

**Министерство образования Республики Беларусь**

**Учреждение образования  
«Гомельский государственный технический  
университет имени П. О. Сухого»**

**Кафедра «Промышленная теплоэнергетика и экология»**

**Ю. А. Степанишина**

## **ТЕОРЕТИЧЕСКАЯ ТЕПЛОТЕХНИКА**

### **ПРАКТИКУМ**

**для студентов специальности  
1-43 01 03 «Промышленная теплоэнергетика»  
дневной и заочной форм обучения**

**Гомель 2016**

УДК 621.1.016(075.8)  
ББК 31.31я73  
С79

*Рекомендовано научно-методическим советом  
энергетического факультета ГГТУ им. П. О. Сухого  
(протокол № 6 от 23.02.2016 г.)*

Рецензент: зав. каф. «Электроснабжение» ГГТУ им. П. О. Сухого  
канд. техн. наук *А. О. Добродей*

**Степанишина, Ю. А.**

С79 Теоретическая теплотехника : практикум для студентов специальности 1-43 01 03 «Промышленная теплоэнергетика» днев. и заоч. форм обучения / Ю. А. Степанишина. – Гомель : ГГТУ им. П. О. Сухого, 2016. – 56 с. – Систем. требования: PC не ниже Intel Celeron 300 МГц ; 32 Mb RAM ; свободное место на HDD 16 Mb ; Windows 98 и выше ; Adobe Acrobat Reader. – Режим доступа: <http://elib.gstu.by>. – Загл. с титул. экрана.

Тематически практикум состоит из восьми тем, которые включают теоретическую и практическую части, рекомендаций для выполнения задания. Необходимые справочные данные и диаграммы представлены в приложениях.

Для практической подготовки по теоретической теплотехнике студентов специальности 1-43 01 03 «Промышленная теплоэнергетика» дневной и заочной форм обучения.

УДК 621.1.016(075.8)  
ББК 31.31я73

© Учреждение образования «Гомельский  
государственный технический университет  
имени П. О. Сухого», 2016

## ПРЕДИСЛОВИЕ

Практикум предназначен для приобретения необходимых навыков, позволяющих выполнять термодинамические расчеты рабочих процессов в теплосиловых установках, проводить тепловые расчеты теплообменного оборудования, обосновано выбирать режимы эксплуатации теплотехнических установок и оборудования.

Тематически практикум состоит из восьми тем:

1. идеальные газы, газовые смеси, теплоемкость;
2. первый закон термодинамики;
3. термодинамические процессы;
4. водяной пар;
5. влажный воздух;
6. термодинамика потока;
7. циклы паросиловых установок;
8. тепловой конструктивный расчет секционного водо - водяного подогревателя

Каждая тема состоит из теоретической и практической частей, рекомендаций для выполнения задания. Необходимые справочные данные и диаграммы представлены в приложениях.

Практикум способствует формированию академических, социально-личностных и профессиональных компетенций: умению работать самостоятельно, развитию креативности (поиск нестандартных решений), развитию межличностных взаимодействий, определению целей и способов их достижения, оцениванию эффективности работы оборудования.

## Тема 1. ИДЕАЛЬНЫЕ ГАЗЫ. ГАЗОВЫЕ СМЕСИ. ТЕПЛОЕМКОСТЬ

Под идеальным газом понимают воображаемый газ, в котором отсутствуют силы притяжения между молекулами, а собственный объем молекул несоизмеримо мал по сравнению с объемом междумолекулярного пространства. Таким образом, молекулы идеального газа принимаются за материальные точки. У действительно существующих газов при высоких температурах и малых давлениях можно пренебречь силами притяжения и объемом самих молекул. Поэтому такие газы можно считать идеальными.

В тех газах, которые находятся в состояниях, до статочно близких к сжижению, нельзя пренебречь силами притяжения между молекулами и объемом последних. Такие газы нельзя отнести к идеальным, и их называют реальными газами.

Характеристическое уравнение идеального газа или уравнение состояния связывает между собой основные параметры состояния - давление, объем и температуру  $\square$  и может быть представлено следующими уравнениями (1.1) и (1.2).

$$pV = mRT, (1.1)$$

$$pv = RT, (1.2)$$

где  $p$  - давление газа, Па;  $V$  - объем газа, м<sup>3</sup>;  $m$  - масса газа, кг;  $R$  - газовая постоянная для 1 кг газа, Дж/(кг·град);  $\mathcal{U}$  - удельный объем газа, м<sup>3</sup>/кг;

Каждое из этих уравнений отличается от другого лишь тем, что относится к различным массам газа.

Газовая постоянная конкретного газа, отнесенная к 1 кг газа, определяется из уравнения (1.3).

$$R_i = \frac{R_\mu}{\mu_i}, (1.3)$$

где  $R_\mu$  - универсальная газовая постоянная  $R_\mu = 8314$ , Дж/(кг·град);  
 $\mu$  - масса 1 кмольа газа в кг (численно равная молекулярной массе газа).

Состав газовой смеси определяется количеством каждого из газов, входящих в смесь, и может быть задан массовыми, объемными и мольными долями.

Массовая доля определяется по формуле (1.4) и представляет собой отношение массы отдельного газа, входящего в смесь, к массе всей смеси.

$$g_i = \frac{m_i}{m_{\text{см}}}, \quad (1.4)$$

где  $m_i$  - масса  $i$ -го компонента газовой смеси, кг;  $m_{\text{см}}$  - масса газовой смеси, кг.

Объемной долей газа называют отношение приведенного объема каждого компонента, входящего в смесь, к объему всей смеси и определяют по формуле (1.5).

$$r_i = \frac{V_i}{V_{\text{см}}}, \quad (1.5)$$

где  $V_i$  - объем  $i$ -го компонента газовой смеси,  $\text{м}^3$ ;  $V_{\text{см}}$  - объем всей газовой смеси,  $\text{м}^3$ .

Кажущаяся молекулярная масса смеси определяется по формуле (1.6).

$$\mu_{\text{см}} = \sum_{i=1}^n r_i \cdot \mu_i, \quad (1.6)$$

где  $\mu_i$  - молекулярная масса  $i$ -го компонента газовой смеси, кмоль/кг.

Перевод объемных долей в массовые производится по формуле (1.7).

$$g_i = \frac{r_i \cdot \mu_i}{\mu_{\text{см}}}, \quad (1.7)$$

Газовую постоянную смеси газов  $R_{\text{см}}$  можно выразить либо через газовые постоянные отдельных компонентов, входящих в смесь, либо через кажущуюся молекулярную массу смеси по формуле (1.8).

$$R_{\text{см}} = \sum_{i=1}^n g_i \cdot R_i = \frac{R_{\mu}}{\mu_{\text{см}}}, \quad \text{Дж}/(\text{кг} \cdot \text{град}), \quad (1.8)$$

Связь между давлением газовой смеси и парциальными давлениями отдельных компонентов, входящих в смесь, описывается законом Дальтона по формуле (1.9).

$$p_{\text{см}} = \sum_{i=1}^n p_i, \quad (1.9)$$

где  $p_i$  - парциальные давления отдельных компонентов, Па.

Парциальные давления отдельных компонентов можно определить используя уравнение (1.10).

$$p_i = r_i \cdot p_{\text{см}} = g_i \cdot \frac{R_i}{R_{\text{см}}} \cdot p_{\text{см}}, \quad (1.10)$$

Теплоёмкостью называют количество тепла, которое необходимо сообщить телу (газу), чтобы повысить температуру какой-либо его количественной единицы на 1°C.

Для измерения количества тепла широко пользуются внесистемной единицей тепла □ килокалорией (ккал). Пересчет кДж в ккал и обратно производится по соотношениям (1.11) и (1.12).

$$1 \text{ ккал} = 4,19 \text{ кДж}, \quad (1.11)$$

$$1 \text{ кДж} = 0,239 \text{ ккал}, \quad (1.12)$$

В зависимости от выбранной количественной единицы различают мольную теплоемкость □  $c_{\mu}$ , кДж/(кмоль·град) или ккал/(кмоль·град); массовую теплоемкость □  $c$ , кДж/(кг·град) или ккал/(кг·град); объемную теплоемкость □  $c'$ , кДж/(м<sup>3</sup>·град) или ккал/(м<sup>3</sup>·град).

Теплоемкость реальных газов зависит от их природных свойств, характера процесса, температуры и давления в связи с этим различают массовую, объемную и мольную теплоемкости при постоянном давлении и при постоянном объеме; при обозначении их используют нижние индексы с указанием неизменного параметра (давление  $p$  или объем  $v$ ). Между теплоемкостями при постоянном давлении и постоянном объеме существует зависимость, описываемая соотношением (1.13).

$$c_p - c_v = R_{\mu}, \quad (1.13)$$

Большое значение имеет отношение теплоемкостей при постоянном давлении и постоянном объеме, указанное соотношением (1.14).

$$k = \frac{c_p}{c_v}, \quad (1.14)$$

где  $k$  – показатель адиабаты (или коэффициент Пуассона), который принимается для одноатомных газов  $k = 1,67$ , для двухатомных газов  $k = 1,4$ , для трех- и многоатомных газов  $k = 1,29$ .

Массовая теплоемкость всей газовой смеси или  $i$ -го компонента при постоянном объеме определяется по формулам (1.15) и (1.16).

$$c_{vi} = \frac{R_i}{k - 1}, \text{ Дж/(кг·град)} \quad (1.15)$$

$$c_{v_{см}} = \sum_{i=1}^n c_{vi} \cdot g_i = \sum_{i=1}^n \frac{g_i \cdot R_i}{k-1}, \text{ Дж/(кг}\cdot\text{град)}, (1.16)$$

Объемная теплоемкость  $i$ -го компонента или всей газовой смеси при постоянном объеме определяется по формулам (1.17) и (1.18).

$$c'_i = \frac{\mu_i \cdot c_{vi}}{22,4}, \text{ Дж/(м}^3\cdot\text{град)}, (1.17)$$

$$c'_{см} = \sum_{i=1}^n r_i \cdot c'_i, \text{ Дж/(м}^3\cdot\text{град)}, (1.18)$$

Мольная теплоемкость  $i$ -го компонента или всей газовой смеси при постоянном объеме определяется по формулам (1.19) и (1.20).

$$c_{\mu_i} = \mu_i \cdot c_{vi}, \text{ Дж/(кмоль}\cdot\text{град)}, (1.19)$$

$$c_{\mu_{см}} = \sum_{i=1}^n r_i \cdot c_{\mu_i}, \text{ Дж/(кмоль}\cdot\text{град)}, (1.20)$$

После изучения теоретической части по теме 1 выполнить решение задачи №1, исходные данные принимаются по двум последним цифрам номера зачетной книжки по таблице 1.

#### ЗАДАЧА №1

Объемный состав продуктов сгорания топлива следующий:  $\text{CO}_2$ ,  $\text{CO}$ ,  $\text{O}_2$ ,  $\text{N}_2$ ,  $\text{NO}_2$ . Определить массовый состав газа, кажущуюся молекулярную массу и газовую постоянную, парциальные давления составляющих смеси, а также массовую, объемную и мольную теплоемкости смеси при нормальных условиях ( $p_{см} = 760 \text{ мм рт.ст.}$ ).

Таблица 1

Газ	Последняя цифра номера									
	0	1	2	3	4	5	6	7	8	9
$\text{CO}, \%$	15	14	13	15	11	10	9	8	7	6
$\text{NO}_2, \%$	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14
Газ	Предпоследняя цифра номера									
	0	1	2	3	4	5	6	7	8	9
$\text{CO}_2, \%$	0,25	0,5	1	1,5	2	2,5	3	3,5	4	4,5
$\text{O}_2, \%$	10	10,5	11	11,5	12	12,5	13	13,5	14	14,5
$\text{N}_2, \%$	определяется расчетом									

#### УКАЗАНИЯ К РЕШЕНИЮ ЗАДАЧИ №1

По условию задачи газовая смесь состоит из пяти компонентов, содержание которых приводится в процентном отношении, поэтому содержание газа  $\text{N}_2$  можно определить как разность между полным

составом газа (100 %) и известным суммарным процентным содержанием четырех компонентов ( $\text{CO}$ ,  $\text{NO}_2$ ,  $\text{CO}_2$ ,  $\text{O}_2$ ).

Объемную долю  $i$ -го компонента ( $r_i$ ) определить отношением процентного содержания  $i$ -го компонента ко всему объему газа (100%).

По формуле (1.10) определить парциальные давления компонентов газовой смеси и указать их значения в Па ( $\text{Н/м}^2$ ), для этого воспользоваться соотношением:

$$1 \text{ мм рт. ст.} = 133,3 \text{ Па.}$$

Определить молярные массы компонентов газовой смеси. Например:

$$\mu_{\text{CO}_2} = 12 + 2 \cdot 16 = 44, \text{ кг/кмоль}$$

$$\mu_{\text{N}_2} = 2 \cdot 14 = 28, \text{ кг/кмоль}$$

Кажущуюся молярную массу смеси определить по формуле (1.6).

Перевести объемные доли в массовые в соответствии с соотношением (1.7) и определить массовый состав газовой смеси (масса  $i$ -го компонента в смеси -  $m_i$ ), воспользовавшись соотношением (1.4).

Определить газовую постоянную компонентов и всей газовой смеси по формулам (1.3) и (1.8).

Массовую теплоемкость при постоянном объеме компонентов и всей газовой смеси определить по формулам (1.15) и (1.16), объемную теплоемкость  $\square$  по формулам (1.17) и (1.18), а мольную теплоемкость  $\square$  по формулам (1.19) и (1.20)

## Тема 2. ПЕРВЫЙ ЗАКОН ТЕРМОДИНАМИКИ

Первый закон термодинамики является частным случаем закона сохранения и превращения энергии, он устанавливает эквивалентность при взаимных превращениях механической и тепловой энергии. Аналитическое выражение первого закона термодинамики или основное уравнение тепла в дифференциальной форме для любого тела имеет следующий вид:

$$dQ = dU + dL, \quad (2.1),$$

а для бесконечно малого изменения состояния 1 кг любого газа

$$dq = du + dl, \quad (2.2)$$

где  $dQ$ ,  $dq$  - количество тепла, сообщенного извне рабочему телу определенной массы, Дж;  $dU$ ,  $du$  - изменение внутренней энергии ра-



бочего тела, Дж;  $dL$ ,  $dl$  - работа, совершенная рабочим телом по преодолению внешнего давления, «внешняя работа» работа расширения, Дж.

Каждый из трех членов этого уравнения может быть в зависимости от характера изменения состояния положительным, или отрицательным, или равным нулю.

Для конечного изменения состояния уравнения (2.1) и (2.2.) соответственно имеют вид:

$$Q = \Delta U + L, \quad (2.3)$$

$$q = \Delta u + l, \quad (2.4)$$

Величина работы расширения для 1 кг газа определяется из уравнения:

$$dl = p dv,$$

$$l = \int_{v_1}^{v_2} p dv, \quad (2.5)$$

Изменение внутренней энергии идеального газа для любого процесса при бесконечно малом изменении состояния (для 1 кг)

$$du = c_v dt,$$

интегрируя в пределах от  $t_1$  до  $t_2$ , получаем

$$\Delta u = c_v \cdot (t_2 - t_1), \quad (2.6)$$

где  $c_v$  - средняя массовая теплоемкость при постоянном объеме в пределах от  $t_1$  до  $t_2$ , Дж/(кг·град).

После изучения теоретической части по теме 2 выполнить решение задачи №2, исходные данные принимаются по двум последним цифрам номера зачетной книжки по таблице 2.1.

#### ЗАДАЧА №2

Воздух с начальным объемом  $V_1$ , м<sup>3</sup>, начальным давлением  $p_1$ , МПа и начальной температурой  $t_1$ , °С сжимается политропно до уменьшения объема в  $\epsilon$  раз. Определить массу сжимаемого воздуха, давление, удельный объем и температуру в конце сжатия, величину работы сжатия (удельную и полную), изменение внутренней энергии, количество отведенного или подведенного тепла. Изобразить в  $p$ - $v$  - координатах процессы с показателями политропы  $n = 0$ ;  $n = 1$ ;  $n = k$ ;  $n = \pm \infty$ . Нанесите цветным карандашом кривую процесса с указанным в условии задачи показателем политропы.

Таблица 2.1

Величина	Последняя цифра номера									
	0	1	2	3	4	5	6	7	8	9
$t_1, ^\circ\text{C}$	55	50	45	40	35	30	25	20	15	10
$n$	1,15	1,25	1,35	1,45	1,55	1,65	1,55	1,45	1,35	1,25
Величина	Предпоследняя цифра номера									
	0	1	2	3	4	5	6	7	8	9
$p_1, \text{МПа}$	0,1	0,2	0,3	0,25	0,15	0,1	0,2	0,3	0,25	0,15
$V_1, \text{м}^3$	10	11	13	15	17	18	16	14	12	10
$\varepsilon$	14,5	13,5	12,5	10,5	11,5	9,5	8,5	7,5	6,5	5,5

## УКАЗАНИЯ К РЕШЕНИЮ ЗАДАЧИ №2

Определить абсолютную температуру воздуха в начале процесса сжатия:  $T_1 = 273,15 + t_1, \text{K}$

Степень сжатия выражает во сколько раз уменьшится объем среды и определяется как

$$\varepsilon = V_1/V_2 = v_1/v_2, \quad (2.7)$$

Зависимость между начальными и конечными параметрами в политропном процессе описывается соотношениями:

$$\frac{T_2}{T_1} = \left( \frac{v_1}{v_2} \right)^{n-1}, \quad (2.8)$$

и

$$\frac{T_2}{T_1} = \left( \frac{p_2}{p_1} \right)^{\frac{n-1}{n}}, \quad (2.9)$$

Определить температуру в конце процесса ( $T_2$ ) по формуле (2.8), учитывая формулу (2.7).

Давление в конце процесса выразить из соотношения (2.9), объем – из соотношения (2.7).

Массу воздуха  $m$  определить из уравнения Клайперона-Менделеева по формуле (1.1), учитывая, что газовая постоянная для воздуха  $R = 287, \text{Дж}/(\text{кг}\cdot\text{К})$ , подставив значения  $p_1, V_1, T_1$ .

Удельный объем – термодинамический параметр, определяемый отношением объема система к её массе:

$$v = V/m, \quad (2.10)$$

По формуле (2.10) определить удельные объемы в начале и в конце процесса сжатия.

Удельная работа сжатия в политропном процессе определяется по формуле (2.11).

$$l = \frac{1}{n-1}(p_1 \cdot v_1 - p_2 \cdot v_2), \text{ Дж/кг} \quad (2.11)$$

Полная работа сжатия  $m$ , кг воздуха  $L$  определяется по соотношению (2.11), заменяя величины удельных объемов на их абсолютное значение ( $V_1$ , и  $V_2$ ).

Удельное изменение внутренней энергии определить по формуле (2.6). Величину средней массовой теплоемкости при постоянном объеме определить при средней температуре воздуха ( $t_{cp} = (t_1 + t_2)/2$ ) методом интерполирования по данным таблицы 2.2.

Таблица 2.2

Температура	Массовая теплоемкость воздуха при постоянном объеме
$t, ^\circ\text{C}$	$c_v, \text{ кДж}/(\text{кг}\cdot^\circ\text{C})$
0	0,7164
100	0,7193
200	0,7243
300	0,7319
400	0,7415
500	0,7519
600	0,7624
700	0,7733
800	0,7842
900	0,7942
1000	0,8039
1100	0,8127

Пример: Определить величину средней массовой теплоемкости воздуха при постоянном объеме при средней температуре  $t_{cp} = 392,3$   $^\circ\text{C}$ .

По таблице 2.2 определить границы интервала интерполирования и выписать соответствующие значения.

$t, ^\circ\text{C}$	$c_v, \text{ кДж}/(\text{кг}\cdot^\circ\text{C})$
300	0,7319
400	0,7415

$$c_v^{t_{cp}} = \left( \frac{0,7415 - 0,7319}{400 - 300} \right) \cdot (392,3 - 300) + 0,7319 = 0,7408 \text{ ,кДж}/(\text{кг}\cdot^\circ\text{C})$$

Полное изменение внутренней энергии газа  $\Delta U$  определить произведением массы газа на удельное изменение внутренней энергии. Общее количество теплоты в процессе  $Q$  определить по формуле (2.3).

Значение показателя политропы определяет расположение и характер протекания политропического процесса на  $p-v$  диаграмме (рис. 2.1).

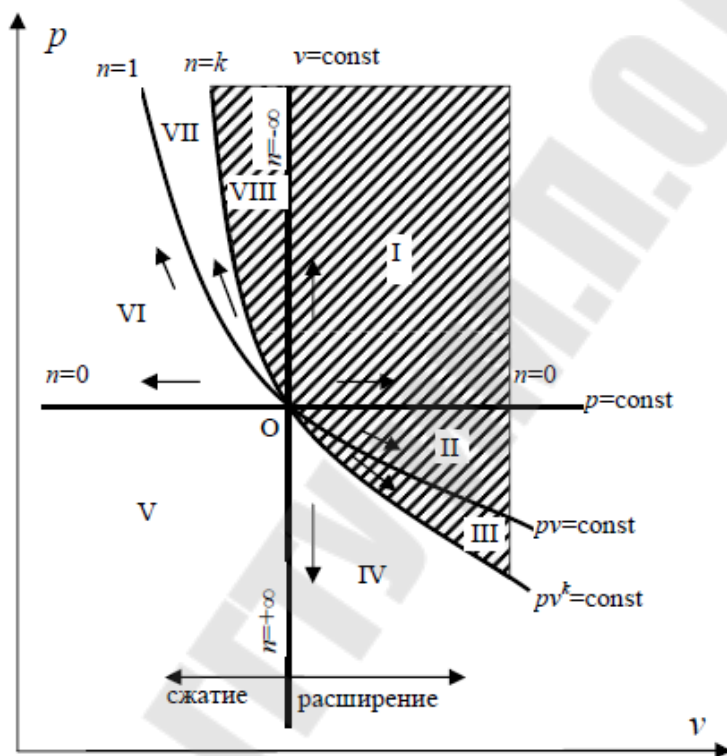


Рис. 2.1.  $p-v$  диаграмма термодинамических процессов

Все процессы (см. рис.2.1), исходящие из точки  $O$  и располагаемые левее изохоры  $n=\pm\infty$ , имеют отрицательную работу, так как сопровождаются сжатием рабочего тела. Справа от изохоры  $n=\pm\infty$  положительную работу, так как сопровождаются расширением рабочего тела. Процессы, начинающиеся в точке  $O$  и располагающиеся правее и выше адиабаты ( $n=k=\text{const}$ ), в областях I, II, III и VII (заштрихованы) протекают с подводом теплоты извне, а в областях IV, V, VI и VIII с отводом теплоты.

Необходимо зарисовать в  $p-v$  диаграмме термодинамические процессы (см. рис.2.1), по значениям  $L$  и  $Q$  определить область протекания процесса, по координатам точки 1 ( $p_1$  и  $v_1$ ) и 2 ( $p_2$  и  $v_2$ ) построить процесс на диаграмме.

### Тема 3. ТЕРМОДИНАМИЧЕСКИЕ ПРОЦЕССЫ

Основными термодинамическими процессами являются:

- 1) Изохорный процесс ( $v = \text{const}$ ) □ процесс сообщения или отнятия тепла при постоянном объеме газа;
- 2) Изобарный процесс ( $p = \text{const}$ ) □ процесс сообщения или отнятия тепла при постоянном давлении газа;
- 3) Изотермический процесс ( $t = \text{const}$ ) □ процесс сообщения или отнятия тепла при постоянной температуре газа;
- 4) Адиабатный процесс ( $dq = 0$ ) □ процесс без сообщения или отнятия тепла извне;
- 5) Политропный процесс □ процесс, в котором изменение параметров подчиняется уравнению  $pv^n = \text{const}$ .

#### ИЗОХОРНЫЙ ПРОЦЕСС

Изображение процесса на  $p-v$  и  $T-S$  диаграммах представлено на рис. 3.1.

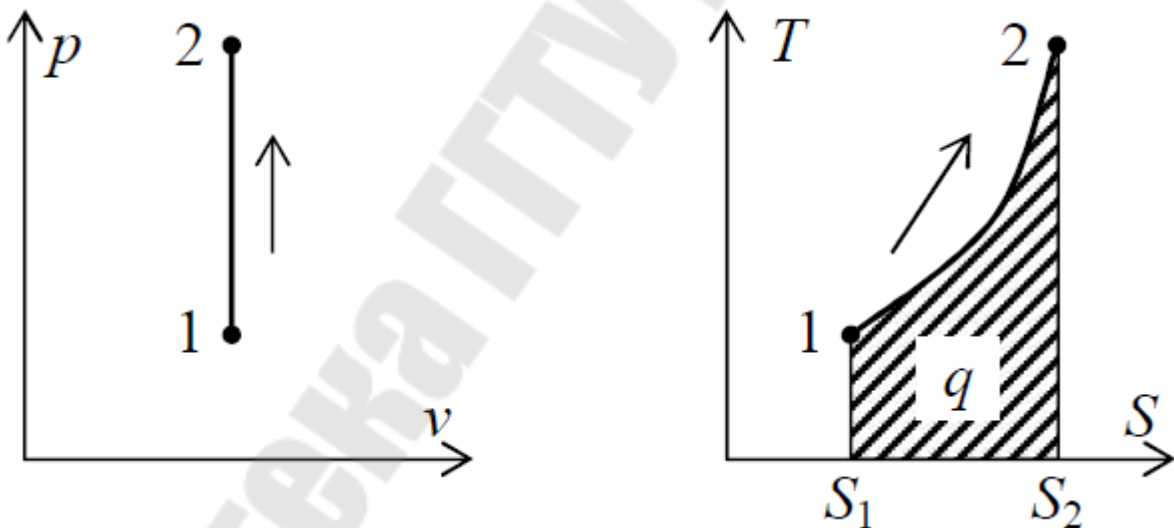


Рис. 3.1. Изохорный процесс в  $p-v$  и  $T-S$  диаграммах

Зависимость между начальными и конечными параметрами процесса определяется соотношением (3.1).

$$\frac{p_1}{p_2} = \frac{T_1}{T_2}, \quad (3.1)$$

Работа расширения в этом процессе равна нулю.

Изменение внутренней энергии в соответствии с первым законом термодинамики определяется формулой (3.2).

$$\Delta u = q = c_v \cdot (t_2 - t_1), \quad (3.2)$$

Изменение энтропии определяется формулой (3.3).

$$\Delta S = c_v \cdot \ln\left(\frac{p_2}{p_1}\right) = c_v \cdot \ln\left(\frac{T_2}{T_1}\right), \quad (3.3)$$

### ИЗОБАРНЫЙ ПРОЦЕСС

Изображение процесса на  $p - v$  и  $T - S$  диаграммах представлено на рис. 3.2.

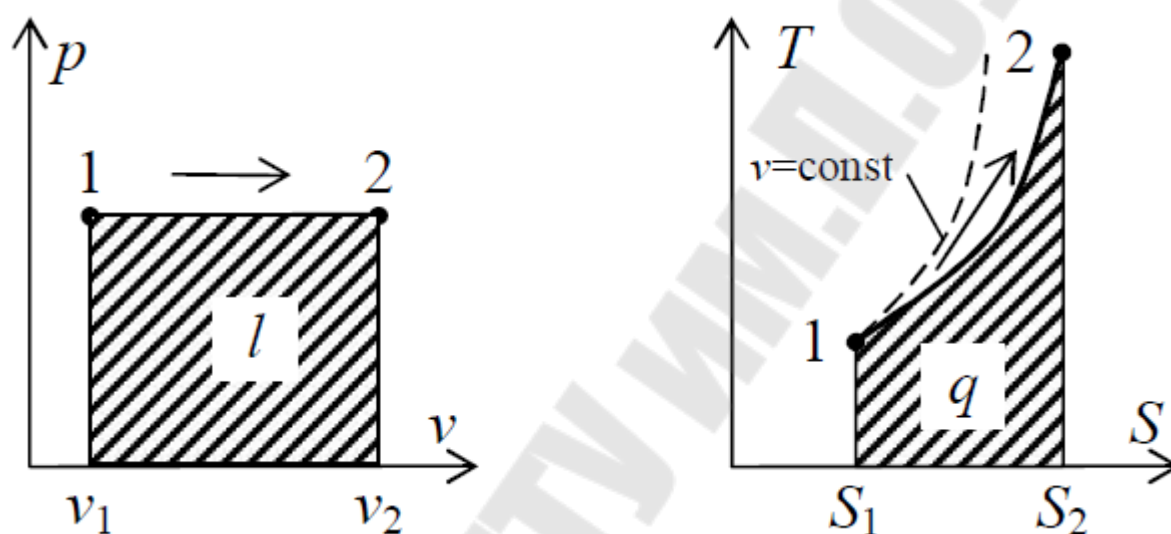


Рис. 3.2. Изобарный процесс в  $p - v$  и  $T - S$  диаграммах

Зависимость между начальными и конечными параметрами процесса определяется соотношением (3.4).

$$\frac{v_1}{v_2} = \frac{T_1}{T_2}, \quad (3.4)$$

Работа расширения 1 кг газа определяется по формуле (3.5).

$$l = p \cdot (v_2 - v_1) = R \cdot (T_2 - T_1), \quad (3.5)$$

Количество теплоты, сообщаемое 1 кг газа при нагревании (охлаждении) определяется по формуле (3.6).

$$q = c_p \cdot (t_2 - t_1), \quad (3.6)$$

Изменение внутренней энергии 1 кг газа определяется по формуле (3.7).

$$\Delta u = c_v \cdot (t_2 - t_1), \quad (3.7)$$

Изменение энтропии определяется формулой (3.8).

$$\Delta S = c_p \cdot \ln\left(\frac{T_2}{T_1}\right), \quad (3.8)$$

## ИЗОТЕРМИЧЕСКИЙ ПРОЦЕСС

Изображение процесса на  $p - v$  и  $T - S$  диаграммах представлено на рис. 3.3.

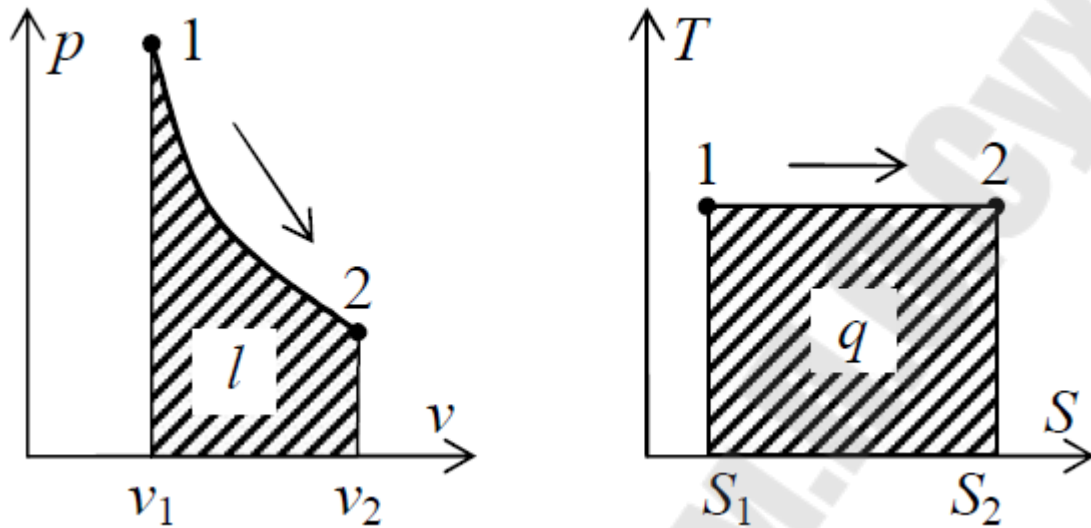


Рис. 3.3. Изотермический процесс в  $p - v$  и  $T - S$  диаграммах  
Зависимость между начальными и конечными параметрами процесса определяется соотношением (3.9).

$$\frac{p_1}{p_2} = \frac{v_2}{v_1}, \quad (3.9)$$

Работа расширения 1 кг газа определяется по формуле (3.10).

$$l = p_1 \cdot v_1 \cdot \ln\left(\frac{v_2}{v_1}\right) = p_1 \cdot v_1 \cdot \ln\left(\frac{p_1}{p_2}\right), \quad (3.10)$$

Количество теплоты, сообщаемое или отнимаемое от 1 кг газа определяется по формуле (3.11).

$$q = l, \quad (3.11)$$

Так как в изотермическом процессе  $t = \text{const}$ , то для идеального газа изменение внутренней энергии 1 кг газа определяется по формуле (3.12).

$$\Delta u = c_v \cdot (t_2 - t_1) = 0, \quad (3.12)$$

Изменение энтропии определяется формулой (3.13).

$$\Delta S = R \cdot \ln\left(\frac{p_1}{p_2}\right) = R \cdot \ln\left(\frac{v_2}{v_1}\right), \quad (3.13)$$

## АДИАБАТНЫЙ ПРОЦЕСС

Изображение процесса на  $p - v$  и  $T - S$  диаграммах представлено на рис. 3.4.

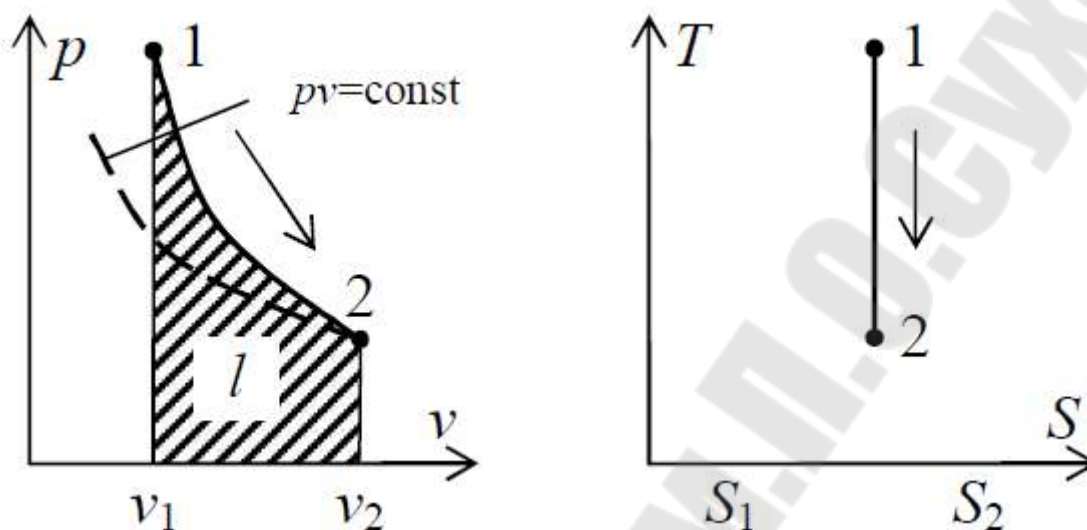


Рис. 3.4. Адиабатный процесс в  $p - v$  и  $T - S$  диаграммах

Зависимость между начальными и конечными параметрами процесса определяется соотношениями (3.14) - (3.16).

$$\frac{p_2}{p_1} = \left( \frac{v_1}{v_2} \right)^k, \quad (3.14)$$

$$\frac{T_2}{T_1} = \left( \frac{v_1}{v_2} \right)^{k-1}, \quad (3.15)$$

$$\frac{T_2}{T_1} = \left( \frac{p_2}{p_1} \right)^{\frac{k-1}{k}}, \quad (3.16)$$

Работа расширения 1 кг газа определяется по формулам (3.17) – (3.18).

$$l = \frac{1}{k-1} \cdot (p_1 \cdot v_1 - p_2 \cdot v_2) = \frac{p_1 \cdot v_1}{k-1} \cdot \left( 1 - \left( \frac{v_1}{v_2} \right)^{k-1} \right), \quad (3.17)$$

$$l = \frac{R}{k-1} \cdot (T_1 - T_2) = \frac{p_1 \cdot v_1}{k-1} \cdot \left( 1 - \left( \frac{p_2}{p_1} \right)^{\frac{k-1}{k}} \right), \quad (3.18)$$

Изменение внутренней энергии газа и работа адиабатного процесса равны по величине и противоположны по знаку и определяется по формуле (3.19).



$$\Delta u = -l = c_v \cdot (t_2 - t_1), \quad (3.19)$$

Поскольку при адиабатном процессе  $dq = 0$ , то энтропия рабочего тела не изменяется.

### ПОЛИТРОПНЫЙ ПРОЦЕСС

Процесс, описываемый уравнением  $p v^n = \text{const}$ , называется политропным. Показатель политропы  $n$  может принимать любое численное значение в пределах  $-\infty$  до  $+\infty$ , но для данного процесса он является величиной постоянной.

Значение показателя политропы определяет расположение и характер протекания политропического процесса на  $p-v$  диаграмме (рис. 2.1).

Зависимость между начальными и конечными параметрами процесса определяется соотношениями (3.20) - (3.22).

$$\frac{p_2}{p_1} = \left( \frac{v_1}{v_2} \right)^n, \quad (3.20)$$

$$\frac{T_2}{T_1} = \left( \frac{v_1}{v_2} \right)^{n-1}, \quad (3.21)$$

$$\frac{T_2}{T_1} = \left( \frac{p_2}{p_1} \right)^{\frac{n-1}{n}}, \quad (3.22)$$

Работа расширения 1 кг газа определяется по формулам (3.23) – (3.24).

$$l = \frac{1}{n-1} \cdot (p_1 \cdot v_1 - p_2 \cdot v_2) = \frac{p_1 \cdot v_1}{n-1} \cdot \left( 1 - \left( \frac{v_1}{v_2} \right)^{n-1} \right), \quad (3.23)$$

$$l = \frac{R}{n-1} \cdot (T_1 - T_2) = \frac{p_1 \cdot v_1}{n-1} \cdot \left( 1 - \left( \frac{p_2}{p_1} \right)^{\frac{n-1}{n}} \right), \quad (3.24)$$

Количество тепла, сообщаемого газу или отнимаемого от него определяется по формуле (3.25).

$$q = c_v \cdot \frac{n-k}{n-1} \cdot (t_2 - t_1), \quad (3.25)$$

Изменение внутренней энергии газа в политропном процессе находим по формулам (3.26), (3.27).

$$\Delta u = c_v \cdot (t_2 - t_1), \quad (3.26)$$

$$\Delta u = \frac{n-1}{n-k} \cdot q = \frac{n-1}{1-k} \cdot l, \quad (3.27)$$

Изменение энтропии в процессе определяется по формуле (3.28.).

$$\Delta S = c_v \frac{n-k}{n-1} \cdot \ln\left(\frac{T_2}{T_1}\right), \quad (3.28)$$

После изучения теоретической части по теме 3 выполнить решение задачи №3, исходные данные принимаются по двум последним цифрам номера зачетной книжки по таблице 3.1.

### ЗАДАЧА №3

В баллоне емкостью  $V$ , м<sup>3</sup> находится воздух при давлении  $p_1$ , МПа и температуре  $t_1$ , °С. Давление окружающей среды  $p_2$ , МПа. Определить работу, которая может быть произведена содержащимся в баллоне воздухом при расширении его до давления окружающей среды по изотерме, адиабате и политропно с показателем  $n$ . Определить также минимальную температуру, которую будет иметь воздух в баллоне, если открыть вентиль и выпускать воздух из баллона до тех пор, пока давление в нем не станет равным давлению окружающей среды и при условии, что теплообмен воздуха с окружающей средой будет отсутствовать.

Таблица 3.1

Величина	Последняя цифра номера									
	0	1	2	3	4	5	6	7	8	9
$t_1$ , °С	48	43	38	33	28	27	22	17	13	7
$p_1$ , МПа	5,1	6,1	7,1	8,1	9,1	10,1	11,1	12,2	13,3	14,4
$n$	1,1	1,2	1,3	1,4	1,5	1,6	1,5	1,4	1,3	1,2
Величина	Предпоследняя цифра номера									
	0	1	2	3	4	5	6	7	8	9
$V_1$ , м <sup>3</sup>	0,1	0,2	0,3	0,4	0,5	0,1	0,2	0,3	0,4	0,5
$p_2$ , МПа	0,11	0,12	0,13	0,1	0,11	0,12	0,13	0,1	0,14	0,16

### УКАЗАНИЯ К РЕШЕНИЮ ЗАДАЧИ №3

По условию задачи необходимо определить полезную работу, которую может совершить воздух, если расширение воздуха органи-

зовать изотермически, политропно и без теплообмена с окружающей средой (адиабатно).

### 1) Изотермическое расширение

По значениям  $p_1$ ,  $p_2$  и  $V_1$  по формуле (3.10) определить работу газа  $L_{из}$ .

Конечный объем воздуха в процессе расширения  $V_2$  выразить из соотношения (3.9).

Затраченная работа на преодоление атмосферного давления определяется по формуле (3.30).

$$L_3 = p_2 \cdot (V_2 - V_1), \quad (3.30)$$

Полезную работу газа в процессе определить по формуле (3.31).

$$L_{пол} = L_{из} - L_3, \quad (3.31)$$

При изотермическом процессе  $T_2 = T_1$ , тогда  $T_2 = t_1 + 273,15$ , К.

### 2) Адиабатное расширение

По значениям  $p_1$ ,  $p_2$  и  $V_1$  по формуле (3.18) определить работу газа  $L_{ад}$ .

Конечный объем воздуха в процессе расширения  $V_2$  выразить из соотношения (3.14).

Затраченная работа на преодоление атмосферного давления определяется по формуле (3.30).

Полезную работу газа в процессе определить по формуле (3.31).

Температуру газа в конце процесса расширения выразить из соотношения (3.15).

### 3) Политропное расширение

По значениям  $p_1$ ,  $p_2$  и  $V_1$  по формуле (3.24) определить работу газа  $L_{пол}$ .

Конечный объем воздуха в процессе расширения  $V_2$  выразить из соотношения (3.20).

Затраченная работа на преодоление атмосферного давления определяется по формуле (3.30).

Полезную работу газа в процессе определить по формуле (3.31).

Температуру газа в конце процесса расширения выразить из соотношения (3.21).

## Тема 4. ВОДЯНОЙ ПАР

При решении задач, связанных с изменением состояния водяного пара, применение графического или аналитического метода в большой мере определяется характером процесса. Однако в редких случаях удастся определить все необходимые величины одним из этих способов; этому чаще всего приходится одновременно пользоваться как графическим, так и аналитическим способами. При этом часть параметров пара и величин, подлежащих определению, находится из  $h$ - $s$  диаграммы (см. приложение 1), а остальные - определяются аналитическим путем с применением таблиц водяного пара (см. приложения 2 и 3).

Во всех случаях весьма важно определить, к какому пару (насыщенному или перегретому) относится начальное или конечное состояние. Этот вопрос легко решается с помощью таблиц и диаграмм.

### СУХОЙ НАСЫЩЕННЫЙ ПАР

Состояние сухого насыщенного пара определяется его давлением или температурой. По приложению 2 можно определить давление пара и все остальные его параметры по температуре, а по приложению 3 □ температуру пара и все остальные его параметры по давлению.

### ВЛАЖНЫЙ НАСЫЩЕННЫЙ ПАР

Состояние влажного насыщенного пара определяется его давлением или температурой и степенью сухости  $x$ . Значение  $x = 0$  соответствует воде в состоянии кипения, а  $x = 1$  - сухому насыщенному пару.

Температура влажного пара есть функция только давления и определяется так же, как и температура сухого пара, по приложениям 2 и 3.

Удельный объем влажного пара зависит от давления и от степени сухости и определяется из уравнения (4.1).

$$v_x = v'' \cdot x + (1 - x) \cdot v', \quad (4.1)$$

Из уравнения (4.1) получаем значение степени сухости:

$$x = \frac{v_x - v'}{v'' - v'}, \quad (4.2)$$

Для давлений до 30 бар и  $x \geq 0,8$  можно пренебречь последним членом равенства (4.1). Тогда удельный объем влажного насыщенного пара:

$$v_x = v'' \cdot x, \quad (4.3)$$

Для больших давлений и малых  $x$  следует пользоваться формулой (4.1).

Энтальпия влажного насыщенного пара определяется по формуле (4.4), а внутренняя энергия  $\square$  по формуле (4.5).

$$h_x = h' + rx, \quad (4.4)$$

$$u_x = h_x - p \cdot v_x, \quad (4.5)$$

Энтропия влажного насыщенного пара определяется по формуле (4.6).

$$s_x = s' + \frac{r}{T_n} \cdot x = s' + (s'' - s') \cdot x, \quad (4.6)$$

где  $T_n$  - температура насыщения, К.

### ПЕРЕГРЕТЫЙ ПАР

Перегретый пар имеет более высокую температуру  $t$  по сравнению с температурой  $t_n$  сухого насыщенного пара того же давления. Следовательно, в отличие от насыщенного пара перегретый пар определенного давления может иметь различные температуры. Для характеристики состояния перегретого пара необходимо знать два его параметра, например, давление и температуру.

Параметры перегретого пара будем определять по  $h$ - $s$  диаграмме водяного пара (см. приложение 1).

Разность температур перегретого и насыщенного пара того же давления  $t - t_n$  называют перегревом пара.

После изучения теоретической части по теме 4 выполнить решение задач №4 и №5, исходные данные принимаются по двум последним цифрам номера зачетной книжки по таблицам 4.1 и 4.2.

### ЗАДАЧА №4

Определить массу, внутреннюю энергию, энтальпию и энтропию насыщенного пара объемом  $V$ , м<sup>3</sup> при давлении  $p$ , МПа и сухости пара  $x$ .

Таблица 4.1

Величина	Последняя цифра номера									
	0	1	2	3	4	5	6	7	8	9
$p$ , МПа	1	1,1	1,2	1,3	1,4	1,5	1,6	1,7	1,8	1,9
Величина	Предпоследняя цифра номера									
	0	1	2	3	4	5	6	7	8	9
$x$	0,98	0,97	0,96	0,95	0,94	0,93	0,92	0,91	0,9	0,95
$V$ , м <sup>3</sup>	1,2	3,2	4,2	5,2	6,2	7,2	8,2	9,3	8,3	6,3

## УКАЗАНИЯ К РЕШЕНИЮ ЗАДАЧИ №4

Перевести значение  $p$  из МПа в бар, воспользовавшись соотношением:

$$1 \text{ МПа} = 10 \text{ бар.}$$

По приложению 3 по значению  $p$ , бар определить параметры насыщения:  $v''$ , м<sup>3</sup>/кг;  $h'$ , кДж/кг;  $r$ , кДж/кг;  $s'$  и  $s''$ , кДж/(кг·°С).

Удельный объем влажного пара  $v_x$ , м<sup>3</sup>/кг определить по формуле (4.3).

Массу пара  $M$ , кг определить по соотношению (4.7).

$$M = V/v_x, (4.7)$$

Энтальпию 1 кг насыщенного влажного пара  $h_x$ , кДж/кг определить по соотношению (4.4), а энтальпию всего влажного пара по соотношению (4.8).

$$H_x = M \cdot h_x, (4.8)$$

Энтропию 1 кг насыщенного влажного пара  $s_x$ , кДж/(кг·°С) определить по соотношению (4.6), а энтропию всего влажного пара по соотношению (4.9).

$$S_x = M \cdot s_x, (4.9)$$

Внутреннюю энергию 1 кг насыщенного влажного пара  $u_x$ , кДж/кг определить по соотношению (4.5), а внутреннюю энергию всего влажного пара по соотношению (4.10).

$$U_x = M \cdot u_x, (4.10)$$

## ЗАДАЧА №5

1 кг водяного пара с начальным давлением  $p_1$ , МПа и сухости пара  $x_1$  изотермически расширяется, при этом к нему подводится теплота  $q$ , кДж/кг. Определить, пользуясь  $h$ - $s$ -диаграммой параметры конечного состояния пара, работу расширения, изменение внутренней

энергии, энтальпии и энтропии. Решить задачу, если расширение происходит изобарно. Изобразить процессы в  $v$  и  $h-s$  диаграмме.

Таблица 4.2

Величина	Последняя цифра номера									
	0	1	2	3	4	5	6	7	8	9
$p_1$ , МПа	3	3,2	3,4	3,6	3,8	4	4,2	4,4	4,6	4,8
Величина	Предпоследняя цифра номера									
	0	1	2	3	4	5	6	7	8	9
$x_1$	0,98	0,97	0,96	0,95	0,94	0,93	0,92	0,91	0,9	0,95
$q$ , кДж/кг	500	450	550	430	520	490	550	470	490	510

### УКАЗАНИЯ К РЕШЕНИЮ ЗАДАЧИ №5

Задача выполняется графоаналитическим способом с построением процессов расширения водяного пара на  $h-s$  диаграмме, поэтому необходимо выполнить копию  $h-s$  диаграммы (см. приложение 1), на которой выполняется построение процессов.

Начало процесса расширения пара обозначим точкой 1, местоположение которой определяется двумя координатами:  $p_1$  и  $x_1$  (см. рис. 4.1).

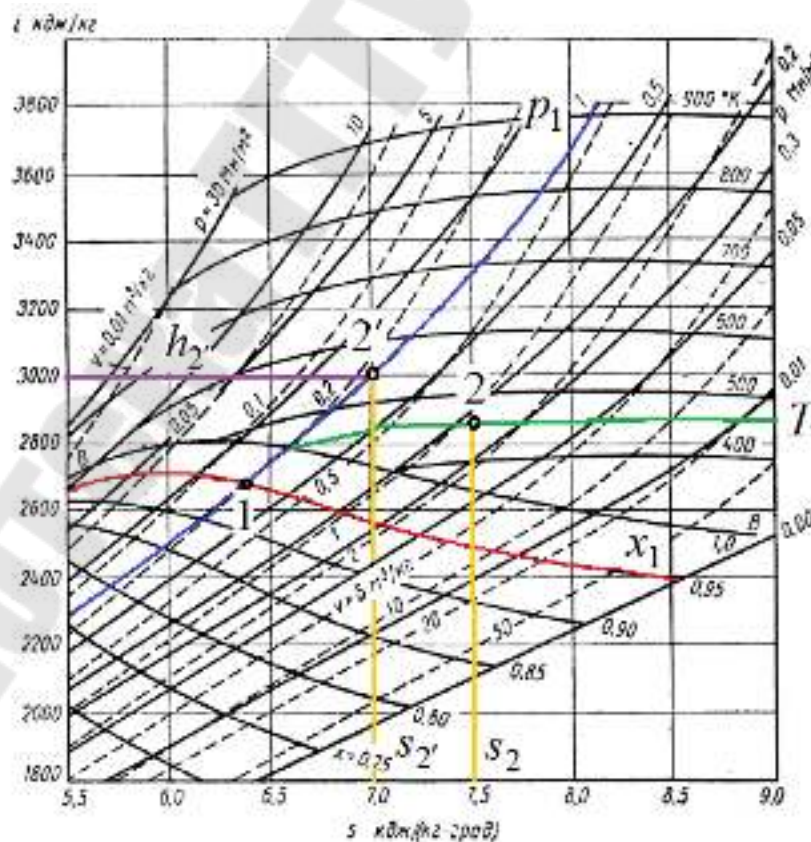


Рис. 4.1. Графическое построение процессов расширения пара

Графически определить параметры, характеризующие состояние пара в начале процесса в точке 1:  $s_1$ , кДж/(кг·град);  $h_1$ , кДж/кг;  $T_1$ , К.

Удельный объем влажного насыщенного пара в начале процесса расширения  $v_1$  в точке 1 определить по величине изохоры, проходящей через точку 1 или по формуле (4.1). Значения  $v_1'$  и  $v_1''$  определить по давлению  $p_1$  в бар по приложению 3.

#### 1) Изотермическое расширение

Чтобы решить задачу при изотермическом расширении пара, необходимо знать параметры, характеризующие состояние пара в конце процесса в точке 2. Положение точки 2 будет определяться пересечением линии  $s_2$  с линией изотермического процесса  $T_1 = \text{const}$ .

Количество тепла в изотермическом процессе определяется по формуле (4.11).

$$q = T \cdot (s_2 - s_1), \quad (4.11.)$$

Значение энтропии пара в конце процесса  $s_2$  выразить из формулы (4.11).

Графически определить параметры, характеризующие состояние пара в конце процесса в точке 2:  $p_2$ , МПа;  $h_2$ , кДж/кг;  $v_2$ , м<sup>3</sup>/кг.

Определить изменение энтропии по формуле (4.12), а изменение энтальпии по формуле (4.13).

$$\Delta s = s_2 - s_1, \quad (4.12)$$

$$\Delta h = h_2 - h_1, \quad (4.13)$$

Изменение внутренней энергии пара определить по формуле (4.14), величина внутренней энергии в конкретной точке процесса (точки 1 и 2) – по формуле (4.5).

$$\Delta u = u_2 - u_1, \quad (4.14)$$

Работа пара в изотермическом процессе находится из уравнения первого закона термодинамики по формуле (4.15).

$$l_p = q - \Delta u, \quad (4.15)$$

#### 2) Изобарное расширение

Количество тепла, участвующего в изобарном процессе, определяется из уравнения (4.16).

$$q = h_2 - h_1, \quad (4.16)$$

Энтальпия в конце процесса изобарного расширения определяется из формулы (4.16).

Чтобы решить задачу при изобарном расширении пара, необходимо знать параметры, характеризующие состояние пара в конце



процесса в точке 2'. Положение точки 2' будет определяться пересечением линии  $h_2$  с линией изобарного процесса  $p_1 = \text{const}$  (см. рис. 4.1).

Графически определить параметры, характеризующие состояние пара в конце процесса в точке 2':  $s_{2'}$ , кДж/(кг·град);  $T_{2'}$ , К;  $v_{2'}$ , м<sup>3</sup>/кг.

Определить изменение энтропии по формуле (4.12), а изменение энтальпии по формуле (4.13) с учетом того, что конец процесса характеризуется параметрами точки 2'.

Работа пара в изобарном процессе  $l_p$  определяется по формуле (4.17).

$$l_p = p_1 \cdot (v_{2'} - v_1), \quad (4.17)$$

Изменение внутренней энергии пара  $\Delta u$  находится из уравнения первого закона термодинамики по формуле (4.15).

## Тема 5. ВЛАЖНЫЙ ВОЗДУХ

В воздухе всегда содержится то или иное количество влаги в виде водяного пара. Такую смесь сухого воздуха с водяным паром называют влажным воздухом.

Обычно расчеты, связанные с влажным воздухом, выполняются при давлениях, близких к атмосферному, и парциальное давление пара в нем невелико, тогда с достаточной точностью можно применять к влажному пару все формулы, полученные для идеальных газов. Поэтому в дальнейшем принимается, что влажный воздух подчиняется уравнению состояния идеальных газов:

$$pV = MRT, \quad (5.1),$$

а также закону Дальтона

$$p = p_v + p_n, \quad (5.2)$$

где  $p$  - давление влажного воздуха;  $p_v$  - парциальное давление сухого воздуха;  $p_n$  - парциальное давление пара.

Абсолютной влажностью воздуха называют массу водяного пара, содержащегося в 1 м<sup>3</sup> влажного воздуха, или (что то же) плотность пара  $\rho_n$  при его парциальном давлении и температуре воздуха.

Величину, представляющую отношение абсолютной влажности воздуха при данной температуре  $\rho_n$  к его максимально возможной абсолютной влажности  $\rho_{\text{max}}$  при той же температуре, называют относительной влажностью.

$$\varphi = \rho_{\text{п}} / \rho_{\text{max}}, \quad (5.3)$$

Влагосодержанием воздуха  $d$  называется масса водяного пара в воздухе, приходящегося на 1 кг сухого воздуха, г/кг сухого воздуха и определяется по формуле (5.4).

$$d = \frac{G_{\text{п}}}{G_{\text{в}}} \cdot 10^3, \quad (5.4)$$

где  $G_{\text{п}}$  и  $G_{\text{в}}$  - массы водяного пара и сухого воздуха в данном объеме, г/м<sup>3</sup>, соответственно.

Отношение влагосодержания  $d$  к максимально возможному влагосодержанию влажного воздуха (при той же температуре и давлении смеси) называется степенью насыщения и определяется по формуле (5.5).

$$\psi = \frac{d}{d_{\text{max}}}, \quad (5.5)$$

Та температура, до которой надо охладить при постоянном давлении влажный воздух, чтобы он стал насыщенным ( $\varphi = 100\%$ ) называется точкой росы  $t_p$ . Она может быть определена (по таблицам насыщенного пара) как температура насыщения при парциальном давлении пара. На  $h$ - $d$  □ диаграмме влажного воздуха для определения  $t_p$  необходимо из точки данного состояния воздуха опуститься по линии  $d = \text{const}$  до пересечения с линией насыщения  $\varphi = 100\%$ . Изотерма, проходящая через точку пересечения, соответствует значению  $t_p$ .

Температура мокрого термометра  $t_m$  равна температуре воздуха в насыщенном состоянии при данной энтальпии. В  $h$ - $d$  □ диаграмме  $t_m$  проходят через точку пересечения изотерм с линией насыщения  $\varphi = 100\%$  и практически совпадают с линией  $h = \text{const}$ .

Теплоемкость влажного воздуха  $c_{\text{в.в}}$ , кДж/(кг·К) определяется по формуле (5.6).

$$c_{\text{в.в}} = c_{\text{в}} + c_{\text{п}} \cdot \left( \frac{d}{1000} \right) = 1,005 + 1,807 \cdot \left( \frac{d}{1000} \right), \quad (5.6)$$

где  $c_{\text{в}}$  и  $c_{\text{п}}$  - теплоемкость сухого воздуха и водяного пара, кДж/(кг·К), соответственно.

Энтальпия влажного воздуха равна сумме энтальпий сухого воздуха и водяного пара и определяется по формуле (5.7). За нулевую точку принимается энтальпия сухого воздуха (при  $d = 0$ ) с темпера-

турой 0°C. Поэтому энтальпия воздуха может иметь положительные и отрицательные значения.

$$h_{в.в} = h_{в} + h_{п} \cdot \left( \frac{d}{1000} \right) = c_{в} \cdot t + (2500 + 1,807 \cdot t) \cdot \left( \frac{d}{1000} \right), \quad (5.7)$$

h-d □ диаграмма влажного воздуха, предложенная проф. Л.К. Рамзиным, представляет взаимную зависимость, выраженную графически, пяти параметров воздуха: энтальпии  $h$ , температуры  $t$ , относительной влажности  $\varphi$ , влагосодержания  $d$ , парциального давления водяных паров  $p_{п}$ . Названная графическая зависимость получила название, h-d □ диаграммы влажного воздуха (см. приложение 4).

Процесс изменения параметров воздуха от начального до конечного состояний в h-d □ диаграмме изображается прямой линией, называемой лучом процесса. Направление процесса характеризуется угловым коэффициентом h-d □ диаграммы  $\varepsilon$ , кДж/кг, который определяют по формуле (5.8).

$$\varepsilon = \frac{h_2 - h_1}{d_2 - d_1} \cdot 10^3, \quad (5.8)$$

После изучения теоретической части по теме 5 выполнить решение задачи №6, исходные данные принимаются по двум последним цифрам номера зачетной книжки по таблице 5.1.

### ЗАДАЧА №6

В воздушно-паровую смесь (влагосодержанием  $d_1$ , г/кг и энтальпией  $H_1$ , кДж/кг) в количестве  $G_{в}$ , кг/ч подмешивают водяной пар в количестве  $G_{п}$ , кг/ч с энтальпией  $h_{п} = 3250$ , кДж/кг. Определить конечные параметры воздушно-паровой смеси и построить луч процесса.

Таблица 5.1

Величина	Последняя цифра номера									
	0	1	2	3	4	5	6	7	8	9
$G_{п}$ , кг/ч	40	45	50	55	60	65	70	75	80	85
$G_{в}$ , кг/ч	1730	1735	1740	1745	1750	1755	1760	1775	1770	1775
Величина	Предпоследняя цифра номера									
	0	1	2	3	4	5	6	7	8	9
$H_1$ , кДж/кг	140	145	150	155	150	145	140	135	130	125
$d_1$ , г/кг	10	15	20	25	30	35	30	20	30	25

## УКАЗАНИЯ К РЕШЕНИЮ ЗАДАЧИ №6

Задача выполняется графоаналитическим способом с построением процесса смешения сухого воздуха и водяного пара на  $h$ - $d$  диаграмме, поэтому необходимо выполнить копию  $h$ - $d$  диаграммы (см. приложение 4), на которой выполняется построение процесса.

В результате подмешивания к исходной смеси какого – либо количества водяного пара влагосодержание её увеличится на величину  $\Delta d$ , г/кг. Примем  $\Delta d = 10$ , г/кг.

Определим влагосодержание и энтальпию смеси после смешения по формулам (5.9) и (5.10).

$$d_{\text{см}} = d_1 + \Delta d, \quad (5.9)$$

$$H_{\text{см}} = H_1 + h_{\text{п}} \cdot \Delta d, \quad (5.10)$$

Определим конечное влагосодержание смеси после подмешивания к ней водяного пара в количестве  $G_{\text{п}}$  по формуле (5.11).

$$d_2 = d_1 + \frac{G_{\text{п}} \cdot 10^3}{G_{\text{в}}}, \quad (5.11)$$

На  $h$ - $d$  диаграмме строим луч процесса смешения. Положение точки 1 (начальное состояние смеси) определяется пересечением изоэнтальпы  $H_1$  и линии  $d_1$  (см. рис.5.1). В результате подмешивания к исходной смеси какого – либо количества водяного пара изменится её состояние, которое графически описывается точкой “см” (определяется пересечением изоэнтальпы  $H_{\text{см}}$  и линией  $d_{\text{см}}$ ). Соединив точки 1 и “см”, получаем направление процесса смешения. По значению влагосодержания смеси после смешивания  $d_2$  определим положение точки 2 (конечное состояние смеси), которая определяется пересечением линии  $d_2$  с лучом процесса: линией 1  $\square$  “см” (см. рис.5.1). Графическим способом определить значения величин:  $H_2$ ,  $\varphi_2$ ,  $t_2$ ,  $p_2$ .

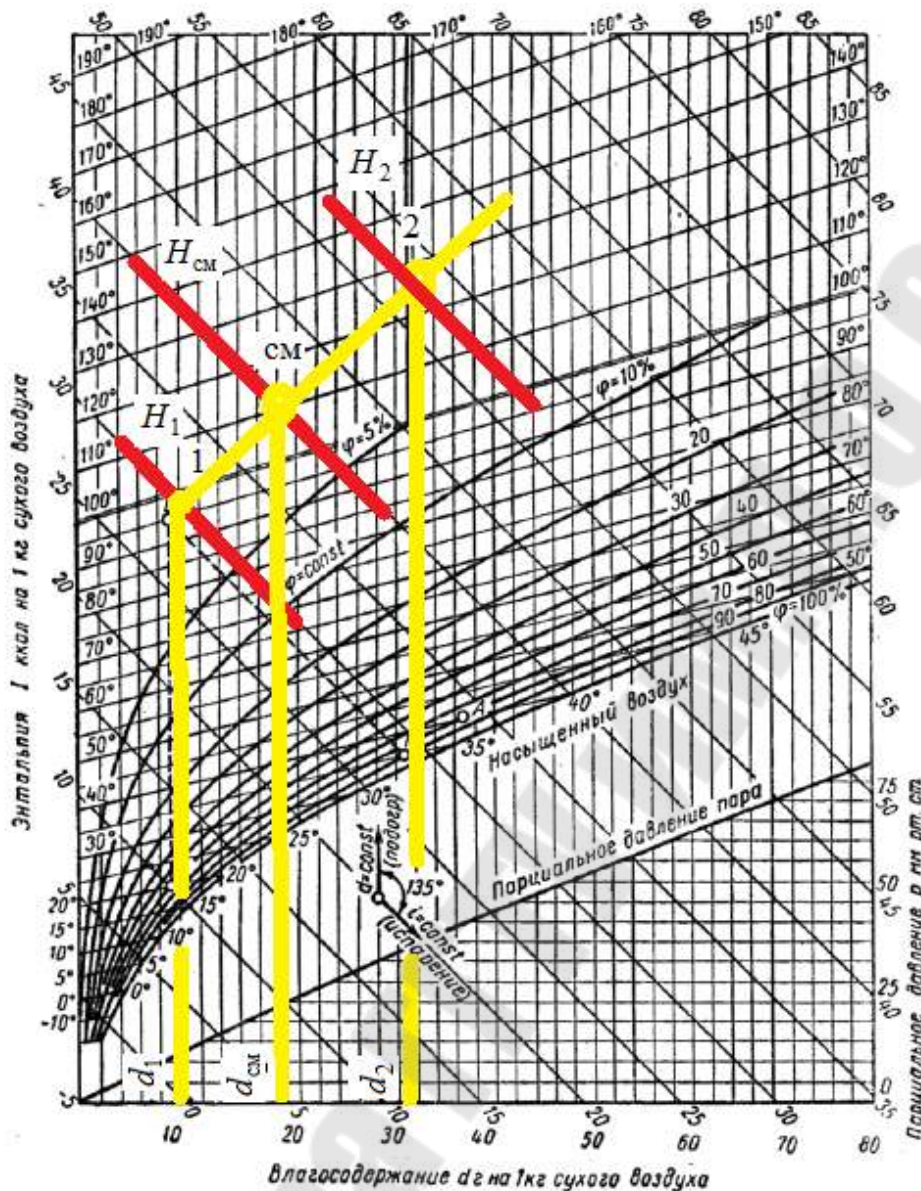


Рис 5.1 Графическое построение процесса смешения воздушно - паровой смеси с водяным паром

## Тема 6. ТЕРМОДИНАМИКА ПОТОКА

При решении задач, связанных с истечением газа через сопла (насадки), чаще всего приходится определять скорость истечения и расход, т. е. количество газа, вытекающего в единицу времени. В этих случаях необходимо прежде всего определить отношение давлений потока по формуле (6.1).

$$\beta = p_2/p_1, \quad (6.1)$$

где  $p_2$  - давление среды на выходе из сопла, Па;  $p_1$  - давление среды на входе в сопло, Па.

Полученное числовое значение сравнивают с так называемым критическим отношением давлений для данного газа, определяемым по формуле (6.2).

$$\beta_{кр} = \frac{p_{кр}}{p_1} = \left( \frac{2}{k+1} \right)^{\frac{k}{k-1}}, \quad (6.2)$$

где  $p_{кр}$  - критическое давление в сечении сопла, Па;  $k$  - показатель адиабаты.

Для одноатомных газов при  $k=1,67$  критическое отношение давлений  $\beta_{кр} = 0,487$ .

Для двухатомных газов при  $k=1,4$  критическое отношение давлений  $\beta_{кр} = 0,528$ .

Для трех- и многоатомных газов при  $k=2,9$  критическое отношение давлений  $\beta_{кр} = 0,546$ .

Если адиабатное истечение газа происходит при  $\beta > \beta_{кр}$ , теоретическая скорость газа у устья суживающегося сопла определяется по формуле (6.3).

$$c = \sqrt{2 \cdot \frac{k}{k-1} \cdot p_1 \cdot v_1 \cdot \left[ 1 - \left( \frac{p_2}{p_1} \right)^{\frac{k-1}{k}} \right]}, \quad (6.3)$$

где  $v_1$  - удельный объем газа на входе в сопло, м<sup>3</sup>/кг.

Расход газа определяется по формуле (6.4).

$$M = f \cdot \sqrt{2 \cdot \frac{k}{k-1} \cdot \frac{p_1}{v_1} \cdot \left[ \left( \frac{p_2}{p_1} \right)^{\frac{2}{k}} - \left( \frac{p_2}{p_1} \right)^{\frac{k+1}{k}} \right]}, \quad (6.4)$$

где  $f$  - выходное сечение сопла, м<sup>2</sup>.

Если же адиабатное истечение газа происходит при  $\beta \leq \beta_{кр}$ , то теоретическая скорость газа в устье суживающегося сопла будет равна критической скорости и определится по формуле (6.5).

$$c_{кр} = \sqrt{2 \cdot \frac{k}{k+1} \cdot p_1 \cdot v_1}, \quad (6.5)$$

Подставляя значение  $k$  для различных рабочих тел, можно получить более удобные формулы для определения критической скорости. В частности, для двухатомных газов критическая скорость может быть определена по формуле (6.6).

$$c_{кр} = 1,08 \cdot \sqrt{R \cdot T_1}, \quad (6.6)$$

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

Расход газа в этом случае будет максимальным и может быть вычислен по формуле (6.7).

$$M_{max} = f \cdot \sqrt{2 \cdot \frac{k}{k+1} \cdot \left(\frac{2}{k+1}\right)^{\frac{2}{k-1}} \cdot \frac{p_1}{v_1}}, \quad (6.7)$$

Для получения скоростей истечения выше критических (сверхзвуковые скорости) применяется расширяющееся сопло, или сопло Лаваля. В минимальном сечении сопла Лаваля скорость движения газа равна критической скорости или скорости звука, определяемой параметрами  $p_{кр}$  (определяется из соотношения (6.2)) и  $v_{кр}$  (определяется из соотношения (6.8)).

$$\frac{v_{кр}}{v_1} = \left(\frac{p_1}{p_{кр}}\right)^{\frac{1}{k}}, \quad (6.8)$$

Площадь минимального сечения сопла определяется по формуле (6.9) или (6.10).

$$f_{min} = \frac{M_{max} \cdot v_{кр}}{c_{кр}}, \quad (6.9)$$

$$f_{min} = \frac{\pi \cdot d_{min}^2}{4}, \quad (6.10)$$

Площадь выходного сечения сопла определяется по соотношению (6.11).

$$f_2 = \frac{M \cdot v_2}{c_2}, \quad (6.11)$$

где  $v_2$  - удельный объем газа при давлении среды  $p_2$ , определяемый из соотношения (6.12), м<sup>3</sup>/кг.

$$\frac{v_2}{v_1} = \left(\frac{p_1}{p_2}\right)^{\frac{1}{k}}, \quad (6.12)$$

Расстояние между сечением сопла на выходе и наиболее узким сечением выбирается из конструктивных соображений. Длина расширяющейся части определяется по формуле (6.13).

$$l = \frac{d_2 - d_{\min}}{2 \cdot \operatorname{tg} \frac{\alpha}{2}}, \quad (6.13)$$

где  $d_2$  и  $d_{\min}$  - диаметр выходного и узкого сечений сопла, соответственно, м;  $\alpha$  - угол конусности расширяющейся части сопла, град.

После изучения теоретической части по теме 6 выполнить решение задачи №7, исходные данные принимаются по двум последним цифрам номера зачетной книжки по таблице 6.1.

### ЗАДАЧА №7

Воздух при давлении  $p_1$ , МПа и температуре  $t_1$ , °С вытекает из расширяющегося сопла (угол конусности расширяющейся части сопла  $\alpha$ ) в среду с давлением  $p_2$ , МПа. Расход воздуха  $M$ , кг/с. Определить размеры сопла. Расширение воздуха в сопле считать адиабатным.

Таблица 6.1

Величина	Последняя цифра номера									
	0	1	2	3	4	5	6	7	8	9
$p_1$ , МПа	1,1	2,2	1,6	2,4	1,3	2,2	1,4	2,7	1,2	1,8
$p_2$ , МПа	0,1	0,09	0,08	0,11	0,12	0,13	0,14	0,15	0,17	0,2
$t_1$ , °С	295	315	325	335	345	275	265	375	245	195
Величина	Предпоследняя цифра номера									
	0	1	2	3	4	5	6	7	8	9
$M$ , кг/с	3	3,5	4	4,5	4	3,5	3	2,5	2	1,5
$\alpha$ , град	7	8	9	10	11	12	13	7	8	9

### УКАЗАНИЯ К РЕШЕНИЮ ЗАДАЧИ №7

По условию заданы параметры воздуха на входе в сопло  $p_1$ , Па и  $T_1$ , К, тогда удельный объем воздуха  $v_1$ , м<sup>3</sup>/кг можно выразить из соотношения (1.4).

$$p_1 \cdot v_1 = R \cdot T_1, \quad (6.14)$$

Определить значение критического отношения давлений для воздуха  $\beta_{\text{кр}}$ , если показатель адиабаты воздуха принять  $k = 1,4$ . Зная давление  $p_1$  по формуле (6.2) определить  $p_{\text{кр}}$ .



По соотношению (6.8) определить критический удельный объем воздуха в минимальном сечении сопла  $v_{кр}$ , м<sup>3</sup>/кг.

По формуле (6.6) определить теоретическую скорость в минимальном сечении  $c_{кр}$ , м/с.

По формуле (6.9) определить площадь минимального сечений  $f_{min}$ , м<sup>2</sup>, учитывая что  $M_{max} = M$ .

Диаметр узкого сечения  $d_{min}$ , м определить из соотношения (6.10).

Из соотношения (6.12) определить удельный объем воздуха в выходном сечении сопла  $v_2$ , м<sup>3</sup>/кг.

Скорость истечения воздуха из сопла  $c_2$ , м/с определить по формуле (6.3).

По формуле (6.11) определить площадь выходного сечения сопла  $f_2$ , м<sup>2</sup>.

Диаметр выходного сечения  $d_2$ , м определяется аналогично формуле (6.10), заменяя нижний индекс “min” на “2”.

Длину расширяющейся части сопла определить по формуле (6.13).

## Тема 7. ЦИКЛЫ ПАРΟΣИЛОВЫХ УСТАНОВОК

### Цикл Ренкина с перегревом пара

На рис. 7.1 а приведена условная схема паросиловой установки. Пар из парового котла *ПК* поступает в пароперегреватель *ПП*, откуда он направляется в паровую турбину *ПТ* и далее в конденсатор *К*. В конденсаторе с помощью охлаждающей воды от пара отводится тепло и он конденсируется. Образовавшийся конденсат питательным насосом *ПН* подается в котел, и цикл замыкается вновь. *ПТ* соединена с валом генератора *Г*, где осуществляется выработка электрической энергии.

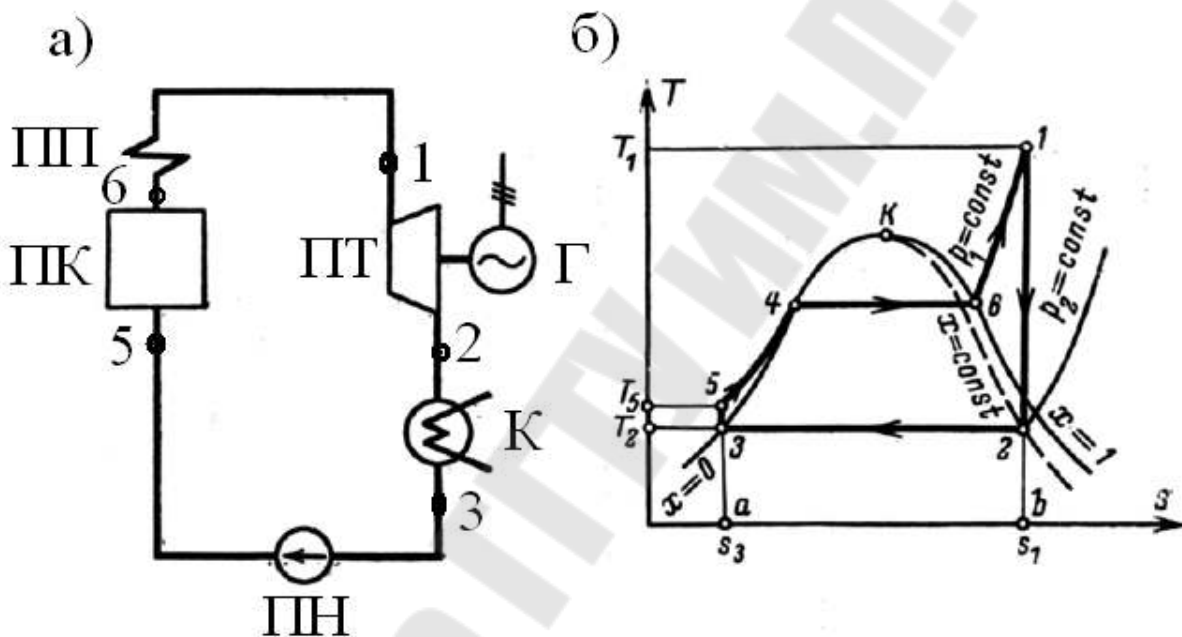


Рис 7.1 а) принципиальная схема паросиловой установки; б) теоретический цикл Ренкина с перегревом пара

*ПК* – паровой котел; *ПП* – пароперегреватель; *ПТ* – паровая турбина; *Г* – генератор; *К* – конденсатор; *ПН* – питательный насос.

На рис. 7.2 б представлен теоретический цикл Ренкина с перегревом пара в  $T-S$  – координатах. Этот цикл является основным  $\square$ делом теплосиловых установок, применяемым в современной теплотехнике. Точка 3 характеризует состояние воды на выходе из конденсатора, линия 3-5  $\square$  процесс повышения давления в питательном насосе, 5-4  $\square$  подогрев воды в паровом котле, точка 4  $\square$  состояние воды при температуре насыщения, 4-6  $\square$  парообразование в котле, 6-1  $\square$  перегрев пара в пароперегревателе. Точка 1 характеризует состояние пара, поступившего в турбину; 1-2  $\square$  адиабатное расширение

ние пара в турбине; точка 2 – состояние отработавшего пара, выходящего из турбины; 2-3 – процесс конденсации пара в конденсаторе.

Поскольку процессы подвода и отвода тепла в цикле Ренкина осуществляются по изобарам, а в изобарном процессе количество подведенного (отведенного) тепла равно разности энтальпий рабочего тела в начале и в конце процесса, то применительно к циклу Ренкина можно записать:

$$q_1 = h_1 - h_5, \quad (7.1)$$

и

$$q_2 = h_2 - h_3, \quad (7.2)$$

где  $q_1$  - количество подведенного тепла в котле, кДж/кг;  $h_1$  - энтальпия перегретого пара при давлении  $p_1$  и температуре  $T_1$ , кДж/кг;  $h_5$  - энтальпия воды на входе в котел при давлении  $p_1$  и температуре  $T_5$ , кДж/кг;  $q_2$  - количество отведенного тепла в конденсаторе, кДж/кг;  $h_2$  - энтальпия влажного пара, на выходе из турбины при давлении  $p_2$  и степени сухости  $x$ , кДж/кг;  $h_3$  - энтальпия воды на выходе из конденсатора (она равна энтальпии воды на линии насыщения  $h'$  при температуре насыщения  $T_2$ , однозначно определяемой давлением  $p_2$ ), кДж/кг.

Термический КПД цикла Ренкина – есть отношение полезно использованного тепла ко всему затраченному и определяется по формуле (7.3).

$$\eta_{\text{т}} = \frac{q_1 - q_2}{q_1} = \frac{(h_1 - h_5) - (h_2 - h_3)}{(h_1 - h_5)}, \quad (7.3)$$

Это соотношение может быть записано в следующем виде:

$$\eta_{\text{т}} = \frac{(h_1 - h_2) - (h_5 - h_3)}{(h_1 - h_5)} = \frac{l_{\text{т}} - l_{\text{н}}}{q_1}, \quad (7.4)$$

где  $l_{\text{т}} = h_1 - h_2$  - располагаемый перепад энтальпий, превращаемый в кинетическую энергию потока и затем в работу в турбине, кДж/кг;  $l_{\text{н}} = h_5 - h_3$  - техническая работа насоса, кДж/кг.

Подробное исследование термического КПД цикла Ренкина при изменении параметров начального и конечного состояния рабочего тела приводит к выводу, что термический КПД этого цикла повышается с увеличением начального давления и начальной температуры пара и с уменьшением давления в конденсаторе.

Удельный расход пара  $d_0$ , кг/(кВт·ч) при осуществлении идеального цикла Ренкина определяется по формуле (7.5).

$$d_0 = \frac{3600}{l_T}, \quad (7.5)$$

Удельный расход тепла на 1 кВт·ч при осуществлении идеального цикла Ренкина определяется по формуле (7.6).

$$q = d_0 \cdot (h_1 - h_3), \quad (7.6)$$

### Цикл с вторичным перегревом пара

Повышение начального давления пара с целью увеличения термического КПД цикла Ренкина приводит к увеличению влажности пара на выходе его из паровой турбины. Так как это обстоятельство сопряжено с вредными последствиями для работы паровых турбин, то для снижения влажности пара в конце расширения применяют вторичный перегрев пара.

Цикл с вторичным перегревом пара показан на рис. 7.2.

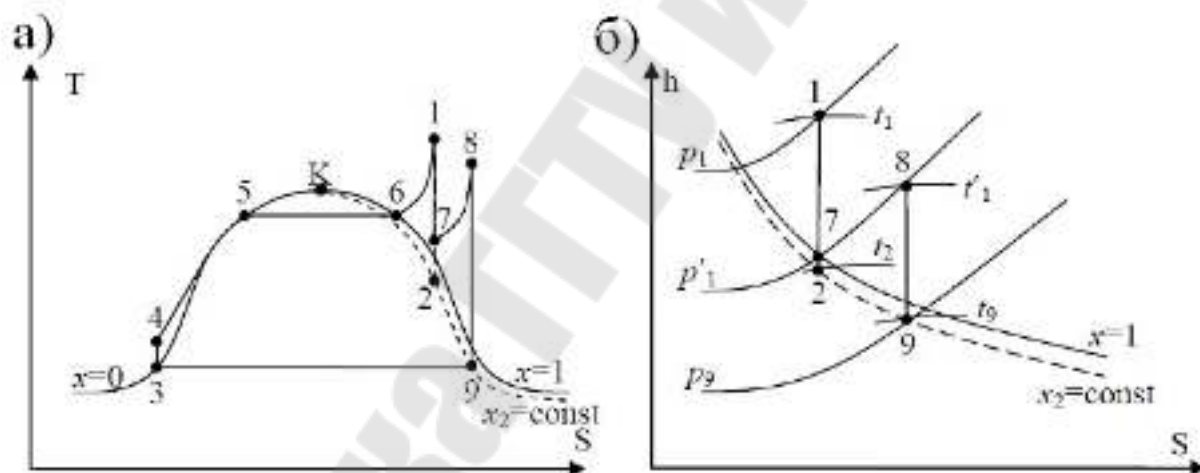


Рис 7.2 а) изображение цикла с вторичным перегревом в диаграмме Т - S; б) изображение цикла с вторичным перегревом в диаграмме h - s

На рис. 7.2 а представлен цикл с вторичным перегревом пара в диаграмме Т-S. Линия 4-5-6-1 изображает процесс получения перегретого пара, 1-7 — процесс адиабатного расширения пара в первом цилиндре турбины, 7-8 — процесс вторичного перегрева пара, 8-9 — процесс адиабатного расширения пара во втором цилиндре турбины.

На рис. 7.2 б представлен цикл с вторичным перегревом пара в диаграмме h-s. Прямая 1-7 показывает адиабатное расширение пара до некоторого давления  $p'_1$  в первом цилиндре турбины, линия 7-8

вторичный перегрев пара при давлении  $p_1'$  и прямая 8-9 — адиабатное расширение пара во втором цилиндре турбины до конечного давления  $p_9$  в конденсаторе.

Термический КПД такого цикла определяется по формуле (7.7).

$$\eta_{\text{т}} = \frac{(h_1 - h_7) + (h_8 - h_9)}{(h_1 - h_3) + (h_8 - h_7)}, \quad (7.7)$$

### Регенеративный цикл

Эффективным способом повышения КПД паросиловых установок служит регенерация.

На рис.7.3 приведена принципиальная схема установки с двумя отборами пара и смешивающими подогревателями.

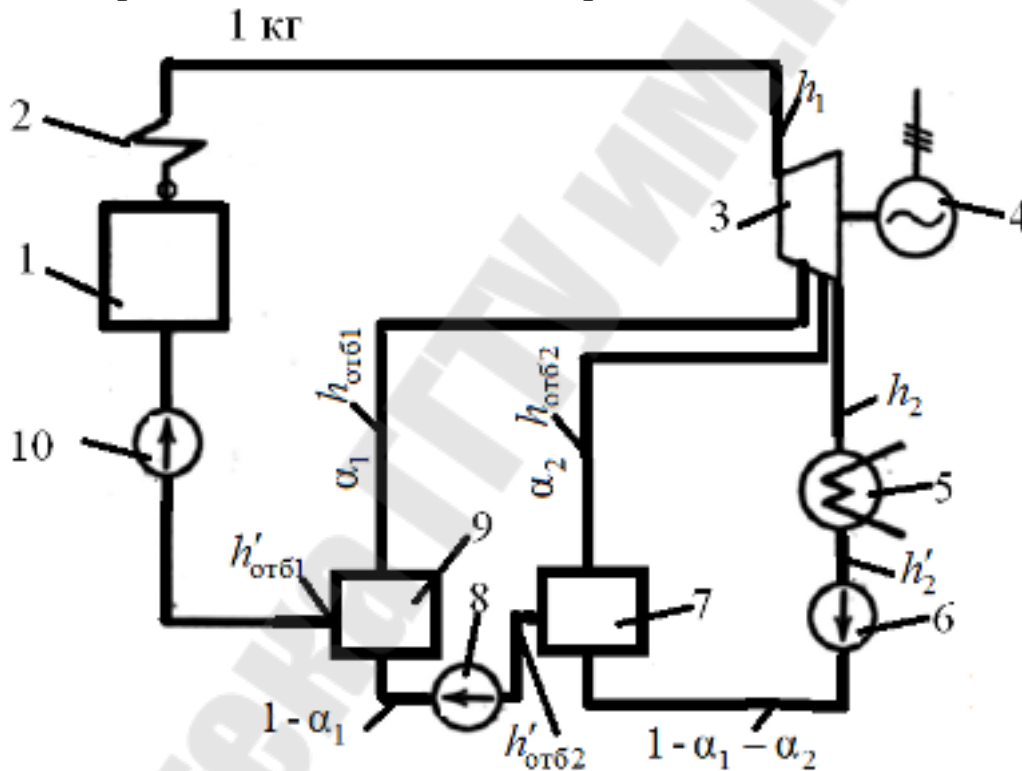


Рис 7.3 Принципиальная схема паросиловой установки с двумя регенеративными отборами пара:

1 — паровой котел; 2 — пароперегреватель; 3 — паровая турбина; 4 — электрогенератор; 5 — конденсатор; 6, 8 — конденсатный насос; 7, 9 — регенеративные подогреватели; 10 — питательный насос.

Все тепловые расчеты, связанные с регенерацией, принято относить на 1 кг пара, поступившего в турбину. Из схемы на рис. 7.3 видно, что первый отбор пара составляет  $\alpha_1$  кг/кг пара, а второй отбор —

$\alpha_2$  кг/кг пара. Таким образом, от каждого килограмма пара, поступившего в турбину,  $(1 - \alpha_1 - \alpha_2)$  кг пара расширяется в турбине до конечного давления, а  $\alpha_1$  и  $\alpha_2$  — до давления отбора. Значения  $\alpha_1$  и  $\alpha_2$  определяются из уравнений баланса тепла для первого и второго подогревателей по формулам (7.8) и (7.9).

$$\alpha_1 = \frac{h'_{отб1} - h'_{отб2}}{h_{отб1} - h'_{отб2}}, \quad (7.8)$$

$$\alpha_1 = \frac{(1 - \alpha_1)(h'_{отб2} - h'_2)}{h_{отб2} - h'_2}, \quad (7.9)$$

Полезная работа 1 кг пара в регенеративном цикле с двумя отборами  $l_{0пер}$ , кДж/кг определяется по формуле (7.10).

$$l_{0пер} = h_1 - h_2 - \alpha_1(h_{отб1} - h_2) - \alpha_2(h_{отб2} - h_2), \quad (7.10)$$

Удельный расход пара  $d_{0пер}$ , кг/(кВт·ч) в регенеративном цикле определяется по формуле (7.11).

$$d_{0пер} = \frac{3600}{l_{0пер}}, \quad (7.11)$$

Термический КПД регенеративного цикла с двумя отборами определяется по формуле (7.12).

$$\eta_{тер} = \frac{q_1 - q_2}{q_1} = \frac{l_{0пер}}{h_1 - h'_{отб1}} = \frac{h_1 - h_2 - \alpha_1(h_{отб1} - h_2) - \alpha_2(h_{отб2} - h_2)}{h_1 - h'_{отб1}}, \quad (7.12)$$

Подробное исследование регенеративного цикла показывает, что его термический КПД всегда больше термического КПД цикла Ренкина с теми же начальными и конечными параметрами. Экономия от применения регенеративного цикла растет с увеличением отборов пара.

После изучения теоретической части по теме 7 выполнить решение задач №8-9, исходные данные принимаются по двум последним цифрам номера зачетной книжки по таблице 7.1 и 7.2.

### ЗАДАЧА №8

В паросиловой установке, работающей при параметрах  $p_1$ , МПа,  $t_1$ , °С,  $p_2$ , МПа, введен вторичный перегрев пара при  $p'$ , МПа до начальной температуры  $t' = t_1$ , °С. Определить термический КПД цикла с вторичным перегревом и при отсутствии перегрева, опреде-

лечь влияние введения вторичного перегрева на термический КПД цикла.

Таблица 7.1

Величина	Последняя цифра номера									
	0	1	2	3	4	5	6	7	8	9
$p_1$ , МПа	20	15	13	12	10	7,5	5	4,5	3,8	3
$t_1$ , °С	540	490	500	510	470	480	470	460	450	400
Величина	Предпоследняя цифра номера									
	0	1	2	3	4	5	6	7	8	9
$p'$ , МПа	10	5	6	7	8	9	5,5	6,5	8,5	9
$p_2$ , МПа	0,5	0,75	0,8	0,3	0,4	0,6	0,7	0,85	0,9	0,1

### УКАЗАНИЯ К РЕШЕНИЮ ЗАДАЧИ №8

Решение задач, связанных с циклами паросиловых установок, выполняют графоаналитическим способом с использованием диаграммы h-s (см. приложение 1).

На диаграмме h-s построить процессы расширения пара в цикле с вторичным перегревом (см. рис. 7.4).

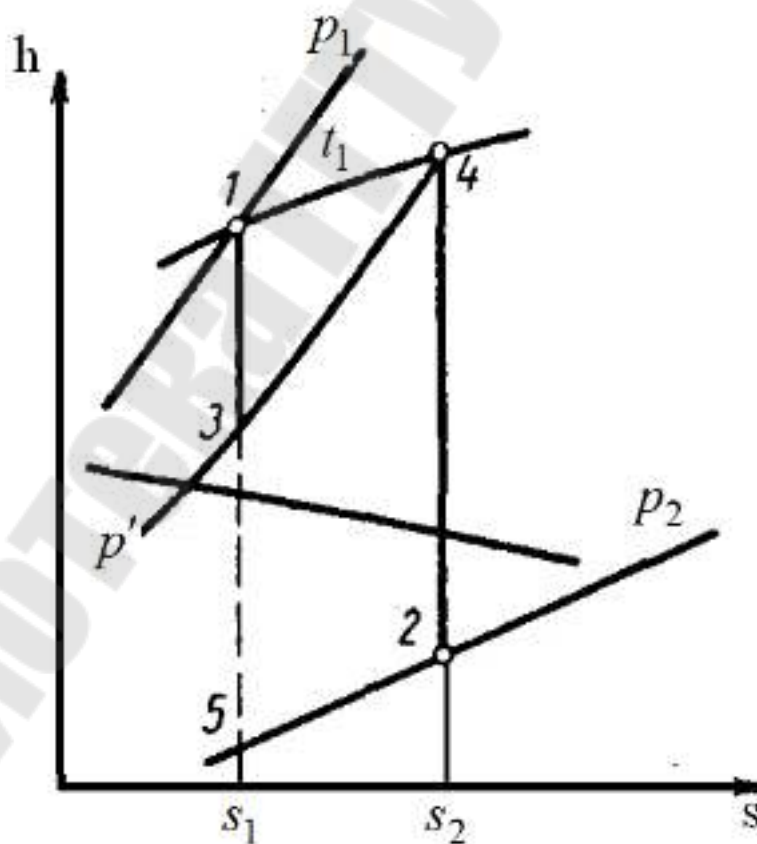


Рис 7.4 Графическое построение процессов расширения пара в цикле с вторичным перегревом

По диаграмме  $h-s$  определить значения  $h_1, h_2, h_3, h_4, h_5$ . По приложению 3 по значению  $p_2$  определить энтальпию конденсата  $h_{2к} = h'$ .

Определить работу расширения 1 кг пара в цилиндре высокого давления ЦВД (до вторичного перегрева)  $l_{0ЦВД}$ , кДж/кг по формуле (7.13).

$$l_{0ЦВД} = h_1 - h_3, (7.13)$$

Определить работу расширения 1 кг пара в цилиндре низкого давления ЦНД (после вторичного перегрева)  $l_{0ЦНД}$ , кДж/кг по формуле (7.14).

$$l_{0ЦНД} = h_4 - h_2, (7.14)$$

Суммарную работу расширения 1 кг пара в цикле с вторичным перегревом  $l_0$ , кДж/кг определить по формуле (7.15).

$$l_0 = l_{0ЦВД} + l_{0ЦНД}, (7.15)$$

Тепло, подведенное в паровом котле  $q_{пк}$ , кДж/кг определить по формуле (7.16).

$$q_{пк} = h_1 - h_{2к}, (7.16)$$

Тепло, подведенное при вторичном перегреве  $q_{вп}$ , кДж/кг определить по формуле (7.17).

$$q_{вп} = h_4 - h_3, (7.17)$$

Тепло, затраченное в цикле  $q_2$ , кДж/кг определить по формуле (7.18).

$$q_2 = q_{пк} + q_{вп}, (7.18)$$

Термический КПД цикла с вторичным перегревом  $\eta_{t_{вп}}$  определить по формуле (7.19).

$$\eta_{t_{вп}} = l_0 / q_2, (7.19)$$

Термический КПД при отсутствии вторичного перегрева  $\eta_t$  определить по формуле (7.20).

$$\eta_t = \frac{h_1 - h_5}{q_{пк}}, (7.20)$$

Улучшение от введения вторичного перегрева  $\Delta\eta/\eta_t$  определить по формуле (7.21).



$$\frac{\Delta\eta}{\eta_t} = \frac{(\eta_{t_{\text{вп}}} - \eta_t) \cdot 100\%}{\eta_t}, \quad (7.21)$$

### ЗАДАЧА №9

Из паровой турбины мощностью  $N$ , МВт, работающей при параметрах  $p_1$ , МПа,  $t_1$ , °С,  $p_2$ , МПа, производится два отбора: один при  $p_{\text{отб1}}$ , МПа и другой при  $p_{\text{отб2}}$ , МПа. Определить термический КПД установки, улучшение термического КПД по сравнению с циклом Ренкина и часовой расход пара через каждый отбор.

Таблица 7.2

Величина	Последняя цифра номера									
	0	1	2	3	4	5	6	7	8	9
$N$ , МВт	50	60	30	40	20	25	35	45	32	44
$p_1$ , МПа	13	12	10	8	7,5	13	11	9	12	13
$t_1$ , °С	550	520	540	500	550	540	500	520	540	510
$p_2$ , МПа	0,05	0,075	0,1	0,11	0,15	0,08	0,1	0,13	0,05	0,1
Величина	Предпоследняя цифра номера									
	0	1	2	3	4	5	6	7	8	9
$p_{\text{отб1}}$ , МПа	10	5	6	7	8	9	5,5	6,5	8,5	9
$p_{\text{отб2}}$ , МПа	0,25	0,3	0,2	0,25	0,15	0,3	0,25	0,2	0,3	0,25

### УКАЗАНИЯ К РЕШЕНИЮ ЗАДАЧИ №9

Решение задачи выполняется графоаналитическим способом с использованием диаграммы h-s (см. приложение 1).

На диаграмме h-s построить процесс расширения пара в регенеративном цикле (см. рис. 7.5).

По диаграмме h-s определить значения  $h_1$ ,  $h_{\text{отб1}}$ ,  $h_{\text{отб2}}$ ,  $h_2$ . По приложению 3 по значению  $p_{\text{отб1}}$  определить энтальпию конденсата первого отбора  $h'_{\text{отб1}} = h'$ ; по значению  $p_{\text{отб2}}$   $h'_{\text{отб2}} = h'$ ; по значению  $p_2$   $h'_2 = h'$ .

По формулам (7.8) и (7.9) определить доли пара в двух отборах.

Полезную работу 1 кг пара определить по формуле (7.10),

Удельный расход пара определить по формуле (7.11).

Полный часовой расход пара на турбину  $D_0$ , кг/ч определить по формуле (7.22).

$$D_0 = N \cdot d_0, \quad (7.22)$$

где  $N$  - мощность турбины, кВт.

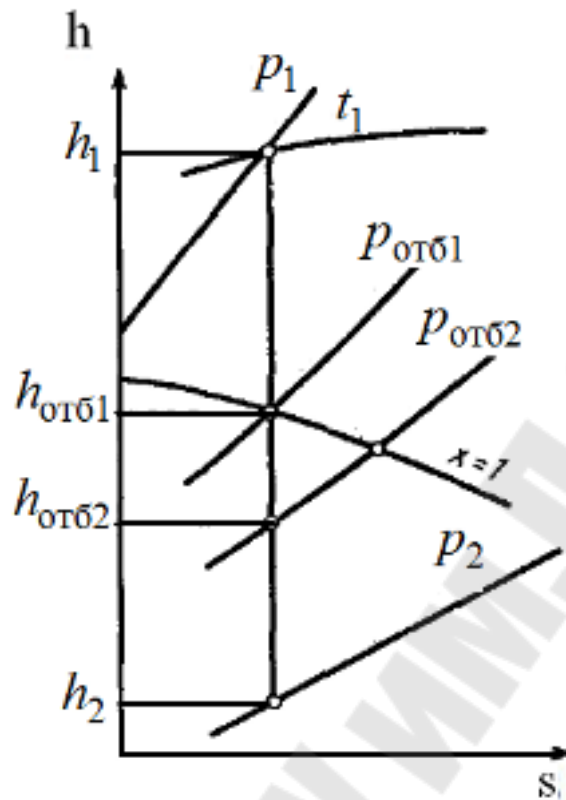


Рис 7.5 Графическое построение процесса расширения пара в регенеративном цикле

Расход пара на первый отбор  $D_{отб1}$ , кг/ч определить по формуле (7.23), а расход пара на второй отбор  $D_{отб2}$ , кг/ч – по формуле (7.24).

$$D_{отб1} = D_0 \cdot \alpha_1, (7.23)$$

$$D_{отб2} = D_0 \cdot \alpha_2, (7.24)$$

Количество пара, поступающего в конденсатор,  $D_k$ , кг/ч определить по формуле (7.25).

$$D_k = D_0 - D_{отб1} - D_{отб2}, (7.25)$$

Термический КПД регенеративного цикла  $\eta_{t_{рег}}$  определить по формуле (7.12).

Термический КПД цикла Ренкина  $\eta_t$  определить по формуле (7.26).

$$\eta_t = \frac{h_1 - h_2}{h_1 - h'_2}, (7.26)$$

Определить улучшение термического КПД регенеративного цикла.

## Тема 8. ТЕПЛОВОЙ КОНСТРУКТИВНЫЙ РАСЧЕТ СЕКЦИОННОГО ВОДО-ВОДЯНОГО ПОДОГРЕВАТЕЛЯ

Расчет подогревателя заключается в определении общей площади поверхности теплообмена и необходимого количества секций. Греющим и нагреваемым теплоносителями является вода. Причем, греющий теплоноситель движется по трубам теплообменника, а нагреваемая вода – в межтрубном пространстве.

### ЗАДАЧА №9

Произвести расчет секционного водо – водяного подогревателя производительностью  $Q$ , МВт. Температура нагреваемой воды при входе в подогреватель  $t_2'$ , °С, при выходе  $t_2''$ , °С. Температура греющей (сетевой) воды при входе в подогреватель  $t_1'$ , °С, при выходе  $t_1''$ , °С. Поверхность нагрева теплообменника выполнена из латунных трубок диаметром  $d_v/d_n = 14/16$  мм. Влияние загрязнения поверхности нагрева и снижения коэффициента теплопередачи учесть коэффициентом  $\beta = 0,7$ . Скорость воды в трубках принять равной  $\omega$ , м/с. Исходные данные принимаются по двум последним цифрам номера зачетной книжки по таблице 8.1.

Таблица 8.1

Величина	Последняя цифра номера									
	0	1	2	3	4	5	6	7	8	9
$t_2'$ , °С	70	60	65	70	75	72	60	58	68	70
$t_2''$ , °С	95	90	95	100	100	97	95	90	97	90
$t_1'$ , °С	140	130	135	140	145	143	130	125	132	140
$t_1''$ , °С	80	75	80	85	85	90	80	70	80	75
Величина	Предпоследняя цифра номера									
	0	1	2	3	4	5	6	7	8	9
$Q$ , МВт	2,5	2,3	2,8	2,7	2,9	3,0	3,5	4,0	4,5	3,8
$\omega$ , м/с	1,0	1,8	1,6	1,5	1,7	1,1	1,3	1,2	1,4	1,0

### УКАЗАНИЯ К РЕШЕНИЮ ЗАДАЧИ №9

Определить среднюю температуру теплоносителей по формулам (8.1) и (8.2).

$$t_1^{cp} = \frac{t_1' + t_1''}{2}, \quad (8.1)$$

$$t_2^{\text{cp}} = \frac{t_2' + t_2''}{2}, \quad (8.2)$$

По средним значениям температур теплоносителей определить их теплофизические свойства: теплоемкости  $c_1$  и  $c_2$ , Дж/(кг·°С); плотности  $\rho_1$  и  $\rho_2$ , кг/м<sup>3</sup>. Теплофизические свойства воды указаны в таблице 8.2. Если значения  $t_1^{\text{cp}}$  и  $t_2^{\text{cp}}$  отличаются от табличных, то теплофизические свойства определяются методом интерполирования.

Таблица 8.2

Теплофизические свойства воды

$t, \text{°C}$	$\rho, \text{кг/м}^3$	$c, \text{Дж/(кг·°C)}$
0	1002,28	$4,218 \cdot 10^3$
20	1000,52	$4,182 \cdot 10^3$
40	994,59	$4,178 \cdot 10^3$
60	985,46	$4,184 \cdot 10^3$
80	974,08	$4,196 \cdot 10^3$
100	960,63	$4,216 \cdot 10^3$
120	945,25	$4,250 \cdot 10^3$
140	928,27	$4,283 \cdot 10^3$
160	909,69	$4,342 \cdot 10^3$

Пример: Определить величину средней массовой теплоемкости воды при средней температуре  $t_1^{\text{cp}} = 110 \text{ °C}$  методом интерполирования.

По таблице 8.2 определить границы интервала интерполирования и выписать соответствующие значения.

$t, \text{°C}$	$c, \text{Дж/(кг·°C)}$
100	$4,216 \cdot 10^3$
120	$4,250 \cdot 10^3$

$$c_1 = \left( \frac{4,250 \cdot 10^3 - 4,216 \cdot 10^3}{120 - 100} \right) \cdot (110 - 100) + 4,216 \cdot 10^3 = 4,233 \cdot 10^3$$

Определим массовый  $G_1$ , кг/с и объемный  $V_1$ , м<sup>3</sup>/с расходы греющей воды по формулам (8.3) и (8.4), соответственно.

$$G_1 = \frac{Q \cdot 10^6}{c_1 \cdot (t_1' - t_1'')}, \quad (8.3)$$

$$V_1 = \frac{G_1}{\rho_1}, \quad (8.4)$$

Определим массовый  $G_2$ , кг/с и объемный  $V_2$ , м<sup>3</sup>/с расходы на-греваемой воды по формулам (8.5) и (8.6), соответственно.

$$G_2 = \frac{Q \cdot 10^6}{c_2 \cdot (t_2'' - t_2')}, \quad (8.5)$$

$$V_2 = \frac{G_2}{\rho_2}, \quad (8.6)$$

Площадь проходного сечения трубок  $f_T^{\text{pac}}$ , м<sup>2</sup> определить по формуле (8.7).

$$f_T^{\text{pac}} = \frac{V_1}{\omega}, \quad (8.7)$$

По площади  $f_T^{\text{pac}}$  по приложению 5 выбирается секционный во-до - водяной подогреватель, выписываются его технические характе-ристики: площадь проходного сечения трубок  $f_T$ , площадь проходно-го сечения межтрубного пространства  $f_{\text{MT}}$ , эквивалентный диаметр межтрубного пространства  $d_{\text{эKB}}$ , площадь сечения  $F_{\text{сек}}$ .

По формулам (8.8) и (8.9) уточнить скорость движения воды в трубках  $\omega_1$  и в межтрубном пространстве  $\omega_2$ : скорость воды не должна превышать 3 м/с.

$$\omega_1 = \frac{V_1}{f_T}, \quad (8.8)$$

$$\omega_2 = \frac{V_2}{f_{\text{MT}}}, \quad (8.9)$$

Если скорость движения воды превышает 3 м/с, то необходимо выбрать другой теплообменный аппарат с большими  $f_T$  и  $f_{\text{MT}}$ .

Коэффициент теплоотдачи при движении воды в трубках  $\alpha_1$ , Вт/(м<sup>2</sup>·К) и в межтрубном пространстве  $\alpha_2$ , Вт/(м<sup>2</sup>·К) определяется по формулам (8.10) и (8.11).

$$\alpha_1 = A_{5_1} \frac{\omega_1^{0,8}}{d_{\text{B}}^{0,2}}, \quad (8.10)$$

$$\alpha_2 = A_{5_2} \frac{\omega_2^{0,8}}{d_{\text{ЭКВ}}^{0,2}}, \quad (8.11)$$

где  $A_{5_1}$  и  $A_{5_2}$  - температурный множитель, который определяется методом интерполирования по данным таблицы 8.3 при  $t_1^{\text{cp}}$  и  $t_2^{\text{cp}}$ , соответственно.

Таблица 8.3

Значения температурного множителя  $A_5$

$t, \text{ }^\circ\text{C}$	$A_5$
20	2000
30	2100
40	2400
50	2600
60	2700
70	2800
80	3000
90	3100
100	3300
110	3400
120	3500
130	3600
140	3780
150	3850
160	3920
170	4000
180	4100

Коэффициент теплопередачи  $k$ , Вт/(м<sup>2</sup>·К) определяется как для плоской стенки по формуле (8.12).

$$k = \frac{\beta}{\frac{1}{\alpha_1} + \frac{\delta}{\lambda_{\text{ст}}} + \frac{1}{\alpha_2}}, \quad (8.12)$$

где  $\delta = (d_{\text{н}} - d_{\text{в}}) \cdot 10^{-3} / 2$  - толщина стенки трубок, м;  $\lambda_{\text{ст}}$  - коэффициент теплопроводности, для трубок из латуни при температуре стенок около 100 °С можно принять  $\lambda_{\text{ст}} = 130$ , Вт/(м·К).

Средний температурный напор определяется по формуле (8.13).

$$\Delta t_{\text{cp}} = \frac{\Delta t_{\delta} - \Delta t_{\text{M}}}{\ln \frac{\Delta t_{\delta}}{\Delta t_{\text{M}}}}, \quad (8.13)$$

где  $\Delta t_{\delta} = t_1' - t_2''$  и  $\Delta t_{\text{M}} = t_1'' - t_2'$  - большая и меньшая разница температур теплоносителей, соответственно.

Поверхность нагрева  $F$ , м<sup>2</sup> подогревателя определить по формуле (8.14).

$$F = \frac{Q \cdot 10^6}{k \cdot \Delta t_{\text{cp}}}, \quad (8.14)$$

Определить количество секций  $z_{\text{сек}}$ , шт. подогревателя по формуле (8.15).

$$z_{\text{сек}} = \frac{F}{F_{\text{сек}}}, \quad (8.15)$$

## СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

- 1 Апальков, А.Ф. Теплотехника: учебное пособие / А. Ф. Апальков. - Ростов-на-Дону: Феникс, 2008. - 187 с. - (Высшее образование)
- 2 Бондарев, В.А. Теплотехника: учебное пособие для вузов / В. А. Бондарев, А.Е. Процкий, Р.Н. Гриневич. - 2-е изд.. - Минск: Высшая школа, 1976. - 384 с.
- 3 Ерофеев В.Л. Теплотехника: учебник для вузов. - Москва: Академкнига, 2008. - 488 с.
- 4 Ерохин, В.Г. Сборник задач по основам теплотехники и гидравлики: [учебное пособие для техникумов] / В.Г. Ерохин, М.Г. Маханько. - Москва: Энергия, 1972. - 176 с.
- 5 Лариков, Н.Н. Теплотехника: учеб. для вузов / Н.Н. Лариков. - 3-е изд.. - Москва: Стройиздат, 1985. - 432 с.
- 6 Теоретические основы теплотехники. Теплотехнический эксперимент: справочник / под общ. ред. А.В. Клименко, В.М. Зорина. - 3-е изд.. - Москва: Изд-во МЭИ, 2001. - 561 с.
- 7 Теплотехника: учебник для вузов / В.Н. Луканин [и др.]; под ред. В. Н. Луканина. - Изд. 7-е, испр.. - Москва: Высшая школа, 2009. - 671 с.
- 8 Теплотехника: учебник для вузов / В.А. Гуляев [и др.]. - Санкт-Петербург: РАПП, 2009. - 345 с.
- 9 Рабинович, О.М. Сборник задач по технической термодинамике: учеб. пособие для техникумов / О.М. Рабинович. - 4-е изд.. - Москва: Машиностроение, 1969. - 376 с.
- 10 Сборник задач по технической термодинамике: учеб. пособие для вузов / Т.Н. Андрианова [и др.]. - Изд. 5-е. - Москва: МЭИ, 2006. - 354 с.



## СОДЕРЖАНИЕ

*Тема 1.* ИДЕАЛЬНЫЕ ГАЗЫ. ГАЗОВЫЕ СМЕСИ. ТЕПЛОЕМКОСТЬ

*Тема 2.* ПЕРВЫЙ ЗАКОН ТЕРМОДИНАМИКИ

*Тема 3.* ТЕРМОДИНАМИЧЕСКИЕ ПРОЦЕССЫ

*Тема 4.* ВОДЯНОЙ ПАР

*Тема 5.* ВЛАЖНЫЙ ВОЗДУХ

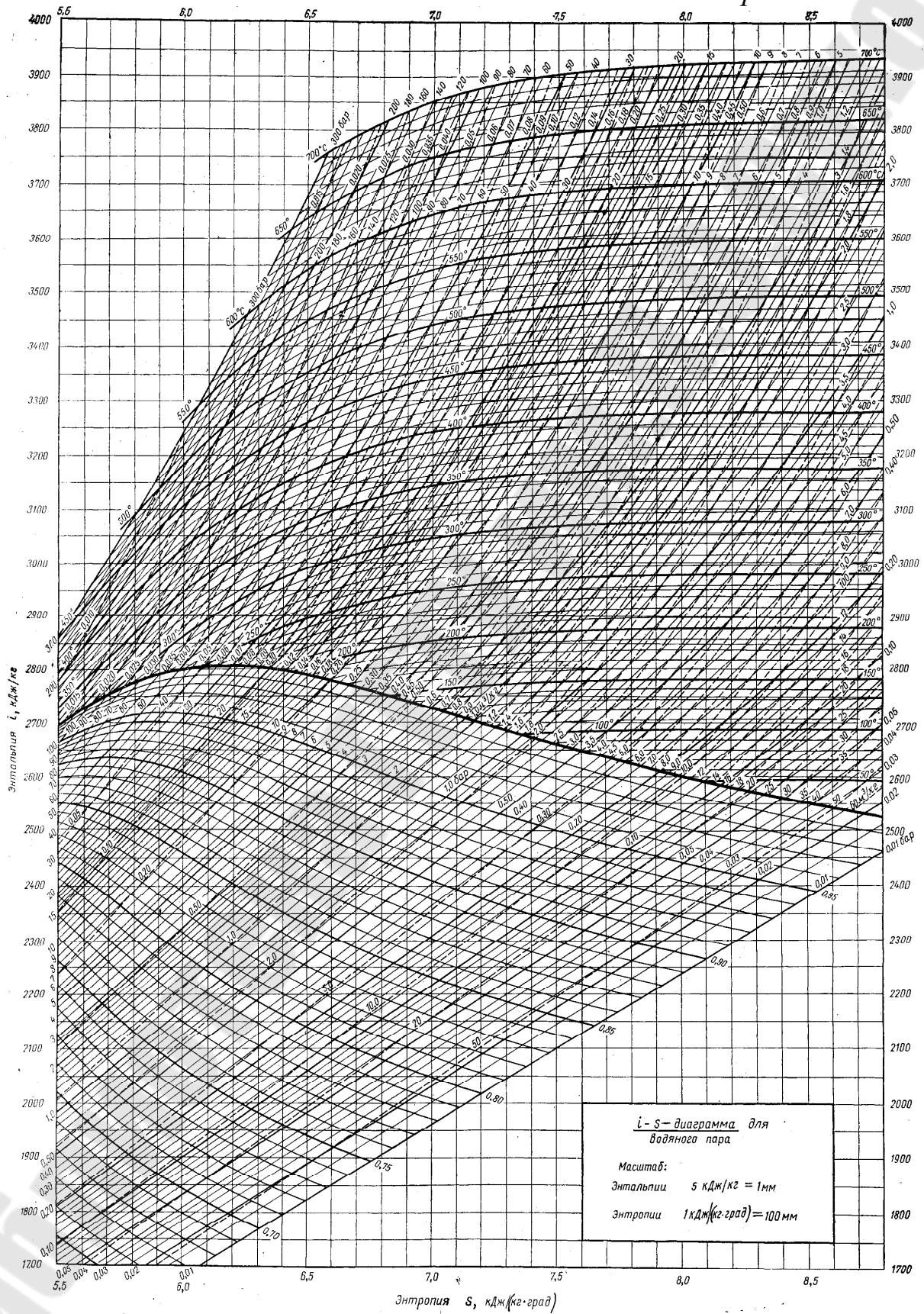
*Тема 6.* ТЕРМОДИНАМИКА ПОТОКА

*Тема 7.* ЦИКЛЫ ПАРСИЛОВЫХ УСТАНОВОК

*Тема 8.* ТЕПЛОВОЙ КОНСТРУКТИВНЫЙ РАСЧЕТ СЕКЦИОННОГО ВОДО-ВОДЯНОГО ПОДОГРЕВАТЕЛЯ

# ПРИЛОЖЕНИЯ

## Приложение 1



Насыщенный водяной пар (по температурам)

$t, ^\circ\text{C}$	$p, \text{бар}$	$v, \text{м}^3/\text{кг}$	$v^{\text{ж}}, \text{м}^3/\text{кг}$	$h, \text{кДж/кг}$	$h^{\text{ж}}, \text{кДж/кг}$	$r, \text{кДж/кг}$	$s, \text{кДж/(кг}\cdot^\circ\text{C)}$	$s^{\text{ж}}, \text{кДж/(кг}\cdot^\circ\text{C)}$
0,01	0,006108	0,0010002	206,3	0	2501	2501	0	9,1544
5	0,008719	0,0010001	147,2	21,05	2510	2489	0,0762	9,0241
10	0,012277	0,0010004	106,42	42,04	2519	2477	0,1510	8,8994
15	0,017041	0,0010010	77,97	62,97	2528	2465	0,2244	8,7806
20	0,02337	0,0010018	57,84	83,90	2537	2454	0,2964	8,6665
25	0,03166	0,0010030	43,40	104,81	2547	2442	0,3672	8,5570
30	0,04241	0,0010044	32,93	125,71	2556	2430	0,4366	8,4523
35	0,05622	0,0010061	25,24	146,60	2565	2418	0,5049	8,3519
40	0,07375	0,0010079	19,55	167,50	2574	2406	0,5723	8,2559
45	0,09584	0,0010099	15,28	188,40	2582	2394	0,6384	8,1638
50	0,12335	0,0010121	12,04	209,3	2592	2383	0,7038	8,0753
55	0,15740	0,0010145	9,578	230,2	2600	2370	0,7679	7,9901
60	0,19917	0,0010171	7,678	251,1	2609	2358	0,8311	7,9084
65	0,2501	0,0010199	6,201	272,1	2617	2345	0,8934	7,8297
70	0,3117	0,0010228	5,045	293,0	2626	2333	0,9549	7,7544
75	0,3855	0,0010258	4,133	314	2635	2321	1,0157	7,6815
80	0,4736	0,0010290	3,408	334,9	2643	2308	1,0753	7,6116
85	0,5781	0,0010324	2,828	355,9	2651	2295	1,1342	7,5438
90	0,7011	0,0010359	2,361	377,0	2659	2282	1,1925	7,4787
95	0,8451	0,0010396	1,982	398,0	2668	2270	1,2502	7,4155
100	1,0132	0,0010435	1,673	419,1	2676	2257	1,3071	7,3547
110	1,4326	0,0010515	1,210	461,3	2691	2230	1,4184	7,2387
120	1,9854	0,0010603	0,8917	503,7	270	2202	1,5277	7,1298
130	2,7011	0,0010697	0,6683	546,3	2721	2174	1,6345	7,0272
140	3,614	0,0010798	0,5087	589,0	2734	2145	1,7392	6,9304
150	4,760	0,0010906	0,3926	632,2	2746	2114	1,8418	6,8383
160	6,180	0,0011021	0,3068	675,5	2758	2082	1,9427	6,7508
170	7,920	0,0011144	0,2426	719,2	2769	2050	2,0417	6,6666
180	10,027	0,0011275	0,1939	763,1	2778	2015	2,1395	6,5858
190	12,553	0,0011415	0,1564	807,5	2786	1979	2,2357	6,5074
200	15,551	0,0011565	0,1272	852,4	2793	1941	2,3308	6,4318
210	19,080	0,0011726	0,1043	897,7	2798	1900	2,4246	6,3577
220	23,201	0,0011900	0,08606	943,7	2802	1858	2,5179	6,2849
230	27,979	0,0012087	0,07147	990,4	2803	1813	2,6101	6,2133
240	33,480	0,0012291	0,05967	1037,5	2803	1766	2,7021	6,1425
250	39,776	0,0012512	0,05006	1085,7	2801	1715	2,7934	6,0721
260	46,94	0,0012755	0,04215	1135,1	2796	1661	2,8851	6,0013
270	55,05	0,0013023	0,03560	1185,3	2790	1605	2,9764	5,9297
280	64,91	0,0013321	0,03013	1236,9	2780	1542,9	3,0681	5,8573

Продолжение прилож. 2

$t, ^\circ\text{C}$	$p, \text{бар}$	$v_{\square}, \text{м}^3/\text{кг}$	$v_{\square\square}, \text{м}^3/\text{кг}$	$h_{\square}, \text{кДж/кг}$	$h_{\square\square}, \text{кДж/кг}$	$r, \text{кДж/кг}$	$s_{\square}, \text{кДж/(кг}\cdot^\circ\text{C)}$	$s_{\square\square}, \text{кДж/(кг}\cdot^\circ\text{C)}$
290	74,45	0,0013655	0,02554	1290,0	2766	1476,3	3,1611	5,7827
300	85,92	0,0014036	0,02164	1344,9	2749	1404,2	3,2548	5,7049
310	98,70	0,001447	0,01832	1402,1	2727	1325,2	3,3508	5,6233
320	112,90	0,001499	0,01545	1462,1	2700	1237,8	3,4495	5,5353
330	128,65	0,001562	0,01297	1526,1	2666	1139,6	3,5522	5,4412
340	146,08	0,001639	0,01078	1594,7	2622	1027,0	3,6605	5,3361
350	165,37	0,001741	0,008803	1671	2565	893,5	3,7786	5,2117
360	186,74	0,001894	0,006943	1762	2481	719,3	3,9162	5,0530
370	210,53	0,00222	0,00493	1893	2331	438,4	4,1137	4,7951

Приложение 3

Насыщенный водяной пар (по давлениям)

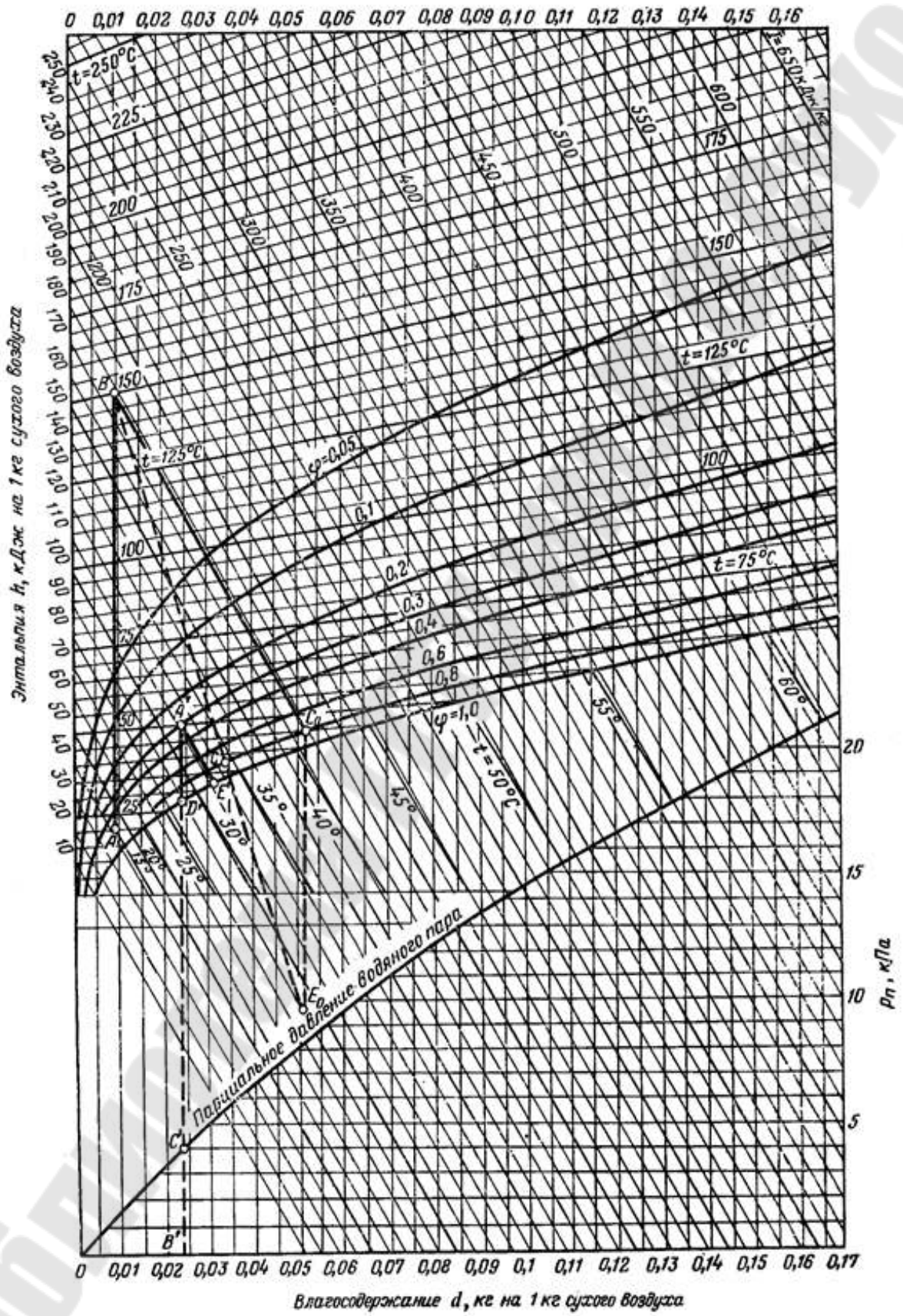
$p, \text{бар}$	$t, ^\circ\text{C}$	$v_{\square}, \text{м}^3/\text{кг}$	$v_{\square\square}, \text{м}^3/\text{кг}$	$h_{\square}, \text{кДж/кг}$	$h_{\square\square}, \text{кДж/кг}$	$r, \text{кДж/кг}$	$s_{\square}, \text{кДж/(кг}\cdot^\circ\text{C)}$	$s_{\square\square}, \text{кДж/(кг}\cdot^\circ\text{C)}$
0,010	6,92	0,0010001	129,9	29,32	2513	2484	0,1054	8,975
0,020	17,514	0,0010014	66,97	73,52	2533	2459	0,2609	8,722
0,030	24,097	0,0010028	45,66	101,04	2545	2444	0,3546	8,576
0,040	28,979	0,0010041	34,81	121,42	2554	2433	0,4225	8,473
0,050	32,88	0,0010053	28,19	137,83	2561	2423	0,4761	8,393
0,060	36,18	0,0010064	23,74	151,50	2567	2415	0,5207	8,328
0,070	39,03	0,0010075	20,53	163,43	2572	2409	0,5591	8,274
0,080	41,54	0,0010085	18,10	173,9	2576	2402	0,5927	8,227
0,090	43,79	0,0010094	16,20	183,3	2580	2397	0,6225	8,186
0,10	45,84	0,0010103	14,68	191,9	2584	2392	0,6492	8,149
0,20	60,08	0,0010171	7,647	251,4	2609	2358	0,8321	7,907
0,30	69,12	0,0010222	5,226	289,3	2625	2336	0,9441	7,769
0,40	75,88	0,0010264	3,994	317,7	2636	2318	1,0261	7,670
0,50	81,35	0,0010299	3,239	340,6	2645	2304	1,0910	7,593
0,60	85,95	0,0010330	2,732	360,0	2653	2293	1,1453	7,531
0,70	89,97	0,0010359	2,364	376,8	2660	2283	1,1918	7,479
0,80	93,52	0,0010385	2,087	391,8	2665	2273	1,2330	7,434
0,90	96,72	0,0010409	1,869	405,3	2670	2265	1,2696	7,394
1,0	99,64	0,0010432	1,694	417,4	2675	2258	1,3026	7,360
1,5	111,38	0,0010527	1,159	467,2	2693	2226	1,4336	7,223
2,0	120,23	0,0010605	0,8854	504,8	2707	2202	1,5302	7,127

Продолжение прилож.3

p, бар	t, °C	$v_{\square}$ , м <sup>3</sup> /кг	$v_{\square}$ , м <sup>3</sup> /кг	$h_{\square}$ , кДж/кг	$h_{\square}$ , кДж/кг	$r$ , кДж/кг	$s_{\square}$ , кДж/(кг·°C)	$s_{\square}$ , кДж/(кг·°C)
2,5	127,43	0,0010672	0,7185	535,4	2717	2182	1,6071	7,053
3,0	133,54	0,0010733	0,6057	561,4	2725	2164	1,672	6,992
3,5	138,88	0,0010786	0,5241	584,5	2732	2148	1,728	6,941
4,0	143,62	0,0010836	0,4624	604,7	2738	2133	1,777	6,897
4,5	147,92	0,0010883	0,4139	623,4	2744	2121	1,821	6,857
5,0	151,84	0,0010927	0,3747	640,1	2749	2109	1,860	6,822
6,0	158,84	0,0011007	0,3156	670,5	2757	2086	1,931	6,761
7,0	164,96	0,0011081	0,2728	697,2	2764	2067	1,992	6,709
8,0	170,42	0,0011149	0,2403	720,9	2769	2048	2,046	6,663
9,0	175,35	0,0011213	0,2149	742,8	2774	2031	2,094	6,623
10,0	179,88	0,0011273	0,1946	762,7	2778	2015	2,138	6,587
11,0	184,05	0,0011331	0,1775	781,1	2781	2000	2,179	6,554
12,0	187,95	0,0011385	0,1633	798,3	2785	1987	2,216	6,523
13,0	191,60	0,0011438	0,1512	814,5	2787	1973	2,251	6,495
14,0	195,04	0,0011490	0,1408	830,0	2790	1960	2,284	6,469
15,0	198,28	0,0011539	0,1317	844,6	2792	1947	2,314	6,445
16,0	201,36	0,0011586	0,1238	858,3	2793	1935	2,344	6,422
17,0	204,30	0,0011632	0,1167	871,6	2795	1923	2,371	6,400
18,0	207,10	0,0011678	0,1104	884,4	2796	1912	2,397	6,379
19,0	209,78	0,0011722	0,1047	896,6	2798	1901	2,422	6,359
20,0	212,37	0,0011766	0,09958	908,5	2799	1891	2,447	6,340
25,0	223,93	0,0011972	0,07993	961,8	2802	1840	2,554	6,256
30,0	233,83	0,0012163	0,06665	1008,3	2804	1796	2,646	6,186
32	237,44	0,0012238	0,06246	1025,3	2803	1778	2,679	6,161
34	240,88	0,0012310	0,05875	1041,9	2803	1761	2,710	6,137
36	244,16	0,0012380	0,05543	1057,5	2802	1745	2,740	6,113
38	247,31	0,0012450	0,05246	1072,7	2802	1729	2,769	6,091
40	250,33	0,0012520	0,04977	1087,5	2801	1713	2,796	6,070
42	253,24	0,0012588	0,04732	1101,7	2800	1698	2,823	6,049
44	256,05	0,0012656	0,04508	1115,3	2798	1683	2,849	6,029
46	258,75	0,0012724	0,04305	1128,8	2797	1668	2,874	6,010
48	261,37	0,0012790	0,04118	1141,8	2796	1654	2,898	5,991
50	263,91	0,0012857	0,03944	1154,4	2794	1640	2,921	5,973
55	269,94	0,0013021	0,03564	1184,9	2790	1604,6	2,976	5,930
60	275,56	0,0013185	0,03243	1213,9	2785	1570,8	3,027	5,890
65	280,83	0,0013347	0,02973	1241,3	2779	1537,5	3,076	5,851
70	285,80	0,0013510	0,02737	1267,4	2772	1504,9	3,122	5,814
75	290,50	0,0013673	0,02532	1292,7	2766	1472,8	3,166	5,779
80	294,98	0,0013838	0,02352	1317,0	2758	1441,1	3,208	5,745
85	299,24	0,0014005	0,02192	1340,8	2751	1409,8	3,248	5,711

Продолжение прилож. 3

p, бар	t, °C	$v$ , м <sup>3</sup> /кг	$v$ , м <sup>3</sup> /кг	h, кДж/кг	h, кДж/кг	r, кДж/кг	s, кДж/(кг·°C)	s, кДж/(кг·°C)
90	303,32	0,0014174	0,02048	1363,7	2743	1379,3	3,287	5,678
95	307,22	0,0014345	0,01919	1385,9	2734	1348,4	3,324	5,646
100	310,96	0,0014521	0,01803	1407,7	2725	1317,0	3,360	5,615
110	318,04	0,001489	0,01598	1450,2	2705	1255,4	3,430	5,553
120	324,63	0,001527	0,01426	1491,1	2685	1193,5	3,496	5,492
130	330,81	0,001567	0,01277	1531,5	2662	1130,8	3,561	5,432
140	336,63	0,001611	0,01149	1570,8	2638	1066,9	3,623	5,372
150	342,11	0,001658	0,01035	1610	2611	1001,1	3,684	5,310
160	347,32	0,001710	0,009318	1650	2582	932,0	3,746	5,247
170	352,26	0,001768	0,008382	1690	2548	858,3	3,807	5,177
180	356,96	0,001837	0,007504	1732	2510	778,2	3,871	5,107
190	361,44	0,001921	0,00668	1776	2466	690	3,938	5,027
200	365,71	0,00204	0,00585	1827	2410	583	4,015	4,928
210	369,79	0,00221	0,00498	1888	2336	448	4,108	4,803
220	373,7	0,00273	0,00367	2016	2168	152	4,303	4,591



Приложение 5

Конструктивные характеристики секционных водо-водяных подогревателей с длиной секции 4 м  
(по ГОСТ 27590-88 и по ОСТ 34-588-68)

	Обозначение подогревателей по ГОСТ 27590-88 и по ОСТ 34-588-68										
	02	04	06	08	10	12	14	16	18	20	22
Диаметр корпуса $D_H/D_B$ , мм/мм	57/50	76/69	89/82	114/106	168/156	219/207	273/259	325/309	377/359	426/408	530/514
Число трубок в одной секции, $n$	4	7	12	19	37	64	109	151	212	283	450
Поверхность нагрева одной секции, $F_{сек}$ , м <sup>2</sup>	0,75	1,31	2,24	3,54	6,9	12,0	20,3	28,0	40,1	52,5	83,4
Площадь сечения трубок, $f_T$ , м <sup>2</sup>	$0,62 \cdot 10^{-3}$	$1,08 \cdot 10^{-3}$	$1,85 \cdot 10^{-3}$	$2,93 \cdot 10^{-3}$	$5,70 \cdot 10^{-3}$	$9,85 \cdot 10^{-3}$	$1,68 \cdot 10^{-2}$	$2,33 \cdot 10^{-2}$	$3,33 \cdot 10^{-2}$	$4,36 \cdot 10^{-2}$	$6,93 \cdot 10^{-2}$
Площадь сечения межтрубного пространства, $f_{MT}$ , м <sup>2</sup>	$1,16 \cdot 10^{-3}$	$2,33 \cdot 10^{-3}$	$2,87 \cdot 10^{-3}$	$5,00 \cdot 10^{-3}$	$1,22 \cdot 10^{-2}$	$2,08 \cdot 10^{-2}$	$3,08 \cdot 10^{-2}$	$4,46 \cdot 10^{-2}$	$5,78 \cdot 10^{-2}$	$7,19 \cdot 10^{-2}$	$11,54 \cdot 10^{-2}$
Эквивалентный диаметр межтрубного пространства, $d_{эKB}$ , мм	13	16,4	13,4	15,5	20,7	25,8	19,6	20,8	19,3	18,6	19



Библиотека ГГТУ им. П.О.Сухого

**Степанишина Юлия Александровна**

## **ТЕОРЕТИЧЕСКАЯ ТЕПЛОТЕХНИКА**

**Практикум  
для студентов специальности  
1-43 01 03 «Промышленная теплоэнергетика»  
дневной и заочной форм обучения**

д

Подписано к размещению в электронную библиотеку  
ГГТУ им. П. О. Сухого в качестве электронного  
учебно-методического документа 25.05.16.

Рег. № 38Е.

<http://www.gstu.by>