



Федеральное государственное бюджетное образовательное  
учреждение высшего образования  
Башкирский государственный аграрный университет

Кафедра «Теплоэнергетика физика»

## **Б1.О.15 ТЕХНИЧЕСКАЯ ТЕРМОДИНАМИКА**

### **МЕТОДИЧЕСКИЕ УКАЗАНИЯ**

к практическим занятиям

### **Модуль 2 Свойства и процессы идеальных и реальных газов**

Направление подготовки

13.03.01 Теплоэнергетика и теплотехника

Профили подготовки

Энергообеспечение предприятий

Экономика и управление на предприятии

Квалификация (степень) выпускника

бакалавр

Уфа 2019

Методические указания разработаны доцентом Юхиным Д.П. и ассистентом Юхиной А.Н. Рассмотрены и одобрены на заседании кафедры «Теплоэнергетика и физика» «28» марта 2019 г. (протокол №8/1)) и методической комиссией энергетического факультета («28» марта 2019 г. (протокол №8/1)).

## ОГЛАВЛЕНИЕ

Условные обозначения	4
ПРАКТИЧЕСКОЕ ЗАНЯТИЕ №5	
Термодинамические процессы газов. Решение задач.	5
ПРАКТИЧЕСКОЕ ЗАНЯТИЕ №6	
Водяной пар. Диаграмма h-s водяного пара. Решение задач.	16
ПРАКТИЧЕСКОЕ ЗАНЯТИЕ №7	
Влажный воздух . h-d диаграмма влажного воздуха. Решение задач.	26
БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК	38

## УСЛОВНЫЕ ОБОЗНАЧЕНИЯ

$a$	- температуропроводность, $\text{м}^2/\text{с}$ ;
$\beta$	- коэффициент объемного расширения, $\text{К}^{-1}$ , коэффициент массоотдачи, $\text{м}/\text{с}$ ; коэффициент оребрения;
$c$	- массовая удельная теплоемкость, $\text{кДж}/(\text{кг}\cdot\text{К})$ ;
$C_0$	- излучательная способность абсолютно черного тела, $\text{Вт}/(\text{м}^2\cdot\text{К}^4)$ ;
$d$	- диаметр труб, $\text{м}$ ; влагосодержание воздуха, $\text{кг пара}/\text{кг сухого воздуха}$ ;
$D$	- диаметр ребра, масса пара, $\text{кг}/\text{с}$ ; коэффициент молекулярной диффузии, $\text{м}^2/\text{с}$ ;
$h, H$	- удельная энтальпия, $\text{кДж}/\text{кг}$ ; энтальпия, $\text{кДж}$ ; высота, $\text{м}$ ;
$g$	- ускорение силы тяжести, $\text{м}/\text{с}^2$ ;
$g$	- удельная теплота парообразования, $\text{кДж}/\text{кг}$ ;
$\rho$	- плотность, $\text{кг}/\text{м}^3$ ;
$p$	- давление, $\text{Па}$ ;
$J$	- сила тока, $\text{А}$ ;
$K$	- коэффициент теплопередачи, $\text{Вт}/(\text{м}^2\cdot\text{К})$ ;
$K_1$	- линейный коэффициент теплопередачи, $\text{Вт}/(\text{м}\cdot\text{К})$ ;
$K_{\text{ш}}$	- коэффициент теплопередачи шаровой стенки, $\text{Вт}/(\text{м}^2\cdot\text{К})$ ;
$l$	- длина, $\text{м}$ ; определяющий размер, $\text{м}$ ;
$L$	- длина, $\text{м}$ ; расход воздуха, $\text{кг}/\text{с}$ ( $\text{Нм}/\text{с}$ );
$m$	- масса, $\text{кг}$ ;
$m_t$	- массовый расход, $\text{кг}/\text{с}$ ( $\text{кг}/\text{ч}$ );
$V$	- объем, $\text{м}^3$ ;
$v$	- удельный объем, $\text{м}^3/\text{кг}$ ;
$V_t$	- объемный расход, $\text{м}^3/\text{с}$ ( $\text{м}^3/\text{ч}$ );
$Q$	- теплота, $\text{Дж}$ ;
$q$	- удельная теплота, $\text{Дж}/\text{кг}$ ; поверхностная плотность теплового потока, $\text{Вт}/\text{м}^2$ ;
$q_l$	- линейная плотность теплового потока, $\text{Вт}/\text{м}$ ;
$q_{\text{кр}}$	- критическая плотность теплового потока, $\text{Вт}/(\text{м}^2\cdot\text{К})$ ;
$q_p$	- поверхностная плотность теплового потока ребристой стенки, $\text{Вт}/(\text{м}^2\cdot\text{К})$ ;
$\Phi$	- тепловой поток, $\text{Вт}$ ;
$q_0$	- удельная холодопроизводительность, $\text{Вт}/\text{кг}$ ;
$R$	- термическое сопротивление, $(\text{м}^2\cdot\text{К})/\text{Вт}$ ; радиус, $\text{м}$ ;
$R_1$	- линейное термическое сопротивление $(\text{м}\cdot\text{К})/\text{Вт}$ ;
$S$	- шаг труб, колбас и т.д., $\text{м}$ ;
$S_p$	- шаг ребер, $\text{м}$ ;
$t$ и $T$	- температура по шкале Цельсия, $^{\circ}\text{C}$ ; абсолютная температура, $\text{К}$ ;
$t_n$	- температура насыщения, $^{\circ}\text{C}$ ;
$t_p$	- температура точки росы, $^{\circ}\text{C}$ ;
$\delta$	- толщина, $\text{м}$ ;
$\omega$	- скорость движения, $\text{м}/\text{с}$ ;
$f$	- площадь поперечного сечения, $\text{м}^2$ ; площадь живого сечения, $\text{м}^2$ ;
$A_1$	- площадь поверхности теплообмена, $\text{м}^2$ ;
$\varepsilon$	- степень черноты, поправочный коэффициент;
$\theta$	- температурный напор, безразмерная избыточная температура;
$\lambda$	- теплопроводность, $\text{Вт}/(\text{м}\cdot\text{К})$ ;
$\gamma$	- кинематическая вязкость, $\text{м}^2/\text{с}$ ;
$\xi$	- концентрация, %; коэффициент влаговыделения;
$\zeta$	- поверхностное натяжение, $\text{Н}/\text{м}$ ; коэффициент испарения, $\text{кг}/(\text{м}^2\cdot\text{с})$ ;
$\tau$	- время, $\text{с}$ ;
$\varphi$	- относительная влажность, %; степень оребрения.

## ПРАКТИЧЕСКОЕ ЗАНЯТИЕ №5

### Термодинамические процессы газов. Решение задач.

Изменение состояния тела при взаимодействии его с окружающей средой называется термодинамическим процессом. В общем случае термодинамическом процессе могут изменяться все параметры состояния. В технической термодинамике рассматриваются следующие основные процессы:

- изохорный - при постоянном объеме ( $V=\text{const}$ );
  - изобарный - при постоянном давлении ( $p=\text{const}$ );
  - изотермический - при постоянной температуре ( $T=\text{const}$ );
  - адиабатный - без теплообмена ( $q=\text{const}$ );
  - политропный- ( $pv^n=\text{const}$ );
- где  $n$  - показатель политропы.

В переводе на русский язык слово «*политропа*» означает многообразие процессов, а в технической термодинамике политропными процессами называются закономерные газовые процессы. За величину, определяющую закономерность энергетического взаимодействия в газовом процессе, принимают отношение изменения внутренней энергии газа к количеству подведенной к нему теплоты:

$$\alpha = \frac{du}{\delta q} . \quad (5.1)$$

Если  $\alpha=\text{const}$ , то процесс будет политропным.

Для идеальных газов с постоянными изобарными и изохорными теплоемкостями закономерность процессов могут характеризовать следующие величины:

$$\alpha = \frac{du}{\delta q} = \frac{c_v dT}{c dT} = \frac{c_v}{c} = \text{const} \quad \text{или} \quad c = \frac{c_v}{\alpha} = \text{const} , \quad (5.2)$$

$$n = \frac{c - c_p}{c - c_v} = \text{const} \quad \text{или} \quad c = c_v \frac{n - k}{n - 1} , \quad (5.3)$$

где  $n$  – показатель политропы;  
 $c$  – теплоемкость процесса.

Уравнения политропы, описывающие взаимосвязь параметров  $p, v, T, v$  и  $p, T$ , имеют вид

$$pv^n = \text{const} ; \quad (5.4)$$

$$Tv^{\frac{1-n}{n}} = \text{const} ; \quad (5.5)$$

$$Tp^{\frac{1}{n}} = \text{const} . \quad (5.6)$$

Используя уравнения (5.4) ÷ (5.6), по двум состояниям газа в политропном процессе, можно определить показатель политропы, например, по уравнению (5.4):

$$n = \frac{\text{Ln} \frac{p_2}{p_1}}{\text{Ln} \frac{v_1}{v_2}} . \quad (5.7)$$

Расчет обратимых политропных процессов идеальных газов выполняется на основании уравнения первого закона термодинамики и формул (5.2) ÷ (5.6). Основные расчетные зависимости для политропных процессов идеальных газов приведены в табл. 3.

Таблица 3. Уравнения для расчета политропных процессов идеальных газов

Процессы	n	c	$\alpha$	Уравнение	q	$\ell$	$\Delta s$	$\Delta u,$ $\Delta h$
p=const	0	$c_p$	$\frac{1}{\kappa}$	$\frac{v}{T} = \text{const}$	$c_p \Delta t$	$p \Delta v = R \Delta T$	$c_p \ln \frac{T_2}{T_1}$	$\Delta u = c_v(t_2 - t_1), \Delta h = c_p(t_2 - t_1)$
v=const	$\pm\infty$	$c_v$	1	$\frac{p}{T} = \text{const}$	$c_v \Delta t$	0	$c_v \ln \frac{T_2}{T_1}$	
T=const	1	$\pm\infty$	0	$pv = \text{const}$	$RT \ln \frac{p_1}{p_2} =$ $= RT \ln \frac{v_2}{v_1}$	$RT \cdot \ln \frac{p_1}{p_2} =$ $= RT \cdot \ln \frac{v_2}{v_1}$	$R \cdot \ln \frac{p_1}{p_2} =$ $= R \cdot \ln \frac{v_2}{v_1}$	
s=const ( $\delta q=0$ )	$\kappa$	0	$\pm\infty$	$T p^{\frac{1-\kappa}{\kappa}} = \text{const}$  $p v^{\kappa} = \text{const}$ $T v^{\kappa-1} = \text{const}$	0	$u_1 - u_2 =$ $= c_v(T_1 - T_2) =$  $= \frac{1}{\kappa-1}(p_1 v_1 - p_2 v_2)$	0	
Политропа n=const, $\alpha = \text{const}$	$\frac{c_p - c}{c_v - c}$	$c_v \frac{n - \kappa}{n - 1}$	$\frac{1 - n}{\kappa - n}$	$T p^{\frac{1-n}{n}} = \text{const}$  $p v^n = \text{const}$ $T v^{n-1} = \text{const}$	$c \Delta t$	$\frac{R}{n-1}(T_1 - T_2) =$ $= \frac{1}{n-1}(p_1 v_1 - p_2 v_2)$	$c \cdot \ln \frac{T_2}{T_1}$	

На рис. 16 и 17 показаны основные политропные процессы идеальных газов в p,v- и T,s- диаграммах, проходящих через общую точку А, что позволяет наглядно сопоставить изображение политроп с различными значениями показателя политропы n.

Все политропы в p,v- диаграмме с положительным показателем  $n > 0$  располагаются во II и IV квадрантах относительно точки А, а с показателем  $n < 0$  – в I и III квадрантах относительно точки А.

Политропы в T,s- диаграмме, проходящие через I и III квадранты, относительно точки А имеют положительную теплоемкость, причем *изохора круче изобары, т.к.  $c_p > c_v$* . Самая крутая политропа – адиабата, для нее теплоемкость равна нулю. Самая пологая политропа – изотерма, для нее теплоемкость равна бесконечности.

Политропы, проходящие в T,s- диаграмме через II и IV квадранты, имеют отрицательную теплоемкость, для них  $1 < n < \kappa$ . В таких процессах при подводе теплоты температура газа уменьшается, а при отводе теплоты от газа его температура увеличивается.

Используя графическое изображение процесса, проводят его качественный анализ. Например, по изображению процесса АВ (рис. 16) видно, что это процесс с отрицательной теплоемкостью  $c < 0$ , т.к. dT и ds имеют противоположные знаки; теплота процесса  $q_{AB} > 0$ , т.к.  $ds > 0$ ;  $\Delta u < 0$  и  $\Delta h < 0$ , т.к.  $dT < 0$ ; работа изменения объема  $\ell > 0$ , т.к. при  $1 < n < \kappa$  ( $c < 0$ ) и  $T_B < T_A$  из уравнения политропы  $T v^{n-1} = \text{const}$  следует, что  $v_B > v_A$ .

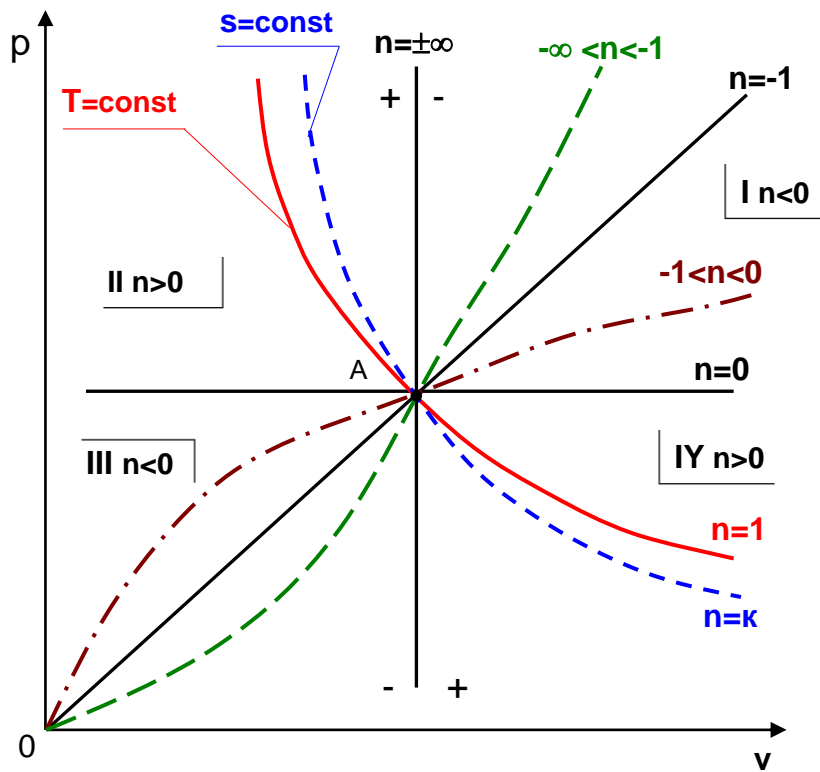


Рис. 16 Изображение политропных процессов идеальных газов в  $p, v$ - диаграмме

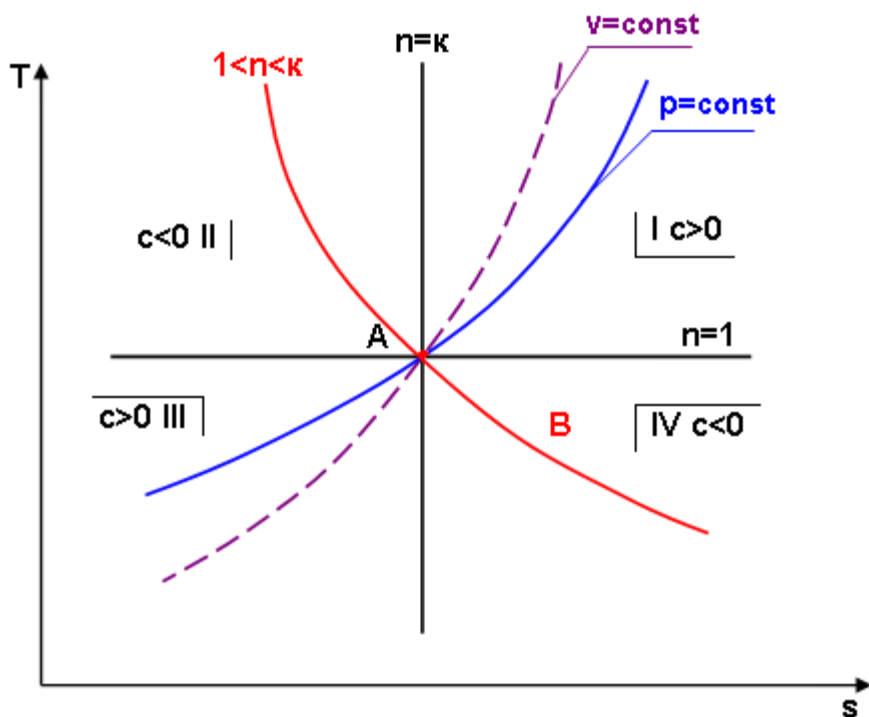


Рис. 17 Изображение политропных процессов идеальных газов в  $T, s$ - диаграмме

### Задачи к ПЗ 5.

Пример решения задачи:

5.1. Двуокись углерода (CO<sub>2</sub>) при давлении p<sub>1</sub>=0,2 МПа и температуре t<sub>1</sub>=37 °С по политропе с n=2 переходит в состояние с давлением p<sub>2</sub>=0,8 МПа. Определить температуру и удельную энтропию газа в конце процесса, удельную работу изменения объема и теплоту процесса. Изобразить процесс в диаграммах p,v и T,s.

Считать газ идеальным с постоянными теплоемкостями c<sub>v</sub> и c<sub>p</sub>.

Решение

Температура газа в конце процесса определяется из уравнения

$$T_2 = T_1 \left( \frac{p_1}{p_2} \right)^{\frac{1-n}{n}} = 310 \left( \frac{0,2}{0,8} \right)^{\frac{1-2}{2}} = 620 \text{ К.}$$

Абсолютное значение удельной энтропии s<sub>2</sub> определяют, приняв начало отсчета s<sub>0</sub>=0 при p<sub>0</sub>=p<sub>1</sub>=0,2 МПа и t<sub>0</sub>=t<sub>1</sub>=37 °С, по уравнению

$$s_2 = c_p \ln \frac{T_2}{T_0} - R \cdot \ln \frac{p_2}{p_0} = \frac{8314}{2 \cdot 44} \cdot 8 \cdot \ln \frac{620}{310} - \frac{8314}{44} \cdot \ln \frac{0,8}{0,2} = 262 \frac{\text{Дж}}{\text{кг} \cdot \text{К}}.$$

Удельную теплоту процесса определяют, используя теплоемкость процесса:

$$c = c_v \frac{n - \kappa}{n - 1} = \frac{8314}{2 \cdot 44} \cdot 6 \cdot \frac{2 - 1,333}{2 - 1} = 378 \frac{\text{Дж}}{\text{кг} \cdot \text{К}};$$

$$q = c(T_2 - T_1) = 378(620 - 310) = 117180 \frac{\text{Дж}}{\text{кг}}.$$

Определив теплоемкость процесса, проверяют абсолютное значение удельной энтропии в конце процесса, задав начало отсчета энтропии в первой точке процесса s<sub>0</sub>=s<sub>1</sub>=0 по уравнению

$$s_2 = s_2 - s_0 = c \cdot \ln \frac{\dot{Q}_2}{\dot{Q}_1} = 378 \cdot \ln \frac{620}{310} = 262 \frac{\text{Дж}}{\text{кг} \cdot \text{К}}.$$

Удельную работу изменения объема проще определить из первого закона термодинамики:

$$\ell = q - \Delta u = q - c_v(T_2 - T_1) = 117180 - \frac{8314}{2 \cdot 44} \cdot 6(620 - 310) = -58548 \frac{\text{Дж}}{\text{кг}}.$$

Проверку определения работы изменения объема можно сделать по уравнению

$$\ell = \frac{R}{n-1}(T_1 - T_2) = \frac{8314}{44(2-1)}(310 - 620) = -58576 \frac{\text{Дж}}{\text{кг}}.$$

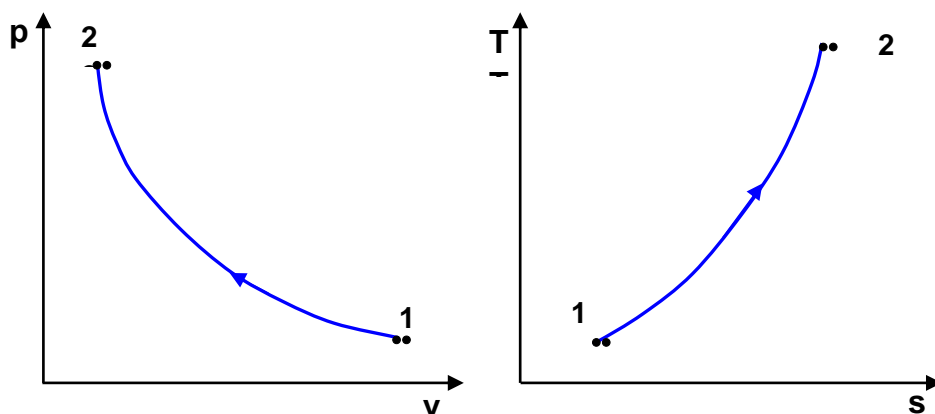


Рис. 18 Изображение процесса 12 к задаче 5.1 в p,v- и T,s-диаграммах

Процесс с  $n=2$  в диаграмме  $p, v$  – гипербола, идущая в сторону увеличения давления, в  $T, s$ - диаграмме – логарифмическая кривая с положительной теплоемкостью, идущая в сторону увеличения температуры (рис. 18). Определенные в расчете величины качественно соответствуют данным изображениям процесса:  $\ell < 0$ , т.к.  $dv < 0$  и  $q > 0$ , т.к.  $ds > 0$ .

*Частные случаи процессов идеальных газов*

5.2. В герметичном жестком резервуаре вместимостью  $0,1 \text{ м}^3$  находится идеальный воздух ( $\mu=28,96 \text{ кг/кмоль}$ ,  $i=5$ ) при давлении 2 бара и температуре  $30 \text{ }^\circ\text{C}$ . Какое количество теплоты необходимо сообщить воздуху в резервуаре, чтобы повысить его давление до 4 бар? Изобразить процесс в диаграммах  $p, v$  и  $T, s$ .

Считать газ идеальным с постоянными теплоемкостями  $c_v$  и  $c_p$ .

Ответ:  $50 \text{ кДж}$ .

5.3. 1 кг азота ( $\text{N}_2$ ) с начальными параметрами  $p_1=10 \text{ бар}$ ,  $t_1=300 \text{ }^\circ\text{C}$  расширяется до пятикратного увеличения объема. Считая, что расширение а) изобарное, б) изотермическое, в) адиабатное, определить конечные параметры  $p_2$ ,  $t_2$ ,  $v_2$ , работу изменения объема и теплоту процесса. Изобразить процессы в диаграммах  $p, v$  и  $T, s$ .

Считать газ идеальным с постоянными теплоемкостями  $c_v$  и  $c_p$ .

Ответ:  $v_2=0,85 \text{ м}^3/\text{кг}$ .

а)  $t_2=2592 \text{ }^\circ\text{C}$ ,  $p_2=10 \text{ бар}$ ,  $\ell=680 \text{ кДж/кг}$ ,  $q=2382 \text{ кДж/кг}$ ;

б)  $t_2=300 \text{ }^\circ\text{C}$ ,  $p_2=2 \text{ бар}$ ,  $\ell=q=274 \text{ кДж/кг}$ ;

в)  $t_2=28 \text{ }^\circ\text{C}$ ,  $p_2=1,05 \text{ бар}$ ,  $\ell=680 \text{ кДж/кг}$ ,  $q=2382 \text{ кДж/кг}$ .

5.4. Один килограмм идеального воздуха ( $\mu=28,96 \text{ кг/кмоль}$ ,  $i=5$ ) с начальными параметрами  $p_1=1 \text{ бар}$ ,  $t_1=30 \text{ }^\circ\text{C}$  сжимается до давления  $p_2=10 \text{ бар}$  двумя способами:

1) изотермически;

2) адиабатно.

Определить работу, теплоту, конечные объем и температуру, изменение энтропии процесса. Изобразить процессы в  $p, v$ - и  $T, s$ - диаграммах.

Считать газ идеальным с постоянными теплоемкостями  $c_v$  и  $c_p$ .

Ответ: 1)  $q=\ell=-200,3 \text{ кДж/кг}$ ,  $v_2=0,087 \text{ м}^3/\text{кг}$ ,  $\Delta s=-0,661 \text{ кДж}/(\text{кг}\cdot\text{K})$ ;

2)  $\ell=-202,4 \text{ кДж/кг}$ ,  $v_2=0,168 \text{ м}^3/\text{кг}$ ,  $t_2=312 \text{ }^\circ\text{C}$ .

5.5. Смесь газов имеет условную молярную массу  $\mu_{\text{см}}=36 \text{ кг/кмоль}$ . При постоянной температуре смесь расширяется от  $v_1=0,3 \text{ м}^3/\text{кг}$  до  $v_2=1 \text{ м}^3/\text{кг}$ . Определить изменение удельной энтропии смеси газов в этом процессе.

Считать газы идеальными с постоянными теплоемкостями  $c_v$  и  $c_p$ .

Ответ:  $\Delta s=0,278 \text{ кДж}/(\text{кг}\cdot\text{K})$ .

5.6. Смесь гелия  $\text{He}$  ( $\mu_{\text{He}}=4 \text{ кг/кмоль}$ ) и азота  $\text{N}_2$  ( $\mu_{\text{N}_2}=28 \text{ кг/кмоль}$ ) обратимо адиабатно сжимается от  $p_1=2 \text{ бар}$ ,  $t_1=17 \text{ }^\circ\text{C}$  до  $p_2=6 \text{ бар}$ . Считая газы идеальными с постоянными  $c_v$  и  $c_p$ , определить  $v_2$ , если  $r_{\text{He}}=0,6$ .

Ответ:  $v_2=0,431 \text{ м}^3/\text{кг}$ .

5.7. Газовая смесь имеет состав по массе:  $\text{H}_2$  - 10 %,  $\text{CO}_2$  - 10 %,  $\text{CH}_4$  - 30 %,  $\text{N}_2$  - 50 %. Начальные параметры смеси:  $p_1=2 \text{ бар}$ ,  $t_1=27 \text{ }^\circ\text{C}$ . Определить конечную температуру и удельную работу изменения объема, если смесь обратимо адиабатно сжимается до  $p_2=10 \text{ бар}$ .

Считать газы идеальными с постоянными теплоемкостями  $c_v$  и  $c_p$ .

Ответ:  $t_2=195 \text{ }^\circ\text{C}$ ,  $\ell=-325 \text{ кДж/кг}$ .

5.8. Смесь газов  $\text{CH}_4$  и  $\text{CO}$  адиабатно расширяется от  $p_1=6$  бар и  $t_1=227$  °С до  $p_2=1$  бар. Массовая доля  $g_{\text{CH}_4}=0,4$ . Определить температуру  $t_2$  и работу изменения объема в этом процессе.

Считать газы идеальными с постоянными теплоемкостями  $c_v$  и  $c_p$ .

Ответ:  $T_2=311$  К,  $\ell=202$  кДж/кг.

5.9. Смесь газов  $\text{N}_2$  и  $\text{NH}_3$  при  $r_{\text{N}_2}=0,3$  адиабатно сжимается от  $p_1=1$  бар и  $t_1=47$  °С до  $p_2=5$  бар. Определить изменение энтальпии процесса и работу изменения объема.

Считать газы идеальными с постоянными теплоемкостями  $c_v$  и  $c_p$ .

Ответ:  $\Delta h=262$  кДж/кг,  $\ell=-194$  кДж/кг.

5.10. Газовая смесь, состоящая из  $\text{H}_2$  и  $\text{CH}_4$ , с теплоемкостью  $\mu c_{p\text{см}}=30,3$  кДж/(кмоль·К) нагревается при постоянном давлении от  $t_1=17$  °С до  $t_2=300$  °С. Считая газы идеальными с постоянными теплоемкостями  $c_v$  и  $c_p$ , определить изменение энтальпии и энтропии этого процесса.

Ответ:  $\Delta h_{\text{см}}=1415$  кДж/кг,  $\Delta s_{\text{см}}=3,41$  кДж/(кг·К).

5.11. Газовая смесь, состоящая из  $\text{H}_2$  и  $\text{CH}_4$  и имеющая газовую постоянную  $R_{\text{см}}=692,8$  Дж/(кг·К), нагревается при постоянном давлении от  $t_1=17$  °С до  $t_2=300$  °С. Считая газы идеальными с постоянными теплоемкостями  $c_v$  и  $c_p$ , определить изменение энтальпии и энтропии процесса.

Ответ:  $\Delta h_{\text{см}}=756$  кДж/кг,  $\Delta s_{\text{см}}=1,82$  кДж/(кг·К).

5.12. Смесь газов  $\text{N}_2$  и  $\text{CO}_2$ , имеющая газовую постоянную  $R_{\text{см}}=259,8$  Дж/(кг·К), адиабатно расширяется от  $p_1=6$  бар,  $t_1=500$  °С до  $p_2=1$  бар. Определить удельные работу изменения объема и изменение энтальпии данного процесса.

Считать газы идеальными с постоянными теплоемкостями  $c_v$  и  $c_p$ .

Ответ:  $\ell=206$  кДж/кг,  $\Delta h_{\text{см}}=-284$  кДж/кг.

#### *Политропные процессы идеальных газов*

5.13. Воздух ( $\mu=28,96$  кг/кмоль,  $i=5$ ) политропно с  $n=1,2$  переходит из состояния с  $p_1=6$  бар и  $t_1=320$  °С в состояние с давлением  $p_2=1$  бар. Определить: параметры начальной и конечной точек ( $v$ ,  $T$ ,  $s$ ), удельные теплоту и работу изменения объема. Изобразить процесс в  $p,v$ - и  $T,s$ - диаграммах.

Считать газ идеальным с постоянными теплоемкостями  $c_v$  и  $c_p$ .

Ответ:  $v_1=0,284$  м<sup>3</sup>/кг,  $s_1=268$  Дж/(кг·К),

$v_2=1,27$  м<sup>3</sup>/кг;  $T_2=439,6$  К;  $s_2=482$  Дж/(кг·К)

(начало отсчета энтропий  $s_0=0$  взято при н.ф.у.);

$q=110$  кДж/кг;  $\ell=220$  кДж/кг.

5.14. Азот ( $\text{N}_2$ ) в политропном процессе изменяет давление и температуру от  $p_1=8$  бар и  $t_1=27$  °С до  $v_2=0,176$  м<sup>3</sup>/кг и  $t_2=200$  °С. Определить работу изменения объема этого процесса и изобразить его в  $p,v$ - и  $T,s$ - диаграммах.

Считать газ идеальным с постоянными теплоемкостями  $c_v$  и  $c_p$ .

Ответ:  $\ell=51,4$  кДж/кг.

5.15. 5 кг кислорода  $\text{O}_2$  ( $\mu=32$  кг/кмоль) политропно переходит из состояния с  $p_1=1$  бар и  $T_1=290$  К в состояния с  $p_2=4$  бар и  $T_2=204$  К. Определить показатель политропы, количество теплоты, конечный объем и работу изменения объема данного процесса. Изобразите процесс в  $p,v$ - и  $T,s$ - диаграммах.

Считать газ идеальным с постоянными теплоемкостями  $c_v$  и  $c_p$ .

Ответ:  $n=0,8$ ,  $V_2=0,663$  м<sup>3</sup>,  $Q=-837,9$  кДж,  $L=-558,6$  кДж.

5.16.  $4 \text{ м}^3$  воздуха ( $\mu=28,96 \text{ кг/кмоль}$ ) при  $p_1=8 \text{ бар}$   $t_1=160 \text{ }^\circ\text{C}$  расширяется политропно до  $p_2=1 \text{ бар}$ , при этом его объем увеличивается в 6 раз. Определить работу изменения объема и количество теплоты процесса. Изобразить процесс в диаграммах  $p, v$  и  $T, s$ .

Считать газ идеальным двухатомным с  $c_v=\text{const}$  и  $c_p=\text{const}$ .

Ответ:  $L=5 \text{ МДж}$ ,  $Q=3 \text{ МДж}$ .

5.17. В политропном процессе изменяется состояние  $1 \text{ кг}$  воздуха ( $\mu=28,96 \text{ кг/кмоль}$ ) от  $p_1=1 \text{ бар}$ ,  $t_1=10 \text{ }^\circ\text{C}$  до  $t_2=400 \text{ }^\circ\text{C}$  за счет отвода теплоты в количестве  $280 \text{ кДж/кг}$ . Определить показатель политропы, конечное давление и объем, удельные работы изменения объема, изменение внутренней энергии, энтальпии и энтропии процесса. Изобразить процесс в диаграммах  $p, v$  и  $T, s$ .

Считать газ идеальным двухатомным с  $c_v=\text{const}$  и  $c_p=\text{const}$ .

Ответ:  $n=1,2$ ,  $p_2=180 \text{ бар}$ ,  $v_2=0,0107 \text{ м}^3/\text{кг}$ ;

$\ell=560 \text{ кДж/кг}$ ,  $\Delta s= -622 \text{ Дж/(кг}\cdot\text{K)}$ ,  $\Delta h=393 \text{ кДж/кг}$ .

5.18. В политропном процессе расширения двухатомного газа  $1/3$  сообщаемой газу теплоты пошла на увеличение его внутренней энергии. Определить показатель политропы этого процесса и изобразить процесс в  $p, v$ - и  $T, s$ - диаграммах.

Считать газ идеальным с постоянными теплоемкостями  $c_v$  и  $c_p$ .

Ответ:  $n=0,8$ .

5.19. В политропном процессе с  $\alpha=0,4$  ( $\alpha=du/\delta q$ ) состояние газа  $\text{N}_2$  изменяется от  $p_1=10 \text{ бар}$  и  $t_1=350 \text{ }^\circ\text{C}$  до  $p_2=1 \text{ бар}$ . Определить удельные теплоту и изменение энтропии газа в этом процессе.

Считать газ идеальным с постоянными теплоемкостями  $c_v$  и  $c_p$ .

Ответ:  $q=1515 \text{ кДж/кг}$ ,  $\Delta s=1,55 \text{ кДж/(кг}\cdot\text{K)}$

5.20. Воздух состоит из  $\text{N}_2$  и  $\text{O}_2$  и имеет объемную долю  $\tau_{\text{N}_2}=0,4$ . Определить изменение энтальпии этого воздуха при его политропном нагреве от  $10 \text{ }^\circ\text{C}$  до  $410 \text{ }^\circ\text{C}$ .

Считать газ идеальным с постоянными теплоемкостями  $c_v$  и  $c_p$ .

Ответ:  $\Delta h=382,9 \text{ кДж/кг}$ .

5.21. Газовая смесь, состоящая по объему из  $30 \%$  углекислого газа ( $\text{CO}_2$ ) и  $70 \%$  кислорода ( $\text{O}_2$ ), при температуре  $120 \text{ }^\circ\text{C}$  и давлении  $3 \text{ бар}$  занимает объем  $0,5 \text{ м}^3$ . Газ политропно с  $n=0,8$  расширяется, при этом его объем увеличивается в 3 раза. Считая газы идеальными с жесткими молекулами, определить количество теплоты, работу изменения объема, изменение внутренней энергии и энтропии процесса. Изобразить процесс в диаграммах  $p, v$  и  $T, s$ .

Ответ:  $Q=282 \text{ кДж}$ ,  $L=184 \text{ кДж}$ ,  $\Delta U=98 \text{ кДж}$ ,  $\Delta S=0,642 \text{ кДж/К}$ .

5.22. Двухатомный газ, имеющий теплоемкость  $c_v=0,65 \text{ кДж/(кг}\cdot\text{K)}$ , политропно переходит из состояния с  $t_1=17 \text{ }^\circ\text{C}$  и  $v_1=0,8 \text{ м}^3/\text{кг}$  в состояние с  $p_2=8 \text{ бар}$  и  $t_2=277 \text{ }^\circ\text{C}$ . Определить удельные изменение энтропии и теплоту процесса.

Считать газ идеальным с постоянными теплоемкостями  $c_v$  и  $c_p$ .

Ответ:  $\Delta s=26,4 \text{ Дж/(кг}\cdot\text{K)}$ ,  $q=10,72 \text{ кДж/кг}$ .

5.23. На каком из указанных в  $p, v$ - диаграмме процессов идеального газа (рис. 19) наибольшее повышение температуры и подвод теплоты?

Для ответа необходимо перестроить процессы в  $T, s$ - диаграмму.

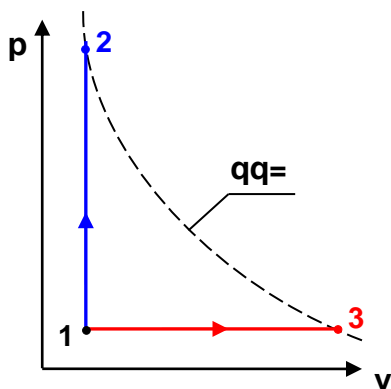


Рис. 19 К задаче 5.23

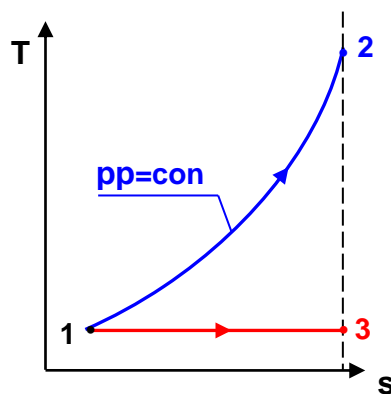


Рис. 20 К задаче 5.24

5.24. На каком из указанных на рис. 20 в  $T,s$ - диаграмме процессов идеального газа наибольшее изменение объема?

5.25. Перестроить циклы идеальных газов (рис. 21) из  $T,s$ - в  $p,v$ - диаграммы.

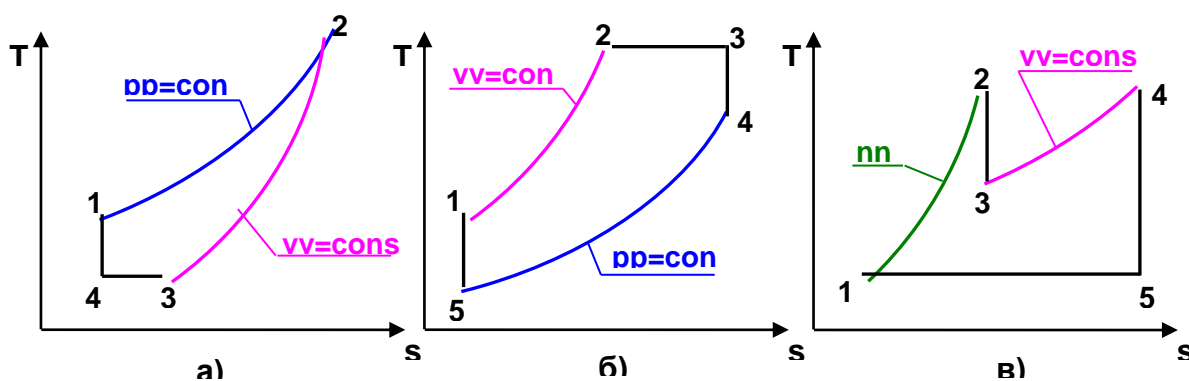


Рис. 21 К задаче 5.25

5.26. Перестроить из  $p,v$ - диаграммы в  $T,s$ - диаграмму процессы и циклы идеальных газов (рис. 22).

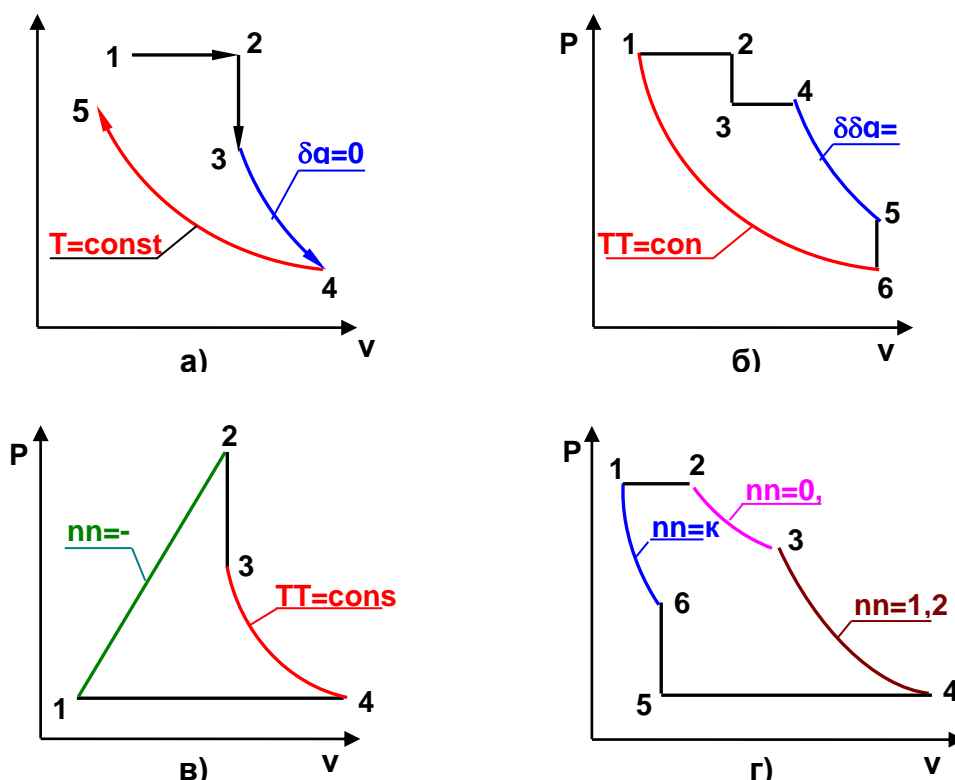


Рис. 22 К задаче 5.26

5.27. В диаграммах  $p, v$  и  $T, s$  изобразить последовательно процессы идеальных газов согласно заданному условию:

- 1-2 изобарный процесс с отводом теплоты;
- 2-3 политропный процесс сжатия при  $n=1,25$ ;
- 3-4 адиабатный процесс расширения;
- 4-5 изотермический процесс сжатия;
- 5-6 изохорный процесс с отводом теплом.

*Особенности расчета процессов идеальных газов при учете влияния температуры на их изобарную и изохорную теплоемкости*

В отличие от кинетической теории газов квантовая теория позволяет учесть колебательное движение атомов внутри молекул двух- и многоатомных газов. В соответствии с этой теорией молярная изохорная теплоемкость газа представляет функциональную зависимость от температуры. Уравнения изохорной и изобарной теплоемкостей идеальных газов с учетом влияния температуры на их значения имеют весьма сложный вид, поэтому значения этих теплоемкостей и производных от них энергетических функций состояния  $u$ ,  $h$ , полученные расчетным путем, сводятся в специальные справочные таблицы.

В этих таблицах кроме  $u$ ,  $h$  для идеальных газов приводятся значения относительных давлений  $\pi_0 = p/p_0$ , объемов  $\theta_0 = v/v_0$ , которые *используются только для адиабатных процессов* при нахождении параметров второй точки процесса без использования коэффициента Пуассона по соотношениям

$$\frac{p_2}{p_1} = \frac{\pi_{02}}{\pi_{01}}, \quad \text{или} \quad \frac{v_2}{v_1} = \frac{\theta_{02}}{\theta_{01}}. \quad (5.8)$$

Также в этих таблицах дается та часть удельной энтропии идеальных газов, которая зависит от температуры:

$$s_0 = \int_{T_0}^T \frac{c_p dT}{T}, \quad (5.9)$$

где  $T_0 = 0 \text{ K}$ .

Вся абсолютная величина удельной энтропии газа рассчитывается по выражению

$$s = s_0 - R \cdot \ln \frac{p}{p_0}, \quad (5.10)$$

где  $p_0$  принимается произвольно.

Пример расчета процесса идеальных газов с использованием таблиц.

Рассчитать в обратимом процессе 1-2-3 (рис. 23) идеального воздуха удельные теплоту и изменение энтропии, считая  $c_v$  и  $c_p$  зависящими от температуры. Процесс 1-2 – адиабатное сжатие воздуха от  $p_1=1$  бар и  $t_1=17^\circ\text{C}$  до  $p_2=10$  бар, 2-3 – при  $p_2=\text{const}$  от  $t_2$  до  $t_3=20^\circ\text{C}$ .

Решение

Используя таблицы термодинамических свойств воздуха, находим  $\pi_{01}$  по известной температуре  $t_1=17^\circ\text{C}$ . Определив  $\pi_{01}=1,2339$ , рассчитываем  $\pi_{02}$  по известному отношению давлений адиабатного процесса:

$$\pi_{02} = \pi_{01} \frac{p_2}{p_1} = 1,2339 \cdot 10 = 12,339$$

Используя  $\pi_{02}$ , определяем по таблицам температуру в конце адиабатного процесса  $t_2=283^\circ\text{C}$  (взято с точностью до  $1^\circ$ ).

Зная температуры во всех трех точках сложного процесса, определим по ним из таблиц необходимые для расчета энергетические параметры:

$$h_1=290,28 \text{ кДж/кг}, u_1=207,01 \text{ кДж/кг}, h_2=561,13 \text{ кДж/кг},$$

$$u_2=401,52 \text{ кДж/кг}, h_3=293,29 \text{ кДж/кг}, u_3=209,16 \text{ кДж/кг}.$$

Для адиабатного процесса 1-2 определим:

$$h_2-h_1= 561,13 - 290,28 = 270,85 \text{ кДж/кг},$$

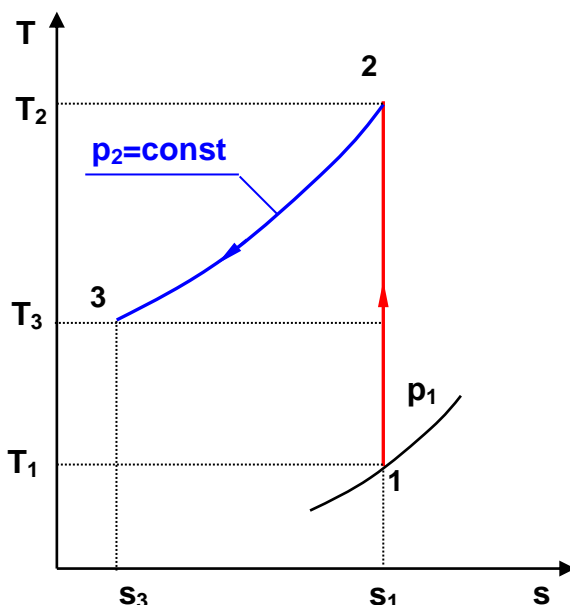


Рис. 23 К примеру расчета процесса с использованием таблиц термодинамических свойств идеальных газов

$$u_2-u_1= -l = 401,52 - 207,01 = 199,51 \text{ кДж/кг}.$$

В изобарном процессе 2-3 количество удельной теплоты рассчитывается как разность его удельных энтальпий:

$$q_{2-3}=h_3- h_2= 293,29 - 561,13 = -267,84 \text{ кДж/кг}.$$

Расчет изменения удельной энтропии в процессе 2-3 выполняется с использованием  $s_{02}=7,3298 \text{ кДж/(кг}\cdot\text{К)}$  и  $s_{03}=6,6789 \text{ кДж/(кг}\cdot\text{К)}$ , которые определяются по  $t_2$  и  $t_3$ :

$$s_3 - s_2 = s_{03} - s_{02} - R \cdot \ln \frac{p_2}{p_2} = s_{03} - s_{02} =$$

$$= 6,6789 - 7,3298 = -0,6509 \frac{\text{кДж}}{\text{кг}\cdot\text{К}}.$$

Изменение энтропии происходит только за счет изменения температуры, т.к. процесс 2-3 изобарный.

Для определения абсолютных значений энтропий необходимо задаться величиной  $p_0$ . Приняв  $p_0=1 \text{ бар}$ , рассчитаем  $s_1$ ,  $s_2$  и  $s_3$ :

$$s_1 = s_{01} - R \cdot \ln \frac{p_1}{p_0} = 6,6686 - \frac{8,314}{28,97} \cdot \ln \frac{1}{1} = 6,6686 \frac{\text{кДж}}{\text{кг}\cdot\text{К}};$$

$$s_2 = s_{02} - R \cdot \ln \frac{p_2}{p_0} = 7,3298 - \frac{8,314}{28,97} \cdot \ln \frac{10}{1} = 6,6689 \frac{\text{кДж}}{\text{кг}\cdot\text{К}}.$$

Так как в пределах погрешности расчетов  $s_1=s_2$ , то это подтверждает, что процесс 1-2 адиабатный.

$$s_3 = s_{03} - R \cdot \ln \frac{p_3}{p_0} = 6,6789 - \frac{8,314}{28,97} \cdot \ln \frac{10}{1} = 6,0181 \frac{\text{кДж}}{\text{кг} \cdot \text{К}}$$

Проверим ранее полученное значение разности энтропий  $s_3-s_2$  по разности абсолютных энтропий в этих точках:

$$s_3 - s_2 = 6,0181 - 6,6689 = - 0,6508 \frac{\text{кДж}}{\text{кг} \cdot \text{К}}$$

В этом случае сходимость результатов тоже очевидна.

5.28. Воздух с начальными параметрами  $p_1=5$  бар,  $t_1=280$  °С адиабатно расширяется до давления  $p_2=2$  бар. Пользуясь таблицами термодинамических свойств газов, определить конечные значения температуры и удельного объема, работу изменения объема.

Ответ:  $t_2=155$  °С,  $v_2=0,615$  м<sup>3</sup>/кг,  $\ell=92,6$  кДж/кг.

5.29. Воздух адиабатно расширяется от  $p_1=10$  бар и  $t_1=360$  °С до  $p_2=1$  бар. Используя таблицы зависимости термодинамических свойств газов от температуры, определить изменение энтальпии и внутренней энергии воздуха в этом процессе. Сравнить полученные результаты с результатами расчета этих же величин, считая теплоемкости газа  $c_v$  и  $c_p$  не зависящими от температуры.

Ответ:  $\Delta h = -309$  кДж/кг,  $\Delta u = -223$  кДж/кг;  
 $\delta(\Delta h) = 0,84$  % ( $\Delta h = -306,7$  кДж/кг);  
 $\delta(\Delta u) = 1,78$  % ( $\Delta u = -223$  кДж/кг).

5.30. Определить теплоту и изменение внутренней энергии воздуха, изобарно расширяющегося от  $t=20$  °С до двукратного увеличения объема. Расчеты выполнить двумя способами:

- считая теплоемкости воздуха  $c_v$  и  $c_p$  не зависящими от температуры,
- используя таблицы зависимости термодинамических свойств газов от температуры [12, 15].

Оценить погрешность расчетов искомым величин по способу (а) по отношению к способу (б).

Ответ: а)  $q=294,4$  кДж/кг,  $\Delta u=210,29$  кДж/кг;  
 б)  $q=299,16$  кДж/кг,  $\Delta u=215,1$  кДж/кг;  
 $\delta q=1,67$  %,  $\delta(\Delta u)=2,2$  %.

5.31. В баллоне постоянного объема двуокись углерода ( $\text{CO}_2$ ) нагревается от давления  $p_1=2$  бар и температуры  $t_1=10$  °С до давления  $p_1=4,05$  бар. Пользуясь таблицами, определить конечные параметры газа ( $t_2$ ,  $v_2$ ,  $u_2$ ,  $h_2$ ) и количество затраченной удельной теплоты в этом процессе.

Ответ:  $t_2=300$  °С,  $v_2=0,268$  м<sup>3</sup>/кг,  $u_2=369,08$  кДж/кг,  
 $h_2=447,36$  кДж/кг,  $q=249,26$  кДж/кг.

5.32. В конвективных газоходах парогенератора продукты сгорания топлива изобарно охлаждаются от  $t_1=1050$  °С до  $t_2=140$  °С. Состав газов задан по объему:  $r_{\text{CO}_2}=0,15$ ,  $r_{\text{O}_2}=0,06$ ,  $r_{\text{N}_2}=0,79$ .

Определить количество теплоты, отдаваемое 1 кг газов. При расчете использовать данные таблиц С.Л. Ривкина.

Примечание: в таблицах смотреть азот атмосферный.

Указание:

при  $p = \text{const}$  энтальпии конечного и начального состояний смеси определяются

$$h_{\text{см}} = \sum_{i=1}^{i=n} g_i h_i$$

выражением

где  $g_i$  – массовые доли каждого компонента газовой смеси.

Ответ:  $q = -1032$  кДж/кг.

5.33. Кислород с начальными параметрами  $p_1 = 1$  МПа и  $t_1 = 400$  °С расширяется адиабатно до давления  $p_2 = 0,2$  МПа. Пользуясь таблицами термодинамических свойств газов, определить конечную температуру, начальный и конечный удельные объемы, удельную работу изменения объема и изменение энтальпии в процессе.

Ответ:  $t_2 = 167$  °С,  $v_1 = 0,175$  м<sup>3</sup>/кг,  $v_2 = 0,572$  м<sup>3</sup>/кг;

$\ell = 169,8$  кДж/кг,  $h_2 - h_1 = -230,4$  кДж/кг.

### Контрольные вопросы

1. Какая величина характеризует закономерность энергетического взаимодействия газа и внешней среды в политропном процессе?
2. Какая величина характеризует закономерность изменения термических параметров в политропном процессе идеального газа?
3. Какая величина характеризует закономерность политропы идеального газа в T,s- диаграмме?
4. Изобразите в диаграммах p,v и T,s политропные процессы расширения идеального газа с показателем политропы  $1 < n < k$ , оцените теплоемкость этого процесса.
5. Какие величины используются вместо коэффициента Пуассона для определения температуры второй точки по двум известным параметрам первой точки и давлению или объему второй точки в обратимых адиабатных процессах идеальных газов при учете влияния температуры на теплоемкости  $c_v$  и  $c_p$  ?

## ПРАКТИЧЕСКОЕ ЗАНЯТИЕ №6

### Водяной пар. Термодинамические процессы водяного пара.

#### H-S диаграмма водяного пара. Решение задач.

Термодинамические свойства воды и водяного пара не могут быть описаны удобными для использования универсальными уравнениями, аналогичными уравнениям для идеальных газов. В инженерной практике широкое распространение получили таблицы термодинамических свойств веществ и построенные на их базе диаграммы зависимостей параметров состояния. В этих таблицах зависимость термических параметров состояния, как правило, определяется экспериментально. На базе этих зависимостей с использованием дифференциальных уравнений термодинамики и ряда опытных величин ( $q$ ,  $c_p$  и т.п.) рассчитывают значения энергетических параметров (функций состояния)  $h$ ,  $u$ ,  $s$ .

Для иллюстрации процессов изменения состояния воды и водяного пара и паровых циклов широко используются p,v-, T,s- и h,s- диаграммы (рис. 6.1, 6.2, 6.3). Они дают большой объем информации, позволяют наглядно судить о фазовых состояниях воды, особенностях ее процессов и упрощают определение параметров воды в этих процессах.

На рис. 24 представлены в p,v- диаграмме области фазовых состояний и основные процессы для жидкой и паровой фаз воды:

- между вертикальной изотермой 0 °С в области жидкости и линией состояния насыщения жидкости  $x=0$  находится область жидкой фазы воды;
- выше линии состояния сухого насыщенного пара  $x=1$  находится область перегретого пара;
- между линиями  $x=0$  и  $x=1$  находится область влажного насыщенного пара;
- докритическая изотерма 1-2-3-4, в области жидкости (1-2) близка к вертикальной прямой с незначительным смещением влево, в области влажного пара (2-3) совпадает с

изобарой насыщения, в области перегретого пара (3-4) представляет кривую выпуклостью вниз;

- критическая изотерма  $t_{кр}$  имеет точку перегиба в критической точке;
- сверхкритическая изотерма  $t > t_{кр}$  также имеет точку перегиба, которая при больших значениях температуры пропадает;
- линии постоянных энтропий ( $s=const$ ) представляют собой кривые выпуклостью вниз, причем линии  $s < s_{кр}$  пересекают только линию  $x=0$ , а линии  $s > s_{кр}$  пересекают только линию  $x=1$ ;
- линии  $x=const$  соответствуют соотношению отрезков:

$$x = \frac{V_x - V'}{V'' - V'}$$

дельный объем жидкости сильно отличается от удельного объема сухого насыщенного пара, поэтому линия  $x=0$  более крутая, чем линия  $x=1$ .

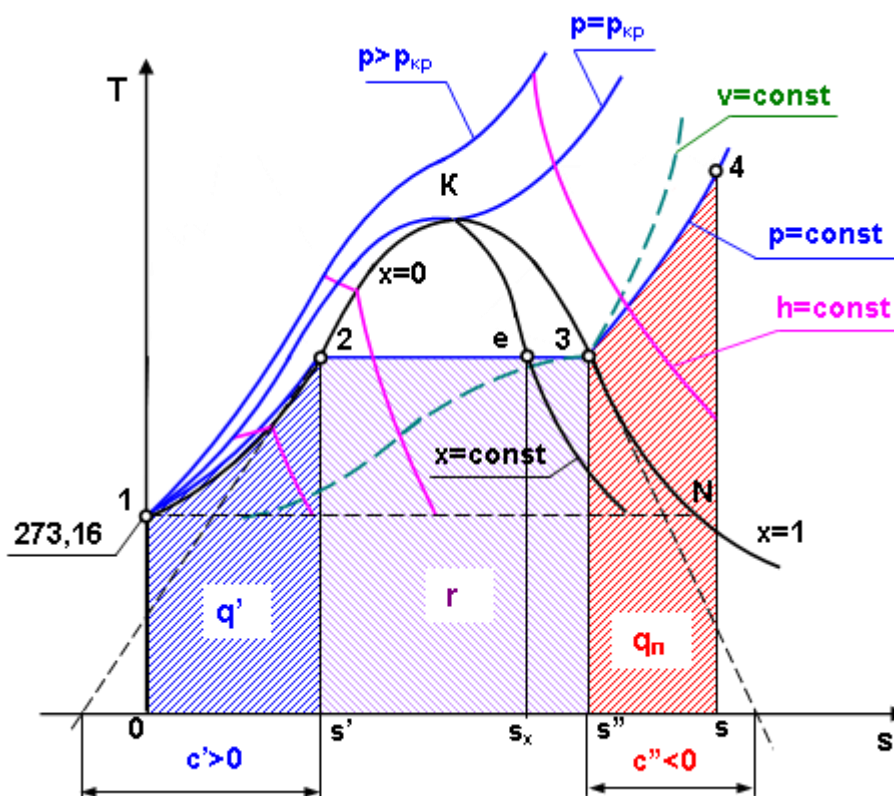


Рис. 24 Диаграмма T,s для воды и водяного пара

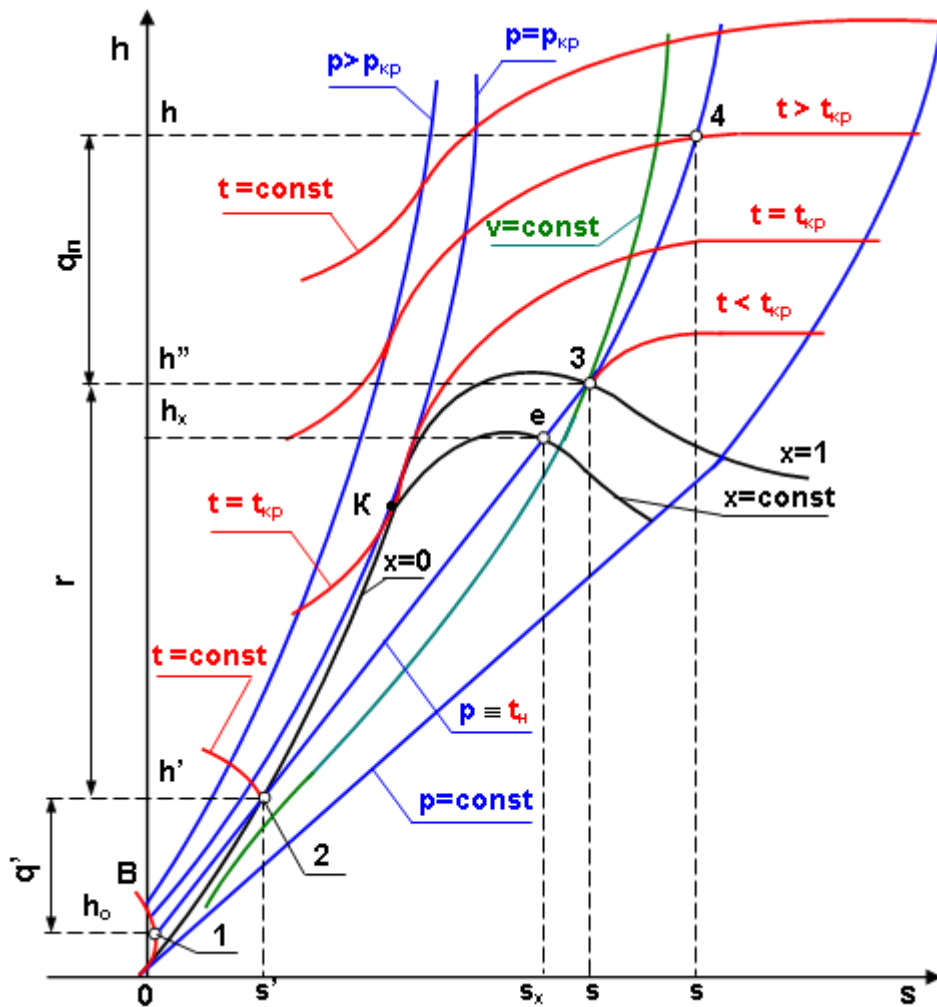


Рис. 25 Диаграмма  $h,s$  для воды и водяного пара

В тепловой диаграмме  $T,s$  (рис. 25) показаны:

- линия  $x=0$  начинается в тройной точке жидкости (точка 1,  $T_0=273,16$  К,  $s_1'=0$ );
- область жидкой фазы находится выше линии  $x=0$ ;
- точка N соответствует сухому насыщенному пару тройной точки воды;
- горизонтальная прямая 1-N, ниже которой и ограниченной справа линией  $x=1$  находится зона сублимации (смесь твердой фазы воды и пара);
- область перегретого пара находится выше линии  $x=1$ .

Видимой зоны перехода от области жидкой фазы к области пара выше критической точки K нет.

Изобара докритического давления в  $T,s$ - диаграмме представляет собой сложную кривую 1-2-3-4. Она состоит из трех характерных частей: 1-2 – в области жидкости – это кривая выпуклостью вниз, близко располагающаяся к линии  $x=0$ ; 2-3 – в области влажного насыщенного пара, она совпадает с изотермой насыщения; 3-4 – в области перегретого пара – это кривая выпуклостью вниз, представляющая собой логарифмическую кривую с переменной логарифмикой.

Площадь под изобарой 1-2 (нагрев жидкости) соответствует удельной теплоте жидкости  $q'$ , под изобарой 2-3 (парообразование) – удельной теплоте парообразования  $r$ , под 3-4 (перегрев пара) – удельной теплоте перегрева  $q_n$ .

Изобара критического давления ( $p=p_{кр}$ ) в критической точке K имеет перегиб, здесь касательная к ней есть горизонтальная прямая. Изобары сверхкритического давления представляют собой непрерывно повышающиеся кривые с точками перегиба, в которых

касательные имеют минимальный наклон. Этим точкам соответствуют максимальные значения изобарной теплоемкости.

Изохоры с  $v > v_{кр}$  пересекают только правую пограничную кривую  $x=1$  (рис.24). В области перегретого пара они представляют собой вогнутые кривые (круче изобар), а в области влажного пара – кривые двойкой кривизны: выпуклые – при больших степенях сухости и вогнутые – при малых степенях сухости.

Изохоры с  $v < v_{кр}$  пересекают только нижнюю пограничную кривую  $x=0$  и размещаются в области жидкости при высоких давлениях и температурах, а в области влажного насыщенного пара – при низких давлениях и температурах.

На рис. 24 показаны линии постоянных энтальпий  $h=const$ . В области перегретого пара изоэнтальпа представляет собой плавную кривую с отрицательным тангенсом угла наклона к ней. Изоэнтальпы, переходящие из области влажного пара в область жидкости, имеют ярко выраженную точку излома на линии  $x=0$ .

На рис. 24 в точках 2 и 3 проведены касательные к пограничным кривым  $x=0$  и  $x=1$ . Подкасательные  $c'$  и  $c''$  представляют собой теплоемкости жидкости и сухого насыщенного пара на пограничных кривых  $x=0$  и  $x=1$ .

В инженерной практике наиболее широкое применение находит  $h,s$ - диаграмма для воды и водяного пара. На рис. 25 приведен общий вид такой диаграммы.

При повышении давления и температуры энтальпия  $h'$  и энтропия  $s'$  жидкости на линии насыщения растут до критической точки, поэтому линия  $x=0$  представляет собой вогнутую кривую ОК.

Пограничная кривая сухого насыщенного пара  $x=1$  имеет вид кривой KN. Максимальное значение энтальпии (ординаты) этой кривой  $h''_{max}$  достигается при давлении около 30 бар. Следует обратить внимание на то, что критическая точка находится левее и ниже точки максимальной энтальпии  $h''_{max}$ , а вся пограничная кривая  $x=1$  располагается выше горизонтали, проведенной из критической точки.

Все изобары в области жидкости выходят из изотермы  $0\text{ }^{\circ}\text{C}$ , имеющей форму кривой ОВ выпуклостью вверх.

Докритические изобары жидкости представляют собой вогнутые кривые, идущие слева направо, поскольку процесс нагрева жидкости 1-2 сопровождается возрастанием энтропии и повышением температуры.

В процессе изобарного парообразования 2-3 температура остается постоянной, и участок изобары 2-3 представляет собой прямую, тангенс угла наклона которой определяется температурой насыщения  $T_n$ . На пограничных кривых ( $x=0$  и  $x=1$ ) вода имеет одну и ту же температуру, следовательно, прямая 2-3 является касательной к кривым 1-2 и 3-4.

С повышением давления увеличивается температура насыщения, и в области влажного насыщенного пара изобары (изотермы) веерообразно расходятся.

Изобары парообразования 2-3 плавно переходят в изобары перегретого пара 3-4, представляющие собой вогнутые расходящиеся кривые, при большой степени перегрева приближающиеся к кривым логарифмического характера (как для газов).

Критическая изобара проходит через критическую точку К и представляет собой вогнутую кривую. Изобары сверхкритического давления имеют такой же вид.

Изотермы в  $h,s$ - диаграмме представляют собой сложные линии. Докритические изотермы жидкости при низких температурах начиная от  $0\text{ }^{\circ}\text{C}$ , с повышением давления поднимаются вверх (кривые выпуклостью вверх); при высоких температурах – кривая выпуклостью вниз.

В области влажного пара докритические изотермы совпадают с изобарами. В области перегретого пара изотермы имеют вид кривых выпуклостью вверх, идущих слева направо. При температурах, близких к критической, в области высоких давлений изотермы перегретого пара круто идут вверх, имея большую кривизну. В областях низких

давлений все изотермы перегретого пара приближаются к горизонтальным прямым (свойства пара близки к свойствам идеального газа).

Сверхкритические изотермы имеют точку перегиба, а у критической изотермы эта точка соответствует критической точке.

Изохоры в  $h,s$ - диаграмме представляют собой плавные кривые, круче изобар. Они пересекают только одну пограничную кривую ( $x=0$  или  $x=1$ ), в зависимости от того, удельный объем их меньше или больше удельного объема воды в критической точке.

На рис. 6.3 выделена изобара 1-2-3-4 и показаны в виде отрезков значения энтальпии, энтропии и их разности для характерных состояний воды и пара на этой изобаре. Точке 1 соответствует состояние жидкости при  $t=0$  °С данной изобары.

Определение параметров воды и водяного пара с использованием таблиц термодинамических свойств выполняется по трем таблицам: таблицам свойств воды и пара в состоянии насыщения как функций температуры и давления и таблице свойств воды и перегретого пара.

В качестве определяющих параметров может выступать любой из параметров состояния насыщения воды и пара:  $p_n, t_n, v', h', s', v'', h'', s''$ .

В качестве определяющих параметров (кроме  $p$  и  $t$ ) может выступать любая пара параметров:  $p, t, v, h, s$ .

При выборе определения параметров воды необходимо определить ее фазовое состояние. Определение фазового состояния воды и водяного пара с использованием таблиц выполняется по следующему алгоритму:

**1) при  $p = \text{const}$ :**

$t < t_n$  – жидкая фаза воды, табл. 3;

$t > t_n$  – перегретый пар, табл. 3;

$t = t_n$  – необходим 3-й параметр,

например при заданном  $h$ :

$h = h'$  - кипящая вода,  $x=0$ , табл. 1, 2;

$h = h''$  – сухой насыщенный пар,

$h' < h < h''$  – влажный пар,

$h < h'$  – жидкая фаза воды,

$h > h''$  – перегретый пар,

$h' < h < h''$  – влажный пар.

**2) при  $t = \text{const}$ :**

$p < p_n$  – перегретый пар,

$p > p_n$  – жидкая фаза воды,

$p = p_n$  – аналогично  $t = t_n$  при  $p=\text{const}$  с ориентацией на  $h, v, s$ .

Удельная внутренняя энергия в таблицах отсутствует, ее рассчитывают через энтальпию, давление и удельный объем по выражению

$$u = h - pv$$

*В данном выражении необходимо привести к единой размерности все величины, для этого при использовании удельной энтальпии в кДж/кг давление подставляют в кПа, тогда и удельная внутренняя энергия будет иметь размерность кДж/кг.*

Расчет удельного объема, энтальпии, энтропии и внутренней энергии для влажного насыщенного водяного пара выполняется по формулам

$$v_x = v' + x(v'' - v') ; \tag{6.1}$$

$$h_x = h' + x(h'' - h') = h' + xh'' ; \tag{6.2}$$

$$s_x = s' + x(s'' - s') ; \tag{6.3}$$

$$u_x = u' + x(u'' - u') = h_x - pv_x . \tag{6.4}$$

Используя параметры влажного насыщенного пара, можно рассчитать его степень сухости:

$$x = \frac{v_x - v'}{v'' - v'} = \frac{h_x - h'}{r} = \frac{s_x - s'}{s'' - s'} = \frac{u_x - u'}{u'' - u'} \quad (6.5)$$

Расчет термодинамических процессов воды и водяного пара выполняется на основании первого закона термодинамики с использованием таблиц и диаграмм термодинамических свойств  $H_2O$ . Для расчетов используются следующие выражения:

$$\delta q = du + pdv, \quad \delta q = dh - vdp, \quad \delta q = Tds, \quad \delta \ell = pdv.$$

Эти выражения приводятся к следующему виду в конкретных процессах:

*Изохорный процесс* –  $v = \text{const}$ ,

$$\delta \ell = pdv = 0, \quad dv = 0, \quad \delta q_v = u_2 - u_1 = h_2 - h_1 - v(p_2 - p_1).$$

*Изобарный процесс* –  $p = \text{const}$ ,

$$\ell_p = \int_{v_1}^{v_2} pdv = p(v_2 - v_1), \quad q_p = h_2 - h_1,$$

$$u_2 - u_1 = h_2 - h_1 - p(v_2 - v_1) = q_p - \ell_p.$$

*Изотермический процесс* –  $T = \text{const}$ ,

$$q_T = T(s_2 - s_1), \quad u_2 - u_1 = h_2 - h_1 - (p_2v_2 - p_1v_1),$$

$$\ell_T = q_T - (u_2 - u_1).$$

*Адиабатный процесс* –  $q = 0$  ( $s = \text{const}$ ),

$$\ell_s = u_1 - u_2 = (h_1 - h_2) - (p_1v_1 - p_2v_2).$$

### Задачи к ПЗ 6

Пример решения задачи:

6.1. Пользуясь таблицами теплофизических свойств воды и водяного пара, определить фазовое состояние воды, ее температуру и удельные энергетические параметры: энтальпию, энтропию и внутреннюю энергию, если  $p = 5$  бар,  $v = 0,2$  м<sup>3</sup>/кг.

Решение

Первоначально определяют фазовое состояние  $H_2O$ :

при  $p = 5$  бар находят удельные объемы для жидкости в состоянии насыщения  $v' = 0,0010928$  м<sup>3</sup>/кг и для сухого насыщенного пара  $v'' = 0,37482$  м<sup>3</sup>/кг, а затем их сравнивают с заданным объемом  $v = 0,2$  м<sup>3</sup>/кг. Поскольку  $v' < v < v''$ , то это состояние влажного насыщенного пара, для которого температура пара равна температуре насыщения  $t_n = 151,85$  °С.

Остальные параметры определяют с использованием степени сухости, которую рассчитывают по заданному удельному объему:

$$x = \frac{v - v'}{v'' - v'} = \frac{0,2 - 0,0010928}{0,37482 - 0,0010928} = 0,532;$$

$$h = h' + x \cdot r = 640,1 + 0,532 \cdot 2108,4 = 1761,2 \text{ кДж/кг};$$

$$s = s' + x \cdot (s'' - s') = 1,8604 + 0,532 \cdot 4,9611 = 4,4997 \text{ кДж/(кг·К)}.$$

Для определения удельной внутренней энергии в ее расчетное выражение давление подставляют в кПа, а удельную энтальпию – в кДж/кг:

$$u = h - pv = 1761,2 - 500 \cdot 0,2 = 1661,2 \text{ кДж/кг}.$$

6.2. Давление насыщенного водяного пара  $p_n=7,5$  кПа. Определить параметры сухого насыщенного пара и воды в состоянии насыщения (кипения) по таблицам теплофизических свойств воды и водяного пара ( $t, v, h, v, s, u$ ).

Ответ:

для воды:  $t=40,32$  °С,  $v=0,0010079$  м<sup>3</sup>/кг,

$h=168,77$  кДж/кг,  $s=0,5763$  кДж/(кг·К),  $u=168,76$  кДж/кг;

для пара:  $t=40,32$  °С,  $v=19,241$  м<sup>3</sup>/кг,

$h=2574,5$  кДж/кг,  $s=8,2517$  кДж/(кг·К),  $u=2430,2$  кДж/кг.

6.3. Определить температуру, давление и удельную внутреннюю энергию жидкой фазы воды в состоянии насыщения при  $h=500$  кДж/кг.

Ответ:  $t=119$  °С,  $p=1,9233$  бар,  $u=499$  кДж/кг.

6.4. Определить удельную внутреннюю энергию сухого насыщенного водяного пара при давлении 100 бар.

Ответ:  $u=2544,4$  кДж/кг.

6.5. Определить температуру и значения удельных величин: объема, энтропии и внутренней энергии водяного пара при давлении  $p=10$  бар и степени сухости  $x=0,9$ .

Ответ:  $t=179,88$  °С,  $v=0,176$  м<sup>3</sup>/кг,  $s=6,14$  кДж/(кг·К),  $u=2400$  кДж/кг.

6.6. Водяной пар при температуре 200 °С имеет удельную энтальпию 1200 кДж/кг. Определить давление, удельные объем и энтропию пара.

Ответ:  $p=15,55$  бар;  $v=0,0237$  м<sup>3</sup>/кг,  $s=3,07$  кДж/(кг·К).

6.7. Определить по таблицам [13] фазовое состояние и параметры H<sub>2</sub>O ( $v, t, h, s$ ) при давлении 10 бар и удельной внутренней энергии  $u=2000$  кДж/кг.

Ответ: влажный насыщенный пар,

$t=179,88$  °С,  $v=0,132$  м<sup>3</sup>/кг,  $h=2132$  кДж/кг,  $s=5,16$  кДж/(кг·К).

6.8. По заданным удельным энтальпии и энтропии:  $h=2538$  кДж/кг,  $s=6,325$  кДж/(кг·К), определите по таблицам [13] фазовое состояние H<sub>2</sub>O, его давление и температуру. Объясните метод рационального поиска параметров  $p$  и  $t$ .

Ответ: влажный насыщенный пар,  $p=5$  бар,  $t=151,85$  °С.

6.9. В 1 м<sup>3</sup> H<sub>2</sub>O при давлении 5 бар 1/20 часть объема занята жидкостью в состоянии насыщения, а 19/20 объема – сухим насыщенным паром. Определить массу сухого насыщенного пара, и жидкости в этой смеси и внутреннюю энергию 1 м<sup>3</sup> этого влажного насыщенного пара.

Ответ:  $m_{ж.с.н.}=45,75$  кг,  $m_{с.н.п.}=2,51$  кг,  $U=35747$  кДж.

6.10. В сосуде вместимостью 5 м<sup>3</sup> находится влажный насыщенный водяной пар при давлении 150 бар и степени сухости 0,3.

Определить массу влажного пара в сосуде и объем, занимаемый насыщенной жидкостью и сухим насыщенным паром.

Ответ:  $m=1,17$  т,  $V'=1,36$  м<sup>3</sup>,  $V''=3,64$  м<sup>3</sup>.

6.11. Определить по таблицам [13] удельный объем и плотность водяного пара при давлении 5 бар и температуре 230 °С.

Ответ:  $v=0,4545$  м<sup>3</sup>/кг,  $\rho=2,2$  кг/м<sup>3</sup>.

6.12. Определить по таблицам [13] удельную внутреннюю энергию водяного пара при давлении 1 бар и температуре 117 °С.

Ответ:  $u=2533$  кДж/кг.

6.13. Определить по таблицам [13] удельную внутреннюю энергию водяного пара при давлении 5 бар и энтальпии  $h=2970$  кДж/кг.

Ответ:  $u=2730$  кДж/кг.

6.14. Определить по таблицам [13] удельную внутреннюю энергию водяного пара при давлении 4,3 бар и температуре 250 °С.

Ответ:  $u=2722$  кДж/кг.

6.15. При температуре 280 °С внутренняя энергия водяного пара равна 2750 кДж/кг. Определить по таблицам [13] фазовое состояние  $H_2O$  и его давление. Объяснить способ рационального поиска давления.

Ответ: перегретый пар,  $p=15$  бар.

6.16. При давлении 4 бар известна удельная внутренняя энергия  $H_2O$   $u=2598,12$  кДж/кг. Определить по таблицам [13] фазовое состояние  $H_2O$  и его параметры:  $t$ ,  $h$ ,  $s$ . Объяснить метод рационального поиска этих параметров.

Ответ: перегретый пар,  $t=170$  °С,  $h=2796,8$  кДж/кг,  $s=7,0322$  кДж/(кг·К).

6.17. Определить по таблицам [13] фазовое состояние  $H_2O$ , его давление и температуру, если известны удельные энтальпия и энтропия пара  $h=2925$  кДж/кг,  $s=6,21$  кДж/(кг·К). Объяснить метод рационального поиска параметров.

Ответ: перегретый пар,  $p=50$  бар,  $t=300$  °С.

6.18. Водяной пар с  $t_1=350$  °С и  $p_1=8$  бар охлаждается при постоянном объеме. В конечном состоянии  $h_2=2400$  кДж/кг. Рассчитать данный процесс, т.е. определить  $q$ ,  $\ell$ ,  $\Delta u$ ,  $\Delta s$ ,  $\Delta h$ . Схематично изобразить процесс в  $p,v$ -,  $T,s$ - и  $h,s$ - диаграммах с нанесением на них пограничных линий  $x=0$  и  $x=1$ .

Ответ:  $q=\Delta u=-632,2$  кДж/кг,  $\ell=0$ ,  $\Delta s=-1,35$  кДж/(кг·К),

$\Delta h=-760$  кДж/кг.

6.19. В барабане парового котла емкостью  $15 \text{ м}^3$  находятся в термодинамическом равновесии вода и пар общей массой 7000 кг при давлении 10 бар. Какое количество теплоты необходимо подвести к этой пароводяной смеси, для того чтобы давление в котле повысилось до 60 бар? Процесс считать изохорным.

Изобразить процесс в  $p,v$ -,  $T,s$ - и  $h,s$ - диаграммах .

Ответ:  $Q=3300$  МДж.

6.20. От 1 кг сухого насыщенного водяного пара, имевшего давление 15 бар при постоянном объеме, отводится теплота. Конечная температура пара составляет 90 °С. Определить количество отведенной теплоты, изобразить процесс в  $p,v$ -,  $T,s$ - и  $h,s$ - диаграммах.

Ответ:  $q=-2100$  кДж/кг.

6.21. В жестком замкнутом сосуде находится водяной пар с параметрами  $p_1=35$  бар и  $t_1=450$  °С. При теплообмене сосуда с окружающей средой давление пара падает до  $p_2=5$  бар. Определить количество отведенной удельной (на 1 кг пара) теплоты. Изобразить процесс в диаграммах  $p,v$ ,  $T,s$ , и  $h,s$ .

Ответ:  $q=-1909$  кДж/кг.

6.22. Один кубический метр жесткой емкости при давлении 5 бар заполнен на одну

четверть объема водой в состоянии насыщения, а на другие  $\frac{3}{4}V$  – сухим насыщенным паром. Определить, какое минимальное количество теплоты необходимо подвести к емкости, чтобы в ней находился только пар. Изобразить процесс в  $p,v$ - диаграмме и определить давление и температуру пара в конце этого процесса.

Ответ:  $Q=359,9$  МДж,  $p=2,16$  МПа,  $t=372,2$  °С.

6.23. 1 кг воды с давлением 10 бар и температурой 100 °С нагревается при постоянном давлении до температуры 300 °С.

Определить удельные величины теплоты, которые идут:

а) на нагрев жидкой фазы воды от 100 °С до состояния насыщения,

б) процесс парообразования,

в) процесс перегрева пара.

Определить также степень перегрева пара  $\Delta t_{\text{п}} = t - t_{\text{н}}$ .

Ответ: а)  $q' = 342,9$  кДж/кг; б)  $r = 2014,4$  кДж/кг; в)  $q_{\text{п}} = 274,3$  кДж/кг;  
 $\Delta t_{\text{п}} = 120,12$  К.

6.24. 1 кг водяного пара переходит при постоянном давлении из состояния с  $p_1 = 5$  бар и  $s_1 = 6$  кДж/(кг·К) в состояние с  $t_2 = 200$  °С. Рассчитать данный процесс, т.е. определить  $q$ ,  $\ell$ ,  $\Delta u$ ,  $\Delta s$ ,  $\Delta h$ . Схематично изобразить процесс в  $p,v$ -,  $T,s$ - и  $h,s$ - диаграммах с нанесением на них пограничных линий  $x=0$  и  $x=1$ .

Ответ:  $q = 461$  кДж/кг,  $\ell = 56$  кДж/кг,  $\Delta u = 405$  кДж/кг,  
 $\Delta s = 1,06$  кДж/(кг·К),  $\Delta h = q = 461$  кДж/кг.

6.25. Водяной пар с  $p_1 = 100$  бар и  $x_1 = 0,85$  изобарно нагревается до температуры выше температуры насыщения на 150 °С. Определить удельные работу изменения объема  $\ell$  и изменение внутренней энергии  $\Delta u$  этого процесса.

Ответ:  $\ell = 149$  кДж/кг,  $\Delta u = 608$  кДж/кг.

6.26. К 1 кг воды с начальными параметрами  $p_1 = 10$  бар и  $t_1 = 50$  °С при постоянном давлении подводится 2000 кДж/кг теплоты. Определить конечную температуру  $H_2O$  и удельную работу изменения объема. Изобразить процесс в  $p,v$ -,  $T,s$ - и  $h,s$ - диаграммах.

Ответ:  $t_2 = 179,88$  °С,  $x_2 = 0,718$ ,  $\ell = 139$  кДж/кг.

6.27. 1 кг водяного пара с начальными параметрами  $p_1 = 5$  бар и  $h_1 = 1840$  кДж/кг при постоянном давлении получает 710 кДж/кг теплоты. Определить параметры пара в конце процесса:  $t_2$ ,  $v_2$ ,  $h_2$ ,  $s_2$ , и изменение его удельной внутренней энергии.

Ответ:  $t_2 = 151,85$  °С,  $v_2 = 0,34$  м<sup>3</sup>/кг,  $h_2 = 2550$  кДж/кг,  
 $s_2 = 6,354$  кДж/(кг·К),  $\Delta u = 647$  кДж/кг.

6.28. 0,2 м<sup>3</sup> водяного пара с начальными параметрами  $p_1 = 60$  бар и  $t_1 = 430$  °С изобарно сжимается до уменьшения объема в 5 раз. Определить конечное фазовое состояние  $H_2O$  и количество теплоты данного процесса. Изобразить процесс в  $p,v$ -,  $T,s$ - и  $h,s$ - диаграммах.

Ответ: влажный насыщенный пар с  $x_2 = 0,28$ ,  $Q = -6,36$  МДж.

6.29. Водяной пар с начальными параметрами  $p_1 = 1,5$  МПа и  $s_1 = 6$  кДж/(кг·К) изотермически расширяется до достижения давления  $p_2 = 0,9$  бар. Рассчитать данный процесс,

т.е. определить  $q$ ,  $\Delta u$ ,  $\ell$ ,  $\Delta s$ ,  $\Delta h$ . Схематично изобразить процесс в  $p,v$ -,  $T,s$ - и  $h,s$ - диаграммах с нанесением на них пограничных линий  $x=0$  и  $x=1$ .

Ответ:  $q=886,3$  кДж/кг,  $\Delta u=251,5$  кДж/кг,  $\ell=634,8$  кДж/кг,  
 $\Delta s=1,88$  кДж/(кг·К),  $\Delta h=291$  кДж/кг.

6.30. Определить удельные количество теплоты и изменение внутренней энергии водяного пара при его изотермическом расширении от  $p_1=10$  бар и  $h_1=2500$  кДж/кг до  $v_2=2$  м<sup>3</sup>/кг.

Ответ:  $q=806$  кДж/кг,  $\Delta u=304$  кДж/кг.

6.31. Водяной пар с начальными параметрами  $p_1=10$  бар и  $x=0,9$  изотермически расширяется до конечного давления  $p_2=2$  бар. Определить удельные работу изменения объема, теплоту и изменение внутренней энергии пара в данном процессе. Схематично изобразить процесс в  $p,v$ -,  $T,s$ - и  $h,s$ - диаграммах с нанесением на них пограничных линий  $x=0$  и  $x=1$ .

Ответ:  $\ell=358$  кДж/кг,  $q=580$  кДж/кг,  $\Delta u=222$  кДж/кг.

6.32. От 1 кг водяного пара при  $p_1=1$  бар и  $t_1=150$  °С при постоянной температуре отводится 1500 кДж/кг теплоты. Определить конечное давление и работу изменения объема пара в данном процессе.

Схематично изобразить процесс в  $p,v$ -,  $T,s$ - и  $h,s$ - диаграммах с нанесением на них пограничных линий  $x=0$  и  $x=1$ .

Ответ:  $p_2=4,76$  бар;  $x_2=0,446$ ;  $\ell=-408$  кДж/кг.

6.33. Водяной пар из состояния с  $p_1=2,5$  МПа и  $t_1=300$  °С адиабатно переходит в состояние с  $h_2=2600$  кДж/кг.

Рассчитать данный процесс, т.е. определить  $q$ ,  $\ell$ ,  $\Delta u$ ,  $\Delta s$ ,  $\Delta h$ . Схематично изобразить процесс в  $p,v$ -,  $T,s$ - и  $h,s$ - диаграммах с нанесением на них пограничных линий  $x=0$  и  $x=1$ .

Ответ:  $q=0$ ,  $\ell=-\Delta u=336,7$  кДж/кг,  $\Delta s=0$ ,  $\Delta h=-409$  кДж/кг.

6.34. В цилиндре с поршнем пароводяная смесь с начальными параметрами  $p_1=2$  бар,  $x_1=0,1$  сжимается адиабатно до давления  $p_2=30$  бар. Определить конечное фазовое состояние  $H_2O$  и удельную работу изменения объема.

Ответ: жидкость,  $\ell=-32,9$  кДж/кг.

6.35. Водяной пар с начальными параметрами  $p_1=30$  бар и  $t_1=300$  °С адиабатно расширяется до давления  $p_2=0,5$  бар. Определить конечные параметры пара:  $t_2$ ,  $v_2$ ,  $h_2$ , удельные работу изменения объема и изменение энтальпии в этом процессе. Схематично изобразить процесс в  $p,v$ -,  $T,s$ - и  $h,s$ - диаграммах с нанесением на них пограничных линий  $x=0$  и  $x=1$ .

Ответ:  $x_2=0,838$ ,  $t_2=81,35$  °С,  $v_2=2,7$  м<sup>3</sup>/кг,  $h_2=2272$  кДж/кг;  
 $\ell=613,5$  кДж/кг,  $\Delta h=-722$  кДж/кг.

6.36. 1 кг водяного пара с начальными параметрами  $p_1=5$  бар и  $x_1=0,88$  адиабатно сжимается до состояния сухого насыщенного пара. Определить конечное давление, температуру и удельную внутреннюю энергию пара.

Ответ:  $p_2=27,5$  бар;  $t_2=229$  °С;  $u_2=2600$  кДж/кг.

6.37. Водяной пар с начальными параметрами  $p_1=15$  бар и удельным объемом  $v_1=0,2$  м<sup>3</sup>/кг адиабатно расширяется до достижения значения удельной внутренней энергии

$u_2=2464,8$  кДж/кг. Определить термические параметры  $H_2O$  в конечном состоянии процесса:  $p_2$ ,  $t_2$ ,  $v_2$ , и объяснить кратчайший метод их поиска по таблицам.

Ответ:  $p_2=100$  кПа,  $t_2=99,64$  °С,  $v_2=1,66$  м<sup>3</sup>/кг.

6.38. Водяной пар при давлении 20 бар и степени сухости 0,8 сперва нагревается при постоянном давлении до температуры 420 °С, а затем при постоянной температуре расширяется до давления 1 бар. Изобразить этот процесс в  $p,v$ -,  $T,s$ - и  $h,s$ - диаграммах и определить его удельные теплоту, работу и изменение внутренней энергии.

Ответ:  $q=1850$  кДж/кг,  $\ell=1110$  кДж/кг,  $\Delta u=740$  кДж/кг.

6.39.  $H_2O$  с параметрами  $p_1=120$  бар и  $h_1=428$  кДж/кг сначала изотермически расширяется до удельного объема  $v_2=1,4$  м<sup>3</sup>/кг, а затем адиабатно сжимается до давления  $p_3=10$  бар. Определить изменение удельной внутренней энергии этого процесса.

Ответ:  $\Delta u=u_3-u_1=2077$  кДж/кг.

6.40. 1 кг водяного пара при давлении 20 бар и степени сухости 0,8 нагревается при постоянном давлении до температуры 420 °С, затем при постоянной температуре достигает давления 8 бар, после чего при постоянном объеме его давление изменяется до 7 бар, а далее пар адиабатно достигает давления 0,1 бар. Изобразить этот процесс 1-2-3-4-5-6-7-8 в  $p,v$ -,  $T,s$ - и  $h,s$ - диаграммах и определить суммарное количество его удельных теплоты, работы изменения объема и изменения внутренней энергии.

Ответ:  $q=1042$  кДж/кг,  $\Delta u=u_8-u_1=40$  кДж/кг,  $\ell=1082$  кДж/кг.

### Контрольные вопросы

1. Может ли существовать насыщенный водяной пар с жидкой фазой воды в ненасыщенном состоянии, если да, то при каких условиях?
2. Что означает понятие «сухой насыщенный пар»?
3. Что означает понятие «жидкая фаза воды в состоянии насыщения»?
4. Что означают понятия «перегретый пар» и «степень перегрева пара»?
5. Что означает понятие «влажный насыщенный пар»?
6. Что такое степень сухости и влажность водяного пара и почему эти характеристики введены в дополнение к термическим параметрам  $H_2O$ ?
7. Объяснить, какими величинами определяется характер изобар воды и водяного пара в  $T,s$ - диаграмме и как изобары  $H_2O$  выглядят в различных фазовых состояниях в  $T,s$ - диаграмме?
8. Объяснить, изменением какого параметра определяется характер изобар воды и водяного пара в  $h,s$ - диаграмме и как изобары  $H_2O$  выглядят в различных фазовых состояниях в  $h,s$ - диаграмме?
9. Объяснить, почему изотермы и адиабаты в области жидкости в  $p,v$ - диаграмме представляют практически вертикальные прямые?
10. Объяснить, почему изобары в области жидкости в  $T,s$ - диаграмме практически совпадают с линией  $x=0$  ?
11. Объяснить, почему изотермы в области перегретого пара в  $h,s$ - диаграмме при малых давлениях представляют практически горизонтальные прямые?
12. При каком давлении сухой насыщенный водяной пар имеет максимальное значение удельной энтальпии ?

### ПРАКТИЧЕСКОЕ ЗАНЯТИЕ №7

#### Влажный воздух . $h-d$ диаграмма влажного воздуха. Решение задач.

*Влажный воздух* – это смесь сухого воздуха и водяного пара. В воздухе при определенных условиях кроме водяного пара могут находиться его жидкая (вода) или

кристаллическая (лед, снег) фазы. В естественных условиях воздух всегда содержит водяной пар.

### Основные характеристики влажного воздуха

Давление влажного воздуха равно сумме парциальных давлений сухого воздуха и водяного пара:

$$p = p_v + p_n \quad (7.1)$$

Для наглядности представления основных характеристик влажного воздуха покажем в  $p, v$ - диаграмме (рис.7.1) состояния водяного пара во влажном воздухе. В качестве определяющих параметров водяного пара во влажном воздухе используются температура воздуха  $t$  и парциальное давление водяного пара  $p_n$ .

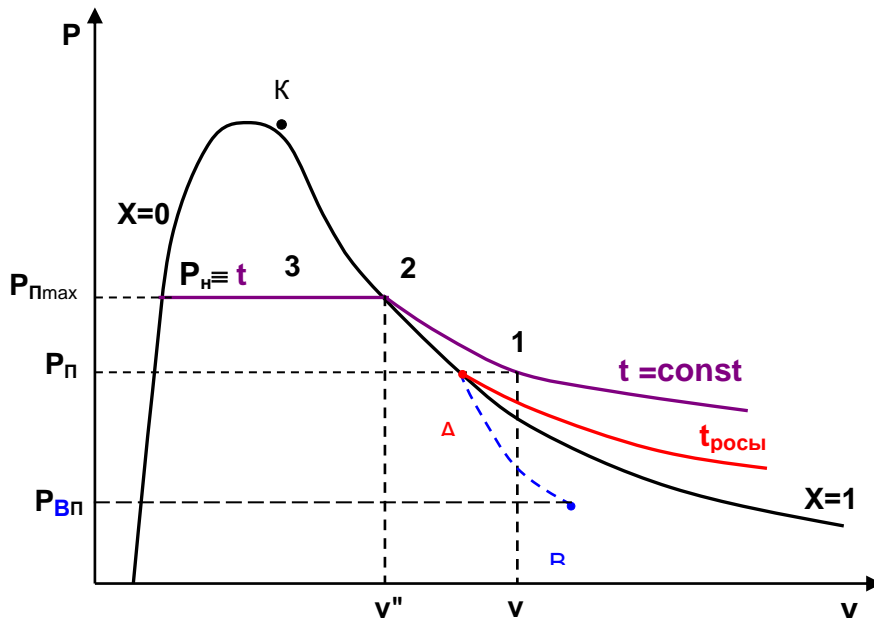


Рис.26. Основные состояния и характеристики водяного пара во влажном воздухе в  $p, v$ - диаграмме

Водяной пар во влажном воздухе может находиться в трех состояниях (рис.26): точка 1 – перегретый пар, точка 2 – сухой насыщенный пар, точка 3 – влажный насыщенный пар (сухой насыщенный пар плюс капельки жидкости в состоянии насыщения). Высшим пределом парциального давления водяных паров при данной температуре воздуха  $t$  является давление насыщения пара  $p_{nmax} = p_n$ .

Абсолютная влажность  $\rho$  – это массовое количество водяных паров в одном кубическом метре влажного воздуха. Ее размерность –  $кг/м^3$ . Для определения абсолютной влажности используется величина, обратная удельному объему водяного пара  $v = f(p_n, t)$ ,

$$\rho = \frac{m_n}{V} = \frac{1}{v} \quad (7.2)$$

Относительная влажность  $\phi$  – это отношение абсолютной влажности к максимально возможной влажности воздуха при данной температуре:

$$\phi = \frac{\rho}{\rho_{max}} = \frac{\rho}{\rho''} = \frac{v''}{v} \quad (7.3)$$

где  $\rho_{max} = \rho''$  и  $v''$  – максимальная абсолютная влажность воздуха и удельный объем сухого насыщенного водяного пара при данной температуре  $t$  (точка 2 в  $p, v$ - диаграмме рис.26).

При соответствии  $H_2O$  области влажного насыщенного пара при температуре воздуха  $t$  (точка 3), содержание водяного пара в  $1 \text{ м}^3$  воздуха такое же, как и в точке 2  $p, v$ - диаграммы  $H_2O$  ( $v = v''$ ), но в воздухе кроме водяного пара присутствуют капельки воды в состоянии насыщения.

Различают 3 состояния влажного воздуха:

1. *Ненасыщенный влажный воздух* –  $\phi < 100 \%$ ,  $p_p < p_n$ ,  $\rho < \rho''$ , водяной пар во влажном воздухе находится в виде перегретого пара (точка 1);
2. *Насыщенный влажный воздух* –  $\phi = 100 \%$ ,  $p_p = p_n$ ,  $\rho = \rho''$ , водяной пар во влажном воздухе находится в виде сухого насыщенного пара (точка 2);
3. *Перенасыщенный влажный воздух* –  $\phi = 100 \%$ ,  $p_p = p_n$ ,  $\rho = \rho''$ , кроме сухого насыщенного пара в воздухе находятся капельки воды в состоянии насыщения или льда, снега (точка 3 при наличии капелек воды).

В технике используется такая характеристика влажного воздуха, как *температура точки росы*. Это такая температура, начиная с которой при охлаждении влажного воздуха при постоянном давлении (процесса 1-А, рис. 7.1) из него начинается выпадение капелек воды, т.е. температуре точки росы соответствует температура насыщения при парциальном давлении водяного пара (точка А). При снижении температуры воздуха ниже температуры точки росы при постоянном давлении всей смеси и постоянном содержании в ней  $H_2O$  (процесс А-В) парциальное давление водяного пара уменьшается ( $p_{вп} < p_n$ ), количество сухого насыщенного пара уменьшается, а количество капелек воды увеличивается. В этом случае в  $p, v$ - диаграмме процесс охлаждения водяного пара А-В пойдет в области влажного пара с уменьшением его степени сухости по мере снижения температуры.

*Влажосодержание*  $d$  – это масса  $H_2O$  в граммах, находящаяся в 1 кг сухого воздуха. В общем случае понятие "влажосодержание" относится не только к паровой фазе воды, но и к жидкой, и к твердой ее фазам. Расчетное выражение для влажосодержания в воздухе (г/кг с.в.) получается из соотношения

$$d = \frac{m_{H_2O}}{m_{с.в.}} 1000 \quad (7.4)$$

*Удельная энтальпия влажного воздуха*  $H$  рассчитывается на 1 кг сухого воздуха (кДж/(кг с.в.)) и определяется как сумма энтальпий компонентов, находящихся в 1 кг сухого воздуха:

$$H = h_{в} + \frac{d_p}{1000} h_p + \frac{d_{ж}}{1000} h_{ж} + \frac{d_{т}}{1000} h_{т} \quad (7.5)$$

где  $d_p, d_{ж}, d_{т}$  – количество пара, жидкости и твердой фазы  $H_2O$  (лед, снег) в граммах на 1 кг сухого воздуха (влажосодержания);

$h_{в}, h_p, h_{ж}, h_{т}$  – удельные энтальпии сухого воздуха, пара, жидкости и твердой фазы  $H_2O$ , кДж/кг.

В выражении (7.5) энтальпии всех компонентов влажного воздуха должны иметь одинаковые давление и температуру начала их отсчета.

### **Характеристики атмосферного влажного воздуха**

При температурах атмосферного воздуха  $0 \div 50 \text{ }^\circ\text{C}$  парциальное давление водяного пара очень мало ( $0,006 \div 0,07$  бар), что позволяет применить к перегретому и сухому насыщенному водяному пару уравнения идеального газа

$$p_p v = R_{H_2O} T \quad (7.6)$$

$$p_n v'' = R_{H_2O} T \quad (7.7)$$

где  $p_n, p_n$  – парциальные давления для перегретого и сухого насыщенного водяного пара при температуре  $T$ ;

$v, v''$  – удельные объемы для перегретого и сухого насыщенного водяного пара при температуре  $T$ .

Разделив выражения (7.6) и (7.7) друг на друга, получим расчетное выражение относительной влажности воздуха через парциальные давления водяного пара:

$$\varphi = \frac{v''}{v} = \frac{p_n}{p_n} \quad (7.8)$$

Молярную массу влажного атмосферного воздуха определяют по уравнению молярной массы смеси идеальных газов

$$\mu = 28,96 - 10,944 \frac{p_n}{p} \quad (7.9)$$

Расчетное выражение для влагосодержания *паровой фазы воды* в атмосферном воздухе, г/(кг с.в.), будет иметь вид

$$d_n = \frac{m_n}{m_{с.в.}} 1000 = 622 \frac{p_n}{p - p_n} = 622 \frac{\varphi p_n}{p - \varphi p_n} \quad (7.10)$$

Расчетное выражение энтальпии влажного атмосферного воздуха, кДж/(кг с.в.), имеет вид

$$H = t + \frac{d_n}{1000} (2501 + 1,93 \cdot t) + \frac{d_{ж}}{1000} 4,187 \cdot t + \frac{d_{т}}{1000} (-335 + 2,1 \cdot t) \quad (7.11)$$

### ***H,d- диаграмма атмосферного влажного воздуха***

Для упрощения определения параметров атмосферного влажного воздуха используют *H,d-* диаграмму влажного воздуха (рис. 27).

Она строится для постоянного давления воздуха (обычно  $p=745$  мм рт.ст.), но поскольку парциальное давление водяного пара на несколько порядков меньше давления влажного воздуха, а атмосферное давление изменяется в небольших пределах, то с достаточной для инженерных расчетов степенью точности такой диаграммой можно пользоваться и при других атмосферных давлениях воздуха.

Построение *H,d-* диаграммы влажного воздуха основано на расчетном выражении энтальпии влажного атмосферного воздуха (7.11).

*H,d-* диаграмму выполняют в косоугольной системе координат, как правило, с углом между осями *H* и *d* в  $135^\circ$  (рис. 27). Это позволяет увеличить по сравнению с прямоугольной системой координат расстояние между изотермами и линиями других характеристик ненасыщенного влажного воздуха в *H,d-* диаграмме.

Ось координат влагосодержания *d* имеет нулевое начало. Вертикальные линии в *H,d-* диаграмме представляют собой линии постоянных влагосодержаний  $d=\text{const}$ . Линии постоянных энтальпий  $H=\text{const}$  параллельны оси *d* и идут под углом  $135^\circ$  к оси *H*.

#### *Область влажного ненасыщенного воздуха H,d- диаграммы*

Для влажного ненасыщенного воздуха в *H,d-* диаграмме (область выше линии  $\varphi=100\%$ ) изображение изотерм  $t=\text{const}$  ведется в соответствии с уравнением энтальпии для этой области, когда в воздухе может присутствовать только паровая фаза воды:

$$H = t + \frac{d_n}{1000} (2501 + 1,93 \cdot t)$$

Изотермы в этой области представляют собой близкие к параллельным прямые линии с угловым коэффициентом, соответствующим величине

$$\left(\frac{\partial H}{\partial d}\right)_t = \frac{2501 + 1,93 \cdot t}{1000}$$

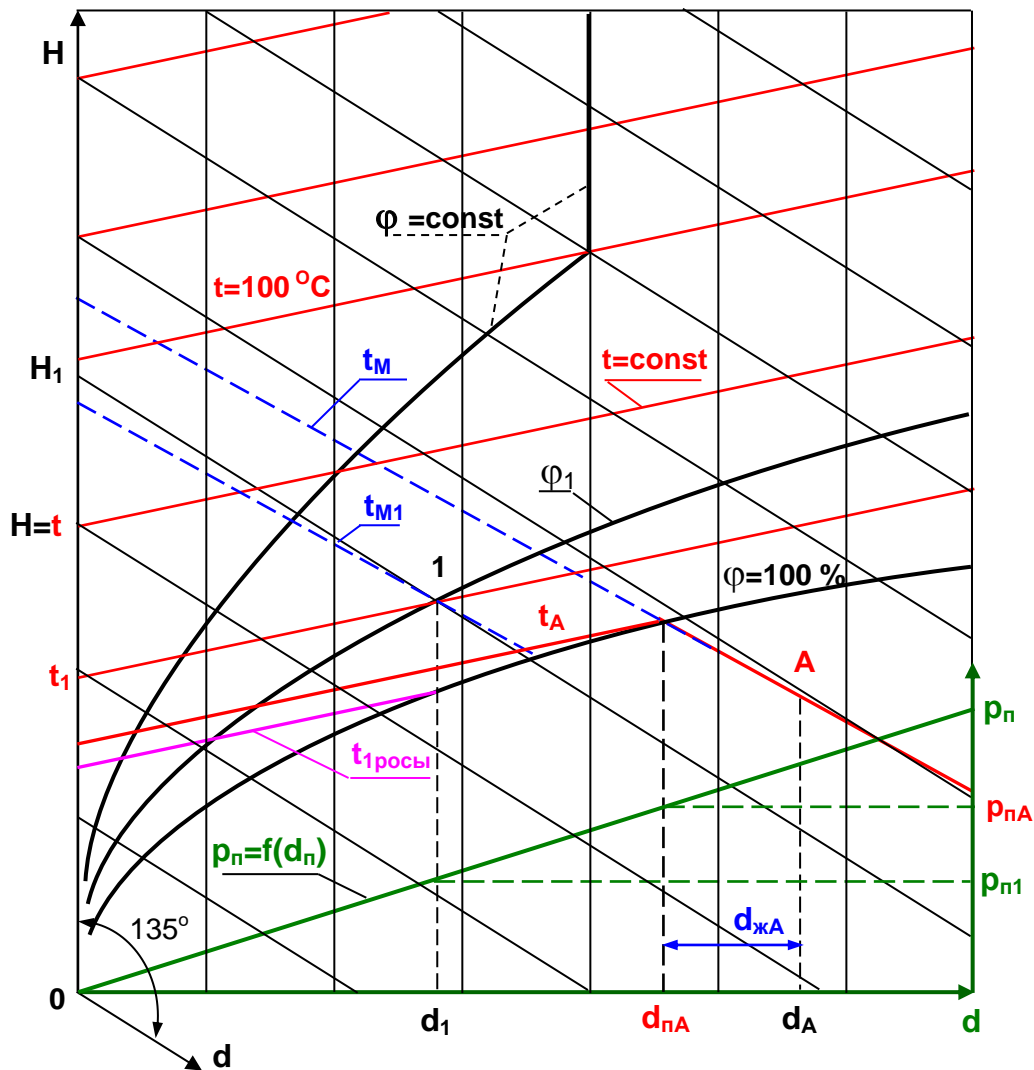


Рис. 27 H,d- диаграмма влажного атмосферного воздуха

и примеры определения параметров по ней

Незначительное веерное расхождение изотерм вызвано слагаемым  $1,93t$ .

При  $d=0$  получаем  $H=t$ , т.е. численные значения энтальпий и температур на оси  $H$  одинаковы. Поэтому ось энтальпий одновременно выполняет и роль оси температур.

Каждой точке изотермы соответствует определенное значение относительной влажности воздуха  $\phi$ . Соединив на изотермах точки с одинаковыми  $\phi$ , получают линии постоянных относительных влажностей воздуха ( $\phi=\text{const}$ ). При этом  $\phi=0$  соответствует  $d=0$ , т.е. линия  $\phi=0$  совпадает с осью энтальпий  $H$ .

Линии  $\phi=\text{const}$  выше изотермы  $100^\circ\text{C}$  представляют собой вертикальные прямые. В этой области температур ( $t \geq 100^\circ\text{C}$ ) давление насыщения водяного пара становится равным атмосферному давлению и изменяться не может ( $p_n=p=\text{const}$ ). Соответственно, не меняется при  $\phi=\text{const}$  в этой области и влагосодержание воздуха

$$d_{\text{п}} = 622 \frac{\varphi p_{\text{н}}}{p - \varphi p_{\text{н}}} = 622 \frac{\varphi}{1 - \varphi} = \text{const}$$

Для полноты информации о влажном воздухе на H,d- диаграмму накладывается *прямоугольная диаграмма*  $p_{\text{н}}=f(d)$ , отражающая зависимость парциального давления водяного пара от влагосодержания водяного пара в воздухе  $d=622p_{\text{н}}/(p-p_{\text{н}})$ .

*Область перенасыщенного влажного воздуха H,d- диаграммы*

В области перенасыщенного влажного воздуха (ее называют областью тумана, она расположена в H,d- диаграмме ниже линии  $\varphi=100\%$ ) кроме паровой фазы в воздухе может присутствовать жидкая или твердая фаза воды. При атмосферном давлении воздуха и температуре выше  $0\text{ }^{\circ}\text{C}$  могут одновременно существовать только паровая и жидкая фазы воды, а при температурах ниже  $0\text{ }^{\circ}\text{C}$  – только паровая и твердая (лед, снег) фазы воды, и только при  $0\text{ }^{\circ}\text{C}$  могут одновременно существовать все три фазы воды.

Характер изотерм в области перенасыщенного влажного воздуха H,d- диаграммы при температурах больше  $0\text{ }^{\circ}\text{C}$  определяется уравнением энтальпии влажного воздуха в виде

$$H = t + \frac{d_{\text{п}}}{1000} (2501 + 1,93 \cdot t) + \frac{d_{\text{ж}}}{1000} 4,187 \cdot t$$

Количество водяного пара в области тумана влажного воздуха при постоянной температуре не меняется. Оно соответствует максимально возможному влагосодержанию пара в воздухе при данной температуре и определяется в H,d- диаграмме на линии  $\varphi=100\%$  как влагосодержание насыщенного воздуха  $d_{\text{пА}}=d_{\text{нА}}$  (рис.27, точка А). Увеличение влагосодержания воздуха на изотерме в области тумана обусловлено увеличением жидкой фазы воды в воздухе. Парциальное давление водяных паров на изотерме в области тумана при этом остается постоянным и равным давлению насыщения ( $p_{\text{пА}}=p_{\text{нА}}$ ). Таким образом, в выражении энтальпии перенасыщенного влажного воздуха при  $t=\text{const}$  переменной будет только третье слагаемое, определяющее угол наклона изотермы в области тумана H,d- диаграммы выражением

$$\left( \frac{\partial H}{\partial d_{\text{ж}}} \right)_t = \frac{4,187 \cdot t}{1000}$$

Угловой коэффициент для изотермы ненасыщенного влажного воздуха больше данного углового коэффициента, т.е. на линии  $\varphi=100\%$  прямолинейная изотерма претерпевает излом, уменьшая угол наклона к оси d в области тумана.

*Меньший угол наклона изотерм в области тумана будет соответствовать меньшему значению температуры, а изотерма  $0\text{ }^{\circ}\text{C}$  в этой области при наличии в воздухе только паровой и жидкой фаз воды совпадает с линией постоянных энтальпий – параллельна оси d.*

Определение влагосодержания жидкой фазы воды в воздухе в области тумана выполняется нахождением разности общего влагосодержания и влагосодержания паровой фазы воды ( $d_{\text{жА}}=d_{\text{А}}-d_{\text{пА}}$ ).

На практике для определения параметров влажного воздуха используется психрометр, поэтому в H,d- диаграмме показаны изотермы мокрого термометра психрометра. Эти изотермы в H,d- диаграмме строят путем продолжения изотерм из области тумана в область ненасыщенного влажного воздуха (выше линии  $\varphi=100\%$ ) в виде прямых пунктирных (условных) линий. Показания мокрого термометра психрометра соответствуют температурам насыщенного (перенасыщенного) влажного воздуха, что позволяет по H,d- диаграмме по показаниям сухого и мокрого термометров определить все остальные характеристики ненасыщенного влажного воздуха (см. рис.27, точка 1).

### Пример пользования $H, d$ - диаграммой

При известных температурах сухого  $t_1$  и мокрого  $t_{м1}$  термометров, взятых с показаний психрометра, определяем на пересечении этих изотерм в  $H, d$ - диаграмме точку 1, соответствующую состоянию влажного воздуха (см. рис.27). По осям координат диаграммы находим  $H_1$  и  $d_1$  и проходящую через точку 1 линию  $\varphi_1 = \text{const}$ . На пересечении линий  $d_1 = \text{const}$  и  $\varphi_1 = 100\%$  определяется температура точки росы  $t_{1\text{росы}}$ , а по зависимости  $p_{\text{п}} = f(d)$  и  $d_1$  находится парциальное давление пара  $p_{\text{п1}}$ .

Если точка А (см. рис.27) располагается в области перенасыщенного влажного воздуха и мы знаем ее температуру, то определить влагосодержание  $d_A$  в ней можно только экспериментально. Влагосодержание пара в этой точке соответствует величине  $d_{\text{нА}}$ , находящейся на пересечении линий  $t_A$  и  $\varphi = 100\%$ . Влагосодержание жидкой фазы воды в этой точке определяется как разность влагосодержаний  $d_{\text{жА}} = d_A - d_{\text{нА}}$ . Парциальное давление пара для точки А равно давлению насыщения:  $p_A = p_{\text{пА}}$  при  $t_A$  и  $\varphi = 100\%$ .

Диаграмма  $H, d$  для атмосферного влажного воздуха, построенная при давлении воздуха 745 мм рт.ст., приведена на рис. 28.

### Задачи к ПЗ 7

#### Пример решения задачи:

7.1. Влажный атмосферный воздух имеет температуру  $40^\circ\text{C}$  и давление 750 мм рт. ст., парциальное давление водяного пара в воздухе 30 мм рт. ст..

Определить аналитически (не используя диаграмму  $H, d$ ) состояние и основные характеристики влажного атмосферного воздуха: абсолютную влажность, относительную влажность, температуру точки росы, влагосодержание, удельную энтальпию.

Решение

По таблицам термодинамических свойств воды и водяного пара [13] определяется фазовое состояние водяного пара в воздухе, по которому оценивается состояние влажного воздуха:

$$p_{\text{п}} = 30 \text{ мм рт. ст.} = \frac{30}{750} 10^5 = 4 \cdot 10^3 \text{ Па}$$

при  $t = 40^\circ\text{C}$  фазовое состояние

$\text{H}_2\text{O}$  – перегретый водяной пар, что соответствует ненасыщенному влажному воздуху.

Абсолютная влажность воздуха может быть рассчитана с использованием таблиц [13] и по уравнению состояния идеального газа:

при  $p_{\text{п}} = 4 \text{ кПа}$  и  $t = 40^\circ\text{C}$  по таблицам [13] определяется удельный объем водяного пара  $v = 36,08 \text{ м}^3/\text{кг}$  и рассчитывается  $\rho$

$$\rho = \frac{1}{v} = \frac{1}{36,08} = 0,0277 \text{ кг/м}^3;$$

или, если использовать уравнение состояния идеального газа,

$$\rho = \frac{p_{\text{п}}}{R_{\text{H}_2\text{O}} T} = \frac{18 \cdot 4 \cdot 10^3}{8314 \cdot (40 + 273)} = 0,02766 \text{ кг/м}^3.$$

Относительную влажность также определим двумя способами:

при  $t = 40^\circ\text{C}$  по таблицам [13] определяется удельный объем сухого насыщенного водяного пара  $v'' = 19,548 \text{ м}^3/\text{кг}$  и рассчитывается относительная влажность воздуха:

$$\varphi = \frac{\rho''}{\rho} = \frac{v''}{v} = \frac{19,548}{36,08} = 0,542;$$

используя уравнение состояния идеального газа, относительную влажность воздуха рассчитываем как отношение парциальных давлений пара

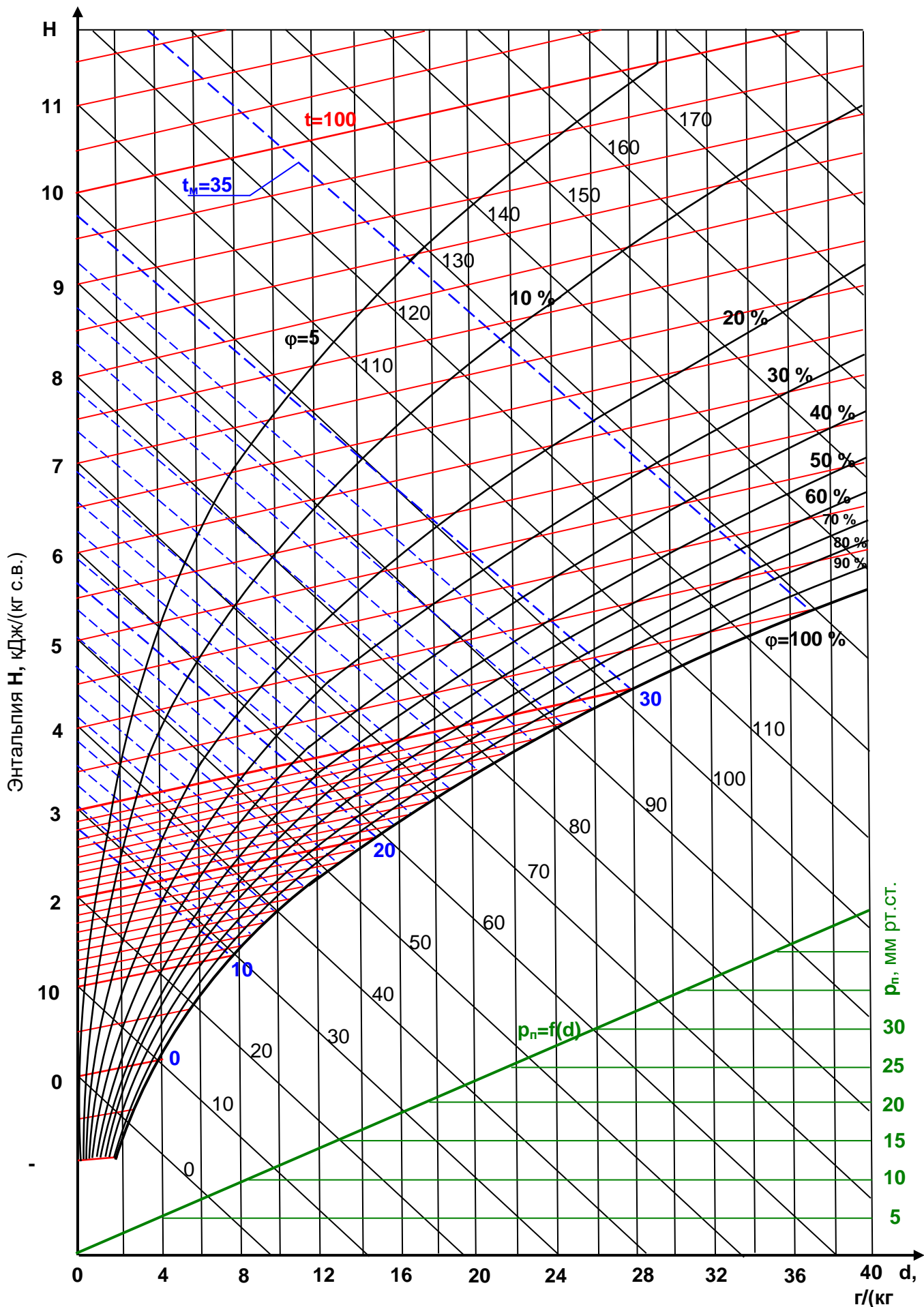


Рис. 28. H, d - диаграмма влажного атмосферного воздуха при  $B=745$  мм рт.ст.

$$\varphi = \frac{v''}{v} = \frac{p_{\text{п}}}{p_{\text{н}}} = \frac{4}{7,375} = 0,542$$

где  $p_{\text{н}}=7,375$  кПа – давление насыщения водяного пара при  $t=40$  °С.

Сходимость результатов расчета величин  $\rho$  и  $\varphi$  по обоим методам очевидна.

Температура точки росы определяется по таблицам [13] как температура насыщения водяного пара при его парциальном давлении  $p_{\text{п}}=4$  кПа:

$$t_{\text{росы}} = t_{\text{н}}(p_{\text{п}}) = 28,98 \text{ } ^\circ\text{С.}$$

Влагосодержание воздуха определяется по уравнению (7.10):

$$d_{\text{п}} = 622 \frac{p_{\text{п}}}{p - p_{\text{п}}} = 622 \frac{4}{100 - 4} = 25,9 \text{ г/(кг с.в.).}$$

Удельная энтальпия влажного воздуха рассчитывается по формуле (7.11) применительно к ненасыщенному воздуху:

$$\begin{aligned} H &= t + \frac{d_{\text{п}}}{1000} (2501 + 1,93t) = \\ &= 40 + \frac{25,9}{1000} (2501 + 1,93 \cdot 40) = 106,8 \text{ кДж/(кг с.в.).} \end{aligned}$$

7.2. Влажный атмосферный воздух имеет температуру 50 °С и давление 1 бар, парциальное давление водяного пара в воздухе составляет 0,04 бар. Определить абсолютную и относительную влажность воздуха, влагосодержание, удельную энтальпию и температуру точки росы. Расчет провести аналитически и по диаграмме  $H, d$ .

Ответ:  $\rho=0,0268$  кг/м<sup>3</sup>,  $\varphi=2$  %;  $d=26,2$  г/(кг с.в.),

$H=118$  кДж/(кг с.в.),  $t_{\text{росы}}=29,2$  °С.

7.3. Состояние влажного воздуха задано параметрами:  $p=1$  бар,  $t=25$  °С,  $\varphi=0,6$ . С помощью таблиц термодинамических свойств водяного пара определить парциальное давление водяных паров в воздухе.

Ответ:  $p_{\text{п}}=1,9$  кПа.

7.4. Атмосферный воздух при давлении 1 бар имеет температуру 20 °С и относительную влажность  $\varphi=90$  %. Определить характеристики влажного атмосферного воздуха  $\rho$ ,  $d$ ,  $p_{\text{п}}$ ,  $t_{\text{росы}}$ ,  $H$  аналитически (расчетным путем), используя  $H, d$ - диаграмму влажного атмосферного воздуха.

Ответ:  $\rho=0,0156$  кг/м<sup>3</sup>,  $d=13,3$  г/(кг с.в.),  $p_{\text{п}}=2,1$  кПа.,

$t_{\text{росы}}=18,4$  °С,  $H=53,8$  кДж/(кг с.в.).

7.5. Состояние влажного атмосферного воздуха при  $p=1$  бар и  $t=20$  °С характеризуется температурой точки росы  $t_{\text{росы}}=10$  °С.

Определить абсолютную  $\rho$  и относительную влажность  $\varphi$ , влагосодержание  $d$  и удельную энтальпию  $H$  влажного воздуха в этом состоянии.

Ответ:  $\rho=4,93 \cdot 10^{-3}$  кг/м<sup>3</sup>,  $\varphi=52,5$  %,  $d=7,73$  г/(кг с.в.),

$H=39,6$  кДж/(кг с.в.).

7.6. Используя  $H, d$ - диаграмму, определить основные характеристики атмосферного влажного воздуха  $\varphi$ ,  $d$ ,  $p_{\text{п}}$ ,  $t_{\text{росы}}$ ,  $H$  при давлении  $B=745$  мм рт.ст. и температурах сухого и мокрого термометров психрометра  $t=30$  °С,  $t_{\text{м}}=20$  °С.

Ответ:  $\varphi=40$  %,  $d=10,7$  г/(кг с.в.),  $p_{\text{п}}=12,5$  мм рт.ст.,  $t_{\text{росы}}=15,5$  °С,

$H=57$  кДж/(кг с.в.).

7.7. Для определения состояния влажного атмосферного воздуха применен психрометр, сухой термометр которого показывает  $40\text{ }^{\circ}\text{C}$ , а влажный –  $35\text{ }^{\circ}\text{C}$ . Определить характеристики атмосферного влажного воздуха:  $\varphi$ ,  $d$ ,  $p_p$ ,  $t_{\text{росы}}$ ,  $H$ , используя диаграмму  $H, d$  влажного воздуха.

Ответ:  $\varphi=75\%$ ,  $d=35\text{ г}/(\text{кг с.в.})$ ,  $p_p=39\text{ мм рт.ст.}$ ,  
 $t_{\text{росы}}=34\text{ }^{\circ}\text{C}$ ,  $H=130\text{ кДж}/(\text{кг с.в.})$ .

7.8. Определить по  $H, d$ - диаграмме характеристики влажного атмосферного воздуха  $\varphi$ ,  $d_{\text{ж}}$ ,  $p_p$ ,  $t_{\text{росы}}$ ,  $d_{\text{ж}}$ ,  $H$  при давлении  $745\text{ мм рт. ст.}$ , температуре  $20\text{ }^{\circ}\text{C}$  и влагосодержании  $d=18\text{ г}/\text{кг с.в.}$

Ответ:  $\varphi=100\%$ ,  $d_{\text{ж}}=3,5\text{ г}/(\text{кг с.в.})$ ,  $p_p=17\text{ мм рт.ст.}$ ,  
 $t_{\text{росы}}=23,5\text{ }^{\circ}\text{C}$ ,  $H=58\text{ кДж}/(\text{кг с.в.})$ .

7.9. Определить относительную влажность атмосферного воздуха, имеющего давление  $745\text{ мм рт. ст.}$ , температуру  $110\text{ }^{\circ}\text{C}$  и влагосодержание  $18\text{ г}/(\text{кг с.в.})$ .

Ответ:  $\varphi=2,81\%$ .

7.10. Определить удельную энтальпию влажного атмосферного воздуха, если его давление  $p=750\text{ мм рт.ст.}$ , температура  $t=25\text{ }^{\circ}\text{C}$ , а относительная влажность  $\varphi=80\%$ . В расчетах использовать таблицы [13] термодинамических свойств воды и водяного пара.

Ответ:  $H=66,2\text{ кДж}/(\text{кг с.в.})$ .

7.11. Влажный атмосферный воздух при температуре  $t=20\text{ }^{\circ}\text{C}$  и давлении  $p=750\text{ мм рт.ст.}$  имеет относительную влажность  $\varphi=70\%$ . Используя таблицы теплофизических свойств воды и водяного пара, определить количество теплоты, которое необходимо изобарно подвести к  $1\text{ кг с.в.}$  при неизменном его влагосодержании для снижения относительной влажности воздуха до  $10\%$ .

Ответ:  $Q=36,5\text{ кДж}/(\text{кг с.в.})$ .

7.12. Атмосферный воздух при  $t_1=70\text{ }^{\circ}\text{C}$ ,  $p=750\text{ мм рт.ст.}$  и относительной влажности  $\varphi_1=6\%$  поступает в сушильную камеру. После сушки материала его температура стала  $t_2=30\text{ }^{\circ}\text{C}$ , а относительная влажность  $\varphi_2=90\%$ . Используя таблицы теплофизических свойств воды и водяного пара, определить, сколько воды испарил  $1\text{ кг}$  сухого воздуха и какое количество теплоты потеряно им.

Ответ:  $\Delta d=12,8\text{ г}/(\text{кг с.в.})$ ,  $Q=8,1\text{ кДж}/(\text{кг с.в.})$ .

7.13. Определить минимальное массовое количество влажного воздуха с параметрами:  $t=20\text{ }^{\circ}\text{C}$ ,  $p=1\text{ бар}$ ,  $\varphi=80\%$ , необходимое для испарения  $1\text{ кг}$  воды с температурой  $20\text{ }^{\circ}\text{C}$ . Считать, что при испарении воды теплообмена с окружающей средой нет. Решение выполнить двумя способами:

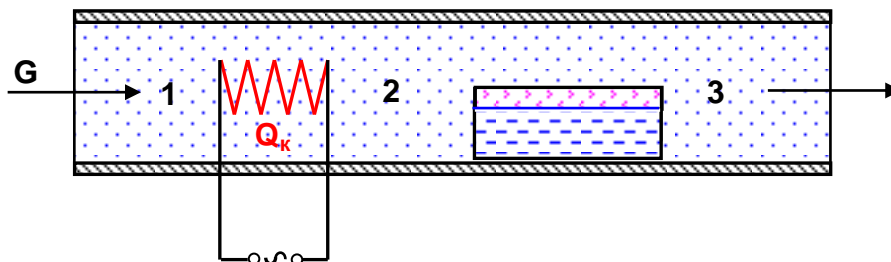
- 1) с использованием  $H, d$ - диаграммы;
- 2) с использованием таблиц термодинамических свойств воды и водяного пара.

Ответ:  $G_{\text{вл.в}}=1190\text{ кг}$ .

7.14. В экспериментальной сушильной установке (рис. 29) влажный воздух с начальными параметрами  $t_1=20\text{ }^{\circ}\text{C}$  и  $\varphi_1=40\%$  нагревается калорифером до температуры  $t_2=80\text{ }^{\circ}\text{C}$ , а затем за счет испарения из материала влаги его температура понижается до  $t_3=35\text{ }^{\circ}\text{C}$ . Рассчитать количество теплоты, затраченное в установке на испарения из материала  $1\text{ кг}$  воды, параметры воздуха на выходе из установки ( $H_3$ ,  $d_3$ ,  $\varphi_3$ ) и количество влаги, которое испаряется в установке из материала в расчете на  $1\text{ кг}$  сухого воздуха. Считать, что тепловые потери в

установке отсутствуют, а находящийся в установке материал для сушки предварительно был нагрет до  $80\text{ }^{\circ}\text{C}$ .

Ответ:  $Q=3410\text{ кДж}/(\text{кг исп. воды})$ ,  $\varphi_3=65\%$ ,  $H_3=95,6\text{ кДж}/(\text{кг с.в.})$ ,  
 $d_3=23,7\text{ г}/(\text{кг с.в.})$ ,  $d_3-d_2=17,8\text{ г}/(\text{кг с.в.})$ .



7.15. Рассчитать процесс сушки материала атмосферным воздухом (рис. 29) с давлением  $745\text{ мм рт. ст.}$ . Воздух сперва нагревается в калорифере от  $t_1=20\text{ }^{\circ}\text{C}$  и  $\varphi_1=70\%$  до  $t_2=90\text{ }^{\circ}\text{C}$ , а затем поступает в сушильную камеру, где идет процесс сушки с потерями теплоты в окружающую среду до  $t_3=35\text{ }^{\circ}\text{C}$  и  $t_{3M}=27\text{ }^{\circ}\text{C}$  (температура мокрого термометра психрометра).

Определить:

- 1) параметры воздуха  $H$  и  $d$  в точках 1, 2, 3 установки по  $H, d$  - диаграмме;
- 2) количество испаренной влаги  $1\text{ кг}$  сухого воздуха в установке;
- 3) количество сухого воздуха, необходимого для испарения  $1\text{ кг}$  влаги из материала в установке;
- 4) количество теплоты, полученное воздухом в калорифере при испарении им  $1\text{ кг}$  влаги;
- 5) количество потерь теплоты в сушильной камере при испарении воздухом  $1\text{ кг}$  влаги;
- 6) минимально-теоретическое количество сухого воздуха, необходимое для испарения  $1\text{ кг}$  влаги из материала в этой установке без калорифера.

Ответ:  $d_1=d_2=10,1\text{ г}/(\text{кг с.в.})$ ,  $d_3=19,9\text{ г}/(\text{кг с.в.})$ ,  $H_1=47\text{ кДж}/(\text{кг с.в.})$ ,  
 $H_2=115\text{ кДж}/(\text{кг с.в.})$ ,  $H_3=86\text{ кДж}/(\text{кг с.в.})$ ;  
 $d_3-d_2=9,8\text{ г}/(\text{кг с.в.})$ ,  $G_{св}=102\text{ (кг с.в.)}/(\text{кг исп. воды})$ ;  
 $Q_k=6936\text{ кДж}/(\text{кг исп. воды})$ ,  $Q_{пот.}=2958\text{ кДж}/(\text{кг исп. воды})$ ;  
 $G_{св min}=588\text{ (кг с.в.)}/(\text{кг исп. воды})$ .

7.16. В сушильную камеру воздух поступает с  $t_1=80\text{ }^{\circ}\text{C}$  и  $\varphi_1=0,05$ . Из сушильной камеры он выходит с  $t_2=55\text{ }^{\circ}\text{C}$  и влагосодержанием  $d_2=105\text{ г}/(\text{кг с.в.})$ . Определить аналитически, используя таблицы термодинамических свойств водяного пара, относительную влажность  $\varphi_2$  на выходе из сушилки и количество влаги, уносимое из сушилки  $1\text{ кг}$  сухого воздуха. Принять давление в сушильной камере постоянным и равным  $750\text{ мм рт.ст.}$

Ответ:  $\varphi_2=0,918$ ,  $\Delta d=89,9\text{ г}/(\text{кг с.в.})$ .

7.17. Начальное состояние влажного атмосферного воздуха задано параметрами:  $p_1=1\text{ бар}$ ,  $t_1=40\text{ }^{\circ}\text{C}$ ,  $\varphi_1=60\%$ . Воздух изобарно без изменения содержания в нем  $\text{H}_2\text{O}$  охлаждается до температуры  $t_2=20\text{ }^{\circ}\text{C}$ . Определить, сколько влаги в виде росы выпадет из воздуха в расчете на  $1\text{ кг}$  сухого воздуха.

Ответ:  $d_{ж}=24\text{ г}/(\text{кг с.в.})$ .

7.18. Влажный воздух при барометрическом давлении  $750\text{ мм рт.ст.}$  и температуре  $90\text{ }^{\circ}\text{C}$  имеет относительную влажность  $\varphi_1=80\%$ . Воздух изобарно без изменения содержания в нем  $\text{H}_2\text{O}$  охлаждается до температуры  $t_2=10\text{ }^{\circ}\text{C}$ . Определить, какая доля водяного пара превращается в жидкость, используя таблицы термодинамических свойств водяного пара.

Ответ: 99,03 %.

7.19. Влажный воздух с температурой 20 °С и давлением 1 бар имеет относительную влажность 80 %. Определить, какое количество жидкости выпадет в расчете на 1 кг сухого воздуха при изобарном охлаждении влажного воздуха до 10 °С. Определить абсолютную влажность воздуха в конечном состоянии и степень сухости водяных паров в этом воздухе. Показать процесс охлаждения водяного пара в воздухе в  $p, v$ - диаграмме.

Ответ:  $d_{ж}= 4,12$  г/(кг с.в.),  $\rho_2=9,397 \cdot 10^{-3}$  кг/м<sup>3</sup>,  $x_2=0,652$ .

7.20. Насыщенный влажный атмосферный воздух ( $\phi_1=100$  %) при  $t_1=20$  °С и  $p=750$  мм рт.ст. поступает в сушильную камеру. После «сушки» материала путем уноса из него капельной влаги влагосодержание воздуха увеличилось до 24 г/(кг с.в.). Используя таблицы теплофизических свойств воды и водяного пара [13], определить, сколько воды удалил 1 кг сухого воздуха и на сколько изменилась его энтальпия в этом процессе. Считать процесс сушки идеальным, без потерь теплоты в окружающую среду и без затрат теплоты на нагрев объектов в сушильной камере ( $t_2=20$  °С).

Ответ:  $\Delta d=9,14$  г/(кг с.в.),  $\Delta H=0,768$  кДж/(кг с.в.).

### Контрольные вопросы

1. Дайте определение парциального давления водяного пара во влажном воздухе.
2. Дайте определение и расчетное выражение абсолютной влажности воздуха, поясните, какие допущения делаются для влажного атмосферного воздуха и какую формулу при этом используют для расчета его абсолютной влажности.
3. Дайте определение и расчетные выражения относительной влажности воздуха, поясните, какую формулу используют для расчета относительной влажности атмосферного воздуха.
4. Назовите основные состояния влажного воздуха и соответствующие этим состояниям параметры и характеристики влажного воздуха. Покажите состояния водяного пара в этом воздухе в  $p, v$ - диаграмме.
5. Дайте определение температуры точки росы влажного воздуха и покажите эту изотерму в  $p, v$ - диаграмме для водяного пара. Поясните практическое значение температуры точки росы.
6. Дайте определение влагосодержания воздуха и приведите расчетное выражение влагосодержания пара для атмосферного влажного воздуха.
7. Напишите расчетное выражение энтальпии влажного воздуха при наличии в нем паровой, жидкой и твердой фаз воды. Поясните, какие требования предъявляются к удельным энтальпиям, входящим в это уравнение.
8. Напишите расчетное выражение энтальпии для влажного *атмосферного* воздуха при наличии в нем паровой, жидкой и твердой фаз воды. Поясните, какие допущения приняты при получении расчетных выражений удельных энтальпий, входящих в это уравнение.
9. Поясните принцип работы психрометра и его практическое предназначение.
10. Поясните принцип построения изотерм в области ненасыщенного влажного воздуха в  $H, d$ - диаграмме.
11. Поясните принцип построения линий постоянных относительных влажностей для влажного атмосферного воздуха в  $H, d$ - диаграмме.
12. Поясните принцип построения изотерм в области перенасыщенного влажного воздуха и изотерм влажного термометра психрометра в области ненасыщенного воздуха в  $H, d$ - диаграмме.
13. Поясните особенность линий постоянных относительных влажностей атмосферного воздуха при температурах больше 100 °С.
14. На основании какого выражения строится зависимость парциального давления пара от влагосодержания в  $H, d$ - диаграмме?
15. Поясните назначение калорифера в сушильной установке.

16. Почему процесс идеальной сушки идет при постоянной энтальпии?
17. Как определяется парциальное давление пара в области перенасыщенного влажного воздуха в H,d- диаграмме?
18. Как определяется температура точки росы в области перенасыщенного влажного воздуха в H,d- диаграмме?
19. Как определяются влагосодержания паровой и жидкой фаз воды в области перенасыщенного влажного воздуха в H,d- диаграмме?

## БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

### а) основная литература

1. [Барилович, В. А.](#) Основы технической термодинамики и теории тепло- и массообмена [Электронный ресурс]: учебное пособие / В.А. Барилович, Ю.А. Смирнов. - М.: НИЦ ИНФРА-М, 2014. - 432 с.- Режим доступа: <http://www.znaniy.com/bookread.php?book=356818>
2. [Кудинов В. А.](#) Теплотехника [Электронный ресурс] : Учебное пособие / В.А. Кудинов, Э.М. Карташов, Е.В. Стефанюк. - М.: КУРС: НИЦ ИНФРА-М, 2015. - 424 с. - Режим доступа: <http://znaniy.com/bookread2.php?book=486472>
3. Новиков, И. И. Термодинамика [Текст] : учебное пособие / И. И. Новиков. - 2-е изд., испр. - Санкт-Петербург ; Москва ; Краснодар : Лань, 2016. - 589 с.

### б) дополнительная литература

1. Михеев, М. А. Основы теплопередачи [Текст] : [учебное пособие] / М. А. Михеев, И. М. Михеева. - 3-е изд., репр. - М. : БАСТЕТ, 2010. - 343 с
2. Рудобашта, С. П. Теплотехника [Текст] : учебник для студ. вузов, обучающихся по направлению "Агроинженерия" : допущено МСХ РФ / С. П. Рудобашта ; Ассоциация " АГРООБРАЗОВАНИЕ". - М. : КолосС, 2010. - 599 с.
3. Теплотехника [Текст] : учебник для студ.вузов /под ред. А. П. Баскакова. –М.: БАСТЕТ, 2010. -325с.