти величины с помощью H - d диаграммы влажного воздуха? Приведите пример.

15. Какими параметрами можно задать состояние воздуха в H - d диаграмме влажного воздуха? Покажите на примере.

16. Что такое температура точки росы? Как определить ее с помощью H - d диаграммы влажного воздуха? Приведите пример.

17. В чем сущность второго закона термодинамики? Дайте основные формулировки этого закона.

18. Дайте описание цикла Карно. Почему цикл Карно называется идеальным?

19. Идеальный и реальный компрессоры. Дать определения и их индикаторные диаграммы.

20. Изобразите в P - v диаграмме изотермический политропный и адиабатный процессы сжатия рабочего тела в компрессоре и покажите работу, затрачиваемую на эти процессы. Какой из них наиболее экономичен?

21. Изобразите в $T-s$ координатах процесс политропного сжатия в 3-х ступенчатом компрессоре с показателем политропы $1 < n < k$. Покажите на графике тепло, отводимое от газа в рубашках цилиндров компрессора и в промежуточных холодильниках.

22. При каких условиях осуществляется многоступенчатое сжатие? Что дает многоступенчатое сжатие по сравнению с одноступенчатым?

23. Как осуществляется рабочий процесс в ДВС со сгоранием топлива при постоянном объеме? Какое топливо применяют? Почему нельзя применять высокие степени сжатия?

24. Дать описание идеального цикла ДВС со смешанным подводом тепла. Изобразить его в координатах $P-v$ и $T-s$.

25. Как влияет степень сжатия на термический КПД идеального цикла двигателей внутреннего сгорания и какие факторы ограничивают его величину?

26. Изобразите принципиальную схему газотурбинной установки без регенерации, опишите процессы в ее элементах и постройте идеальный цикл этой установки в координатах $P-v$ и $T-s$.

27. Изобразите принципиальную схему газотурбинной установки с регенерацией, опишите процессы в отдельных ее элементах и покажите на графике в $T-s$ диаграмме, как осуществляется в такой установке регенерация тепла.

28. Опишите преимущества газотурбинных установок по сравнению с поршневыми двигателями внутреннего сгорания.

29. Для осуществления каких процессов применяются сопла и диффузоры? Приведите примеры технического использования этих устройств.

30. Дайте описание комбинированного сопла Лавалья. Как определить скорость истечения и секундный расход газа и пара при выходе из сопла Лавалья?

31. Опишите процесс дросселирования. Покажите с помощью $h-s$ диаграммы как изменяется состояние водяного пара при дросселировании.

32. Изобразите цикл Ренкина в $P-v$ и $T-s$ координатах и поясните, что представляют собой отдельные процессы, из которых он состоит? В каких элементах паросиловой установки

протекают эти процессы?

33. Как определить термический КПД в цикле Ренкина? Каково влияние начального давления P_1 и начальной температуры t_1 пара на термический КПД цикла Ренкина? Каково влияние конечного давления P_2 на термический КПД цикла?

34. Изобразите в $h-s$ диаграмме процесс расширения пара в турбине паросиловой установки с промежуточным перегревом пара. Покажите на графике, как сказывается промежуточный перегрев пара на конечной влажности пара.

35. В чем заключается сущность комбинированной выработки электрической энергии и тепла на ТЭЦ и каковы ее преимущества по сравнению с отдельной выработкой их? Для сопоставления используйте $T-s$ диаграмму. Что такое коэффициент использования тепла теплофикационной установки?

36. Изобразите в $T-s$ диаграмме идеальный цикл парокомпрессионной холодильной установки и опишите процессы, из которых он состоит.

37. Какими свойствами должны обладать вещества, применяемые в качестве холодильных агентов в парокомпрессионных холодильных установках?

38. В чем состоит принципиальное отличие цикла теплового насоса от цикла холодильной установки? Изобразить в $T-s$ диаграмме идеальные циклы обеих установок.

39. Дать описание воздушной холодильной установки и представить ее идеальный цикл в $P-v$ и $T-s$ координатах. В чем недостатки этой холодильной установки?

40. Дать описание схемы и цикла теплового насоса. Каким коэффициентом характеризуется эффективность цикла теплового насоса?

Библиографический список

1. Амирханов, Д. Г. Техническая термодинамика : учебное пособие / Д. Г. Амирханов, Р. Д. Амирханов. - Казань : Издательство КНИТУ, 2014. - 264 с.
2. Мирам, Андрей Олегович. Техническая термодинамика. Тепломассообмен : учебник для студентов, обучающихся по направлению 270100 "Строительство" / А. О. Мирам, В. А. Павленко. - Москва : АСВ, 2017. - 352 с.
3. Теплотехника: [Текст]: учебник / под ред. А. П. Баскакова. - 3-е изд., перераб. и доп. - М.: БАСТЕТ, 2010. - 328 с.
4. Техническая термодинамика и теплотехника: [Текст]: учебное пособие / под ред. А. А. Захаровой. - 2-е изд., испр. - М.: Академия, 2008. - 272 с.
5. Селин В. В. Техническая термодинамика [Текст] : учебное пособие / В.В. Селин, В. М. Фокин. - Волгоград: ВолгГАСУ, 2008. - 132 с.
6. Техническая термодинамика и теплотехника [Текст] : учебное пособие / под ред. А.А. Захаровой. - М.: Академия, 2006. - 272 с.
7. Теплотехника [Текст]: учебник / Под ред. В. Н. Луканина. - 4-е изд., испр. - М.: Высшая школа, 2003. - 671 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	$\mu C_p = 32,8367 + 0,0116611 t$	$\mu C_{pm} = 33,1494 + 0,0052749 t$
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	$\mu C_p = 41,3597 + 0,0144985 t$	$\mu C_{pm} = 38,3955 + 0,0105838 t$

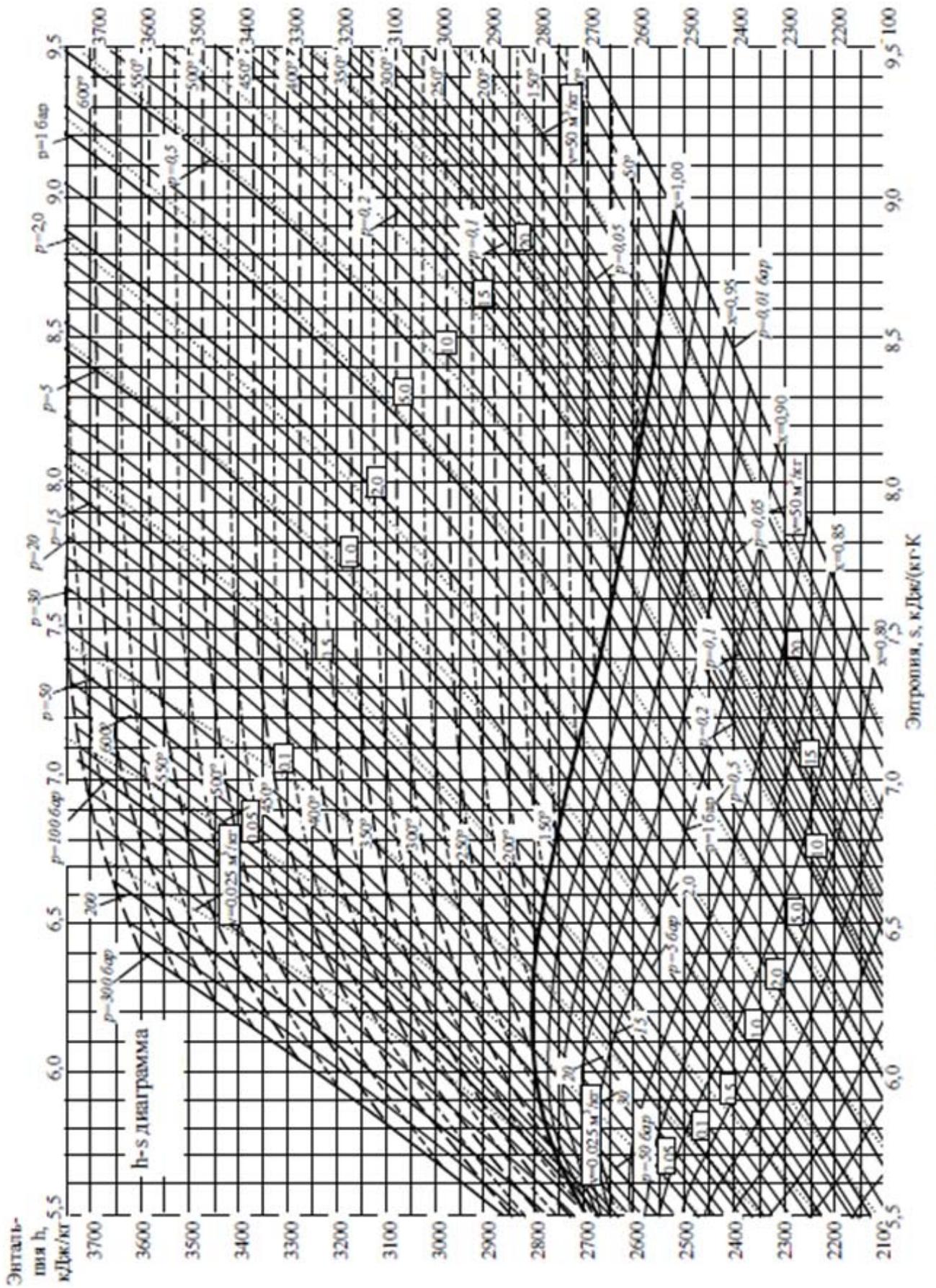


Рис. 8. h-s диаграмма водяного пара

H – d диаграмма влажного воздуха. В=745 мм рт.ст.

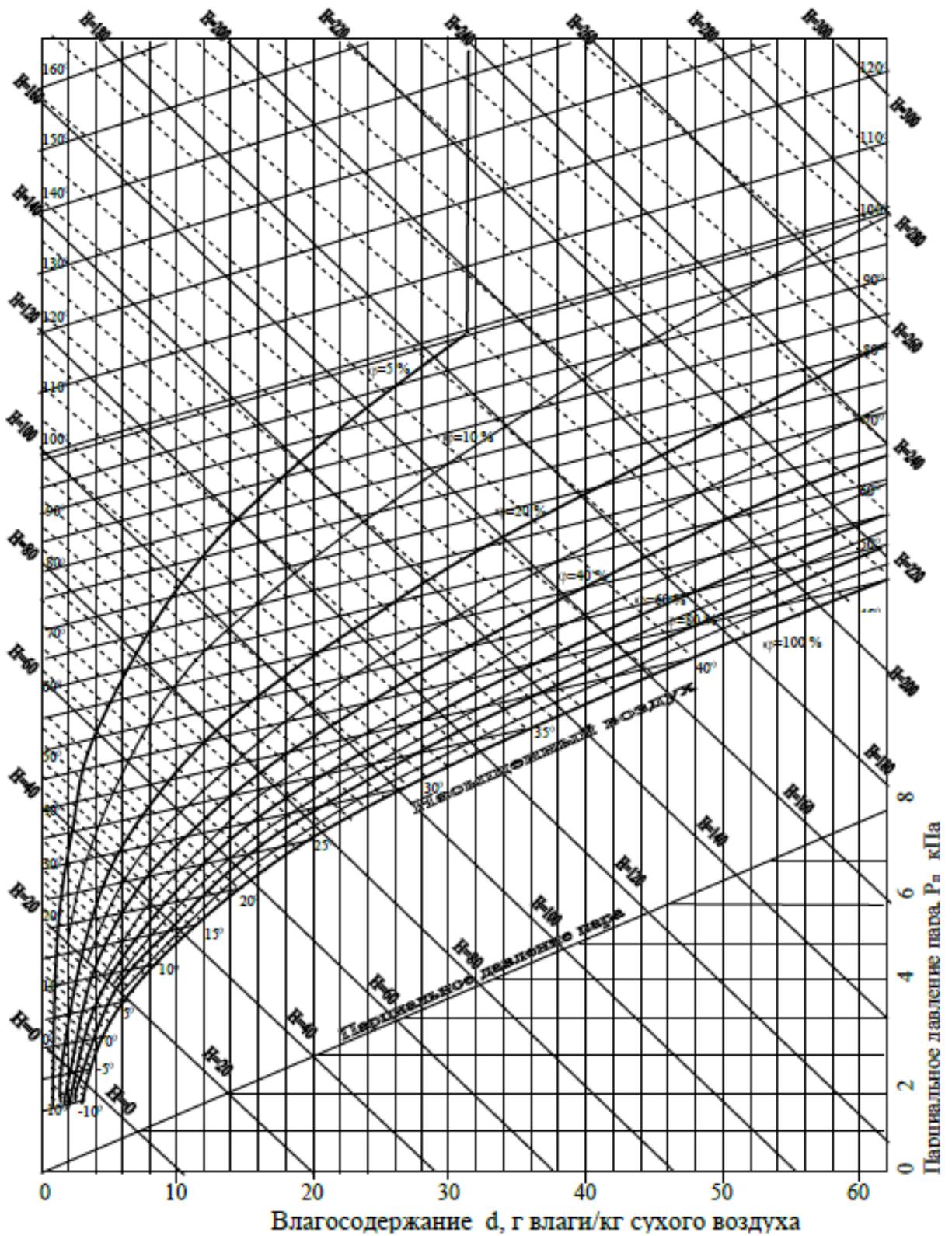


Рис. 9. H-d диаграмма влажного воздуха