

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 теплогазоснабжения

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

Исходные данные:  $V=$  , м<sup>3</sup>/мин;  $t=$  , °С;  $P_m=$  , кПа; газ -

Решение

1. Перевод единицы измерения объемного расхода газа из м<sup>3</sup>/мин в м<sup>3</sup>/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;  $V$ , м<sup>3</sup>/с – объемный расход газа;  $R$  – индивидуальная газовая постоянная, Дж/(кг К);

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

$\mu$  - 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 <sub>2</sub>	O <sub>2</sub>	CO <sub>2</sub>	H <sub>2</sub> 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;  
 $\Gamma_{N_2}$ ,  $\Gamma_{O_2}$ ,  $\Gamma_{CO_2}$ ,  $\Gamma_{H_2O}$  – 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  $\Gamma_{N_2}$ ,  $\Gamma_{O_2}$ ,  $\Gamma_{CO_2}$ ,  $\Gamma_{H_2O}$  – 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 <sub>2</sub>	N <sub>2</sub>	CO <sub>2</sub>	SO <sub>2</sub>	H <sub>2</sub> O	H <sub>2</sub>	N <sub>2</sub>	O <sub>2</sub>	N <sub>2</sub>	CO
t <sub>1</sub> , °C	50	120	55	20	25	18	22	28	30	45
t <sub>2</sub> , °C	250	350	300	450	400	150	180	220	280	150

Исходные данные: t<sub>1</sub> = °C; t<sub>2</sub> = °C; газ.

## Решение

1. Средняя изобарная мольная теплоемкость газа,  $\mu C_{pm}$ , 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  $\mu$  – 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  $\varepsilon$  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	$\varepsilon$	$t_1, \text{ }^\circ\text{C}$	$n$
0	$\text{CO}_2$	50	0,1	0	10	10	1,35
1	$\text{N}_2$	55	0,15	1	8	15	1,32
2	$\text{H}_2$	60	0,17	2	7	17	1,20
3	$\text{O}_2$	65	0,12	3	12	20	1,25
4	воздух	70	0,11	4	15	25	1,3
5	$\text{N}_2$	45	0,14	5	17	30	1,22
6	$\text{H}_2$	40	0,18	6	10	5	1,18
7	воздух	30	0,2	7	13	15	1,28
8	$\text{CO}$	50	0,19	8	9	25	1,26
9	$\text{O}_2$	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.

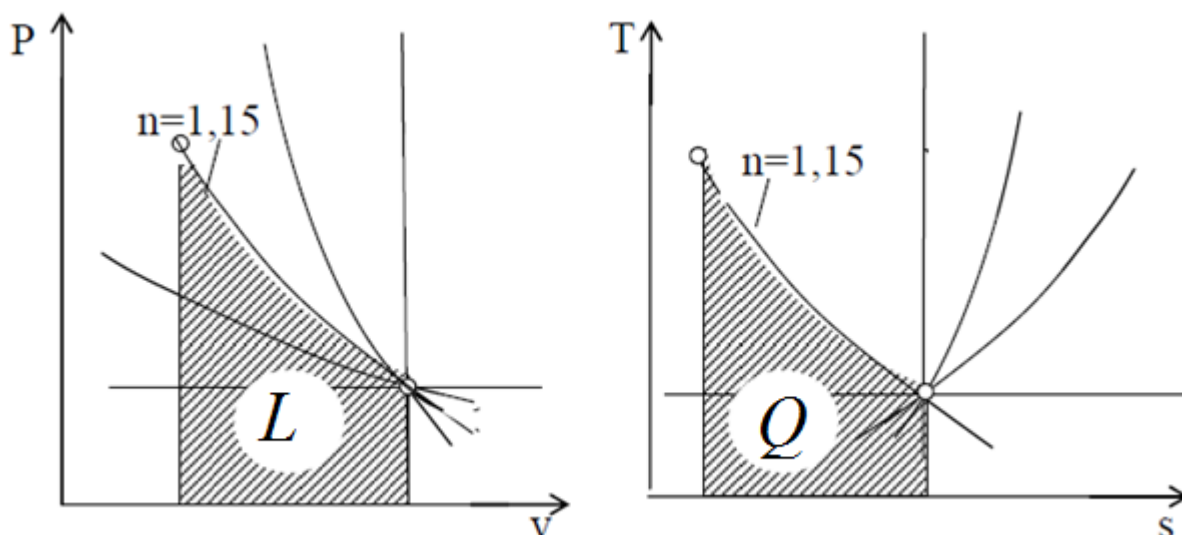


Рис.1. Политропический процесс сжатия в  $P$ - $v$  и  $T$ - $s$  координатах

### 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,  $\text{м}^3$ ;

$R$  – индивидуальная газовая постоянная,  $\text{Дж/кг} \cdot \text{К}$ :

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

$\mu$  - молекулярная масса газа,  $\text{кг/кмоль}$  (см. Прилож. табл.П.1);

$T_1$  – абсолютная температура в первой точке,  $\text{К}$ :

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

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 ( $\Delta U$ ), энтальпии ( $\Delta H$ ) и энтропии ( $\Delta S$ ):

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

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

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

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  $V$  м<sup>3</sup>/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  $\Delta t$  °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 <sup>3</sup> /мин	$P_k$ , бар	$\Delta t$ , °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;  $V_1 =$  , м<sup>3</sup>/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  $V = \quad$ , м<sup>3</sup>/мин – объемная производительность компрессора;

$\rho$  - плотность воздуха на входе в компрессор, кг/м<sup>3</sup> :

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

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

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

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

$P_1 = \quad$  Па (1 бар = 10<sup>5</sup> 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  $P_1 = \quad$ , бар - конечное давление сжатия и давление при всасывании.

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

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

2-я ступень: давление воздуха на входе  $P_2 = \quad$ , бар, на выходе из цилиндра  $P_k = \quad$ , 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  $T_1 = \quad$ , К, (см. п.1);  $k = 1,4$  – показатель адиабаты для воздуха.

4) Теоретическая работа привода компрессора 1-й ступени:

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

5) Работа 2-х ступенчатого компрессора:

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

где  $z = 2$  - число ступеней.

6) Мощность привода компрессора

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

где  $G = \quad$ , 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.

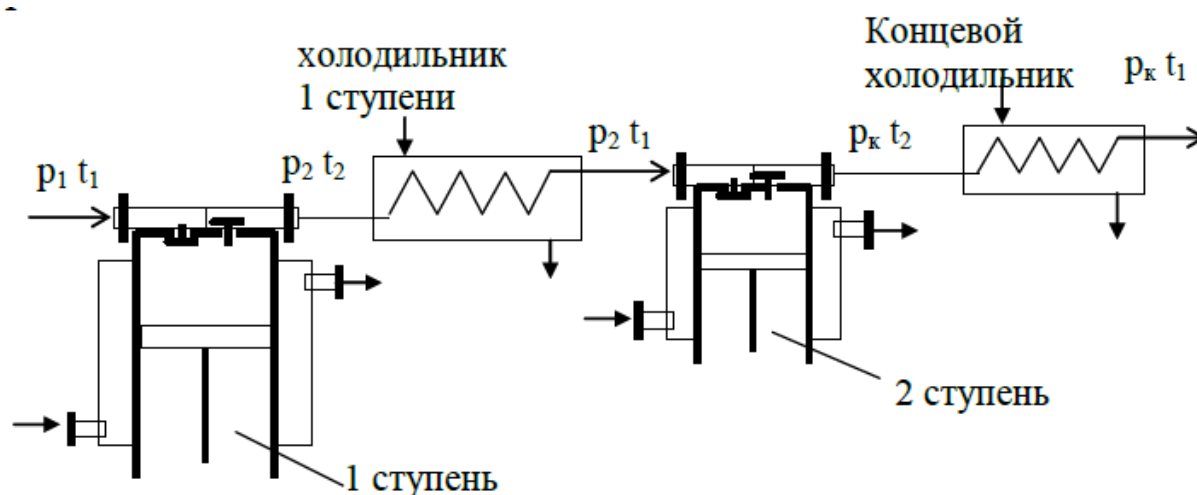


Рис2. Схема 2-х ступенчатого компрессора

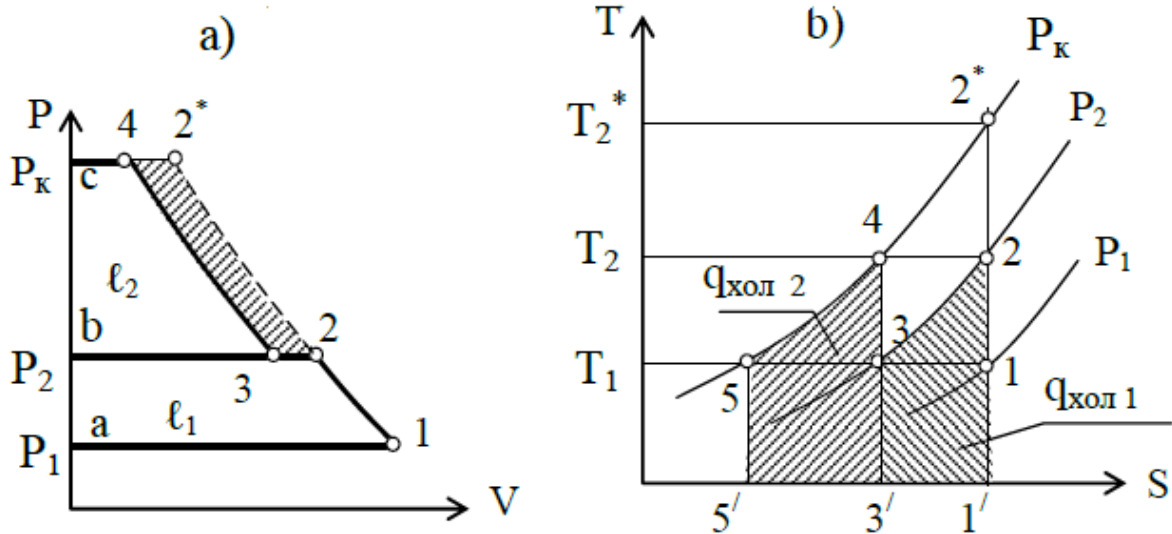


Рис.3 Процессы сжатия газа в двухступенчатом компрессоре

### 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  $\Delta u$ , изменение энтальпии  $\Delta h$  и изменение энтропии  $\Delta s$ ;
- 3) подводимую теплоту  $q_1$  и отводимую теплоту  $q_2$  в цикле;
- 4) работу цикла  $\ell_{ц}$ ;
- 5) термический КПД цикла  $\eta_t$ ;
- 6) Вычислить термический КПД цикла Карно,  $\eta^k$ , 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	$\varepsilon$	$\lambda$	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 <sup>3</sup> /кг	$T$ , К	$t$ , °C
1				
2				
3				
4				

Таблица 6.3 - Расчетные характеристики процессов цикла

Процессы	$C$ , кДж/(кг·К)	$\Delta u$ , кДж/кг	$\Delta h$ , кДж/кг	$\Delta s$ , 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	$\eta_t$	
Термический КПД цикла Карно	$\eta_K$	
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.

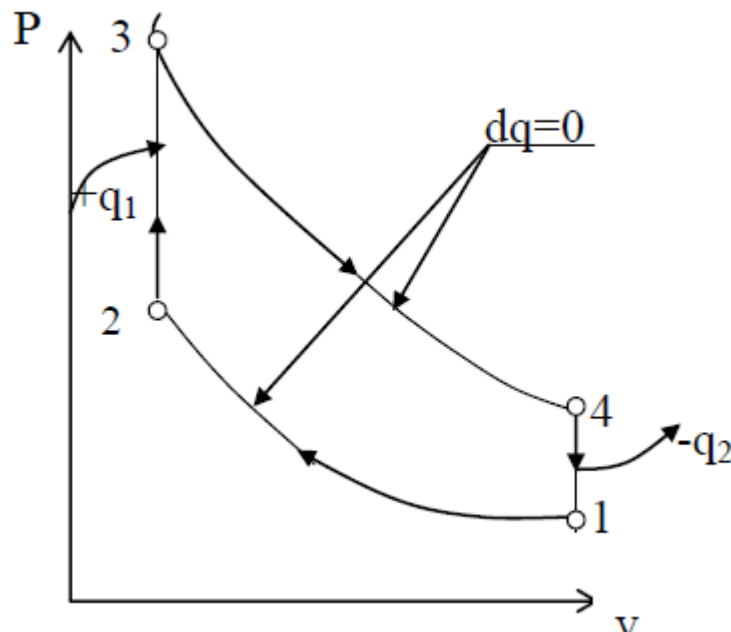


Рис.4. Цикл ДВС с изохорным подводом тепла

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;  $\varepsilon$  - 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  $\lambda$  - 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:

$\Delta u$  ,  $\Delta h$  ,  $\Delta s$ .

Изменения внутренней энергии  $\Delta u$  и энтальпии  $\Delta h$  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  $\Delta h$  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  $\Delta u_{3-4}$  и  $\Delta u_{4-1}$  будут отрицательные. Знак минус нужно сохранить.)

Точно так же определяем изменение энтальпии  $\Delta h$  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  $\Delta s$  – кДж/(кг·К), знак (-) в  $\Delta s_{4-1}$  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  $\eta_t$  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  $\Delta s$  из таблицы 6.3 рисуем в масштабе цикл ДВС в координатах T-s:

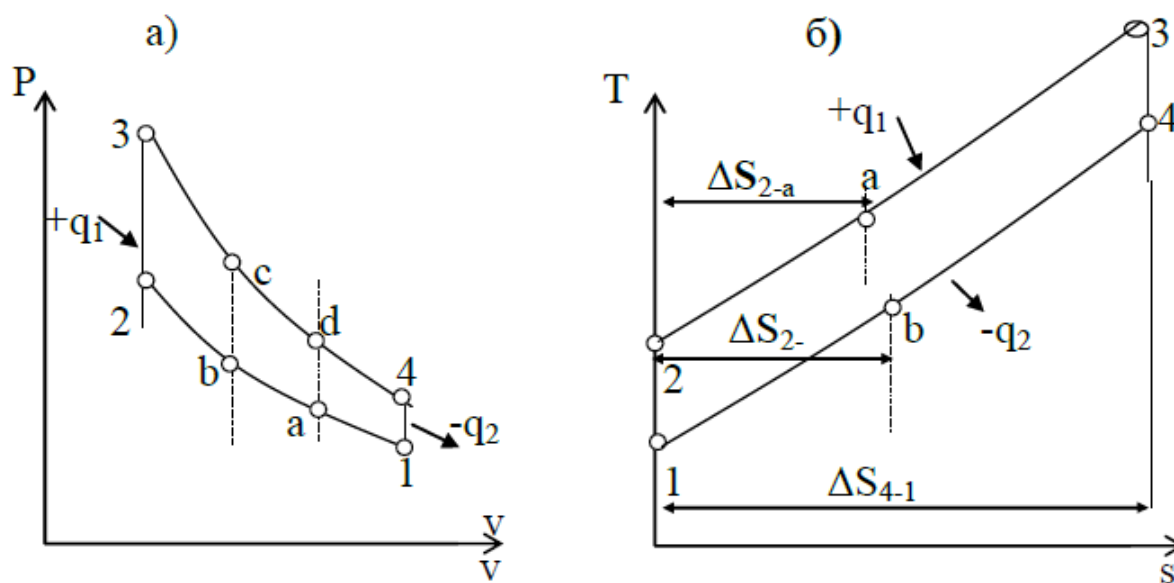


Рис.5 Теоретический цикл ДВС с изохорным сгоранием в P-v (а) и T-s (б) координатах

## 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 <sup>3</sup> /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:

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

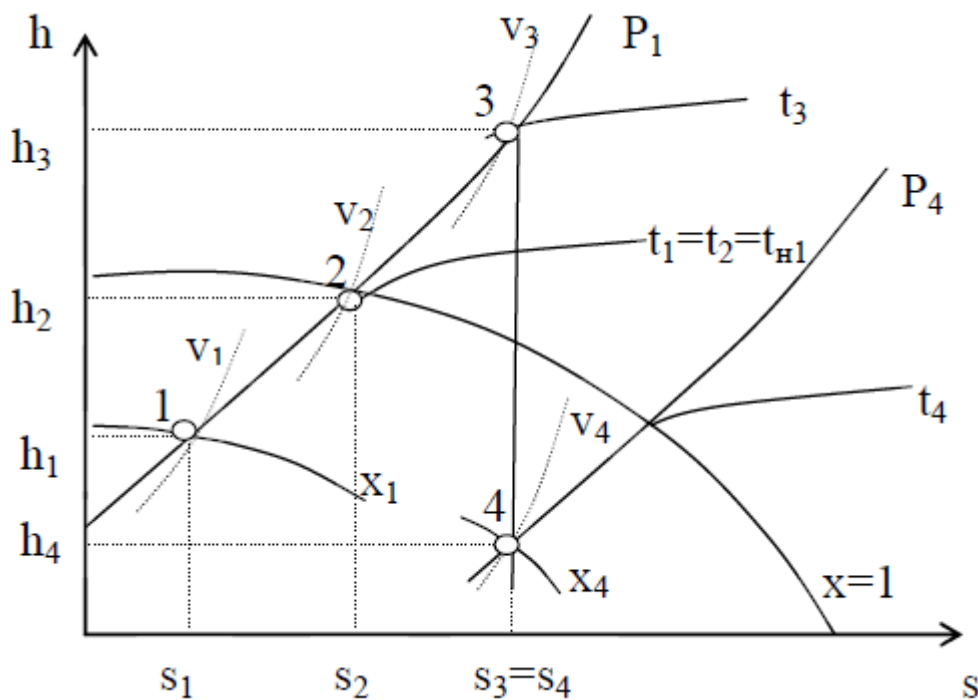


Рис.6. Процессы: 1 – 2 - подсушки пара, 2 – 3 - перегрев пара, 3 - 4 - расширения пара в турбине в h-s координатах

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:

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

теплота процесса:  $q=0$ .

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

### ЗАДАЧА № 8

В калорифер поступает атмосферный воздух с температурой  $t_1$  °С и относительной влажностью  $\varphi_1$  %. 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  $\varphi_1$ , (точка 1), для которой снимаем параметры  $d_1$  и  $H_1$  (рис.7).

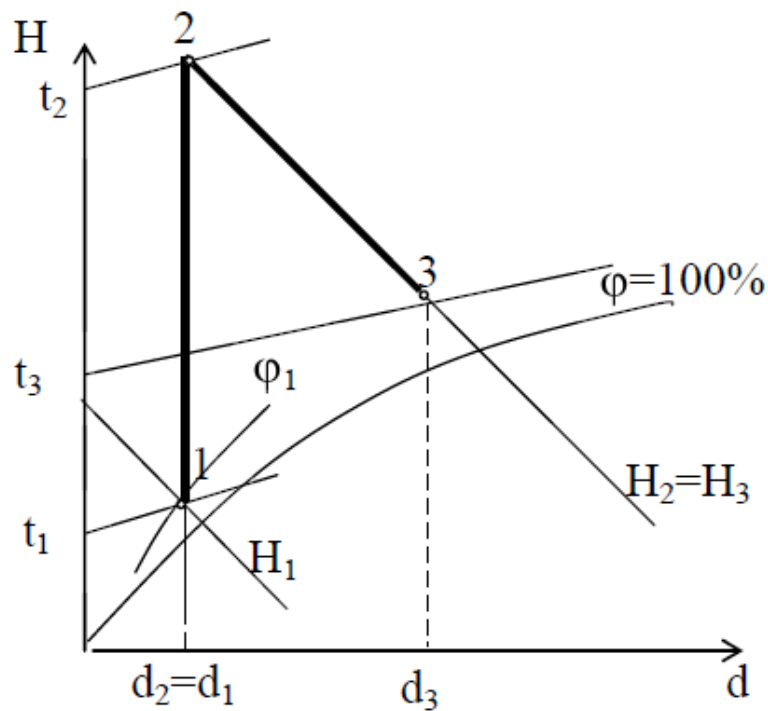


Рис.7. Схема процессов во влажном воздухе в сушильной установке: 1-2-процесс подогрева воздуха в калорифере; 2-3-процесс идеальной сушки (испарения влаги).

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.;  $\varphi_3$ , %. 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, $\mu$ , кг/кмоль	Плотн. газа, $\rho$ , кг/м <sup>3</sup>	R, Дж/(кг К)
Воздух	-	28,96	1,29	287,0
Кислород	O <sub>2</sub>	32,00	1,429	259,8
Азот	N <sub>2</sub>	28,026	1,252	296,8
Водород	H <sub>2</sub>	2,016	0,090	4124,0
Окись углерода	CO	28,01	1,250	296,8
Углекислый газ	CO <sub>2</sub>	44,01	1,977	188,9
Сернистый газ	SO <sub>2</sub>	64,06	2,926	129,8
Метан	CH <sub>4</sub>	16,032	0,717	518,8
Этилен	C <sub>2</sub> H <sub>4</sub>	28,052	1,251	296,6
Коксовый газ	-	11,50	0,515	721,0
Аммиак	NH <sub>3</sub>	17,032	0,771	488,3
Водяной пар	H <sub>2</sub> 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 $\mu C_p$ , кДж/(кмоль К)	Средняя теплоемкость $\mu C_{pm}$ , кДж/(кмоль К)
В пределах от 0 до 1000 <sup>o</sup> C		
O <sub>2</sub>	$\mu C_p = 29,5802 + 0,0069706 t$	$\mu C_{pm} = 29,2080 + 0,0040717 t$
N <sub>2</sub>	$\mu C_p = 28,5372 + 0,0053905 t$	$\mu C_{pm} = 28,7340 + 0,0023488 t$
CO	$\mu C_p = 28,7395 + 0,0058862 t$	$\mu C_{pm} = 28,8563 + 0,0026808 t$
SO <sub>2</sub>	$\mu C_p = 42,8728 + 0,0132043 t$	$\mu C_{pm} = 40,4386 + 0,0099562 t$
Воздух	$\mu C_p = 28,7558 + 0,0057208 t$	$\mu C_{pm} = 28,8270 + 0,0027080 t$
H <sub>2</sub> O	$\mu C_p = 32,8367 + 0,0116611 t$	$\mu C_{pm} = 33,1494 + 0,0052749 t$
В пределах от 0 до 1500 <sup>o</sup> C		
H <sub>2</sub>	$\mu C_p = 28,3446 + 0,003519 t$	$\mu C_{pm} = 28,7210 + 0,0012008 t$
CO <sub>2</sub>	$\mu C_p = 41,3597 + 0,0144985 t$	$\mu C_{pm} = 38,3955 + 0,0105838 t$

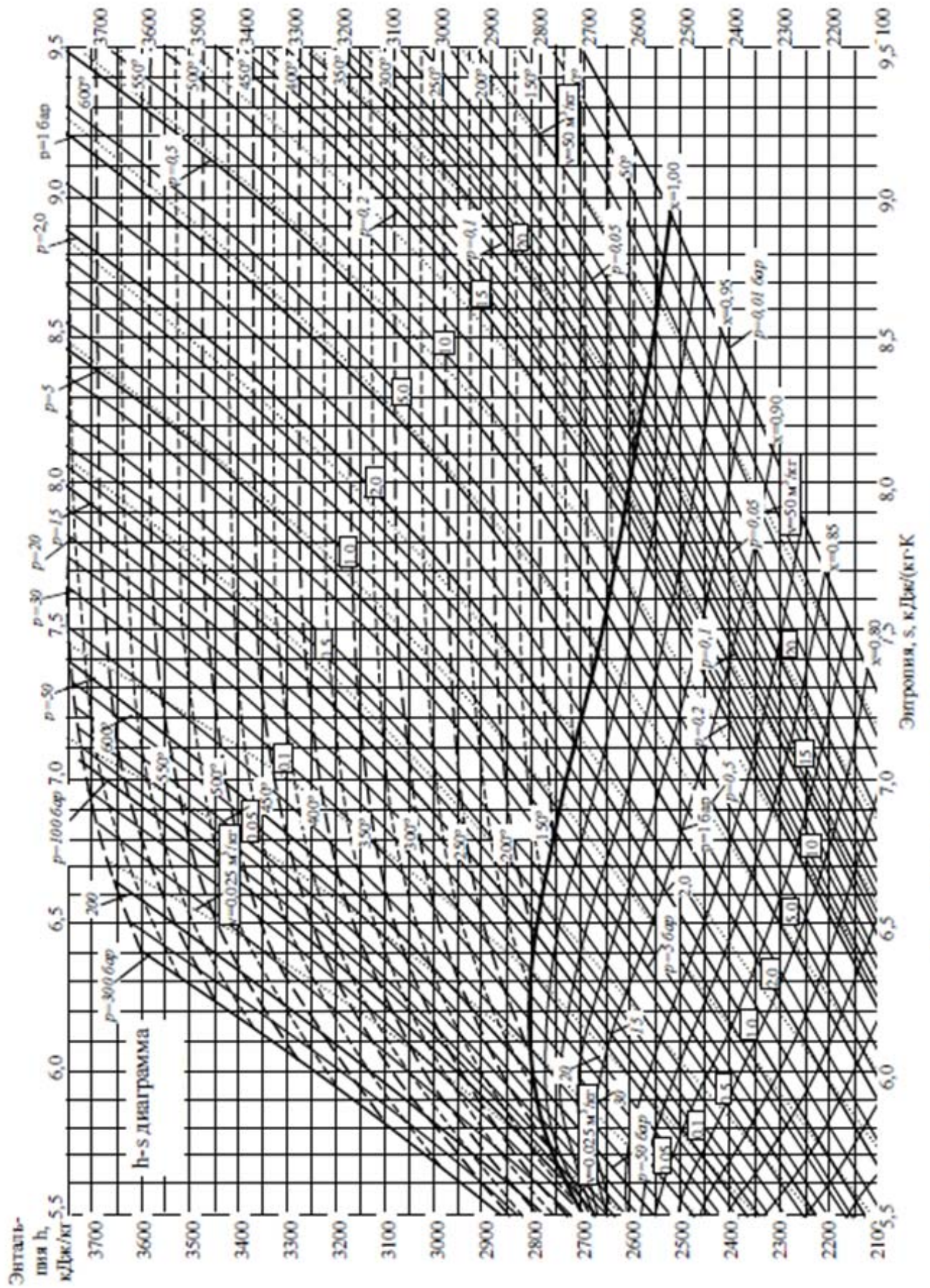


Рис. 8. h-s диаграмма водяного пара



