
Термодинамика и теплопередача

лектор

Зиякаев Григорий Ракитович

Лекция 11

Содержание

- Влажный воздух

Влажный воздух

Влажный воздух – это смесь сухого воздуха и водяного пара.

Давление влажного воздуха

$$p = p_{\text{с.в.}} + p_{\text{п}}$$

где

$p_{\text{с.в.}}$, $p_{\text{п}}$ - парциальные давления сухого воздуха и водяного пара

Влажный воздух

Т.к. $p_{\Pi} \ll p_{\text{с.в.}}$, то параметры сухого воздуха и пара, содержащегося во влажном воздухе, можно рассчитывать по уравнениям состояния идеального газа

$$p_{\Pi} V = M_{\Pi} R_{\Pi} T$$

$$p_{\text{с.в.}} V = M_{\text{с.в.}} R_{\text{с.в.}} T$$

Влажный воздух

Пар, содержащийся во влажном воздухе, может быть сухим насыщенным, тогда $p_{\text{п}}=p_s$ или перегретым $p_{\text{п}}<p_s$.

При давлении пара, равном давлению насыщения ($p_{\text{п}}=p_s$), влажный воздух называется **насыщенным** и имеет **относительную влажность**

$$\varphi = \frac{p_{\text{п}}}{p_s} = 1 \quad \text{или} \quad \varphi = \frac{p_{\text{п}}}{p_s} 100 = 100\%$$

При $p_{\text{п}}<p_s$ влажный воздух **ненасыщенный** ($\varphi<1$ или $\varphi<100\%$).

Для **сухого** воздуха $p_{\text{п}}=0$, $\varphi=0$.

Влажный воздух

Ненасыщенный влажный воздух можно перевести в состояние насыщения двумя способами:

1. Увеличивая давление p_n до p_s при данной температуре влажного воздуха T (процесс $B - A$, рис. 7.1), например, увеличивая количество пара в воздухе за счет испарения воды.
2. Снижая температуру влажного воздуха при $p_n = \text{const}$ (процесс $B - \Gamma$).

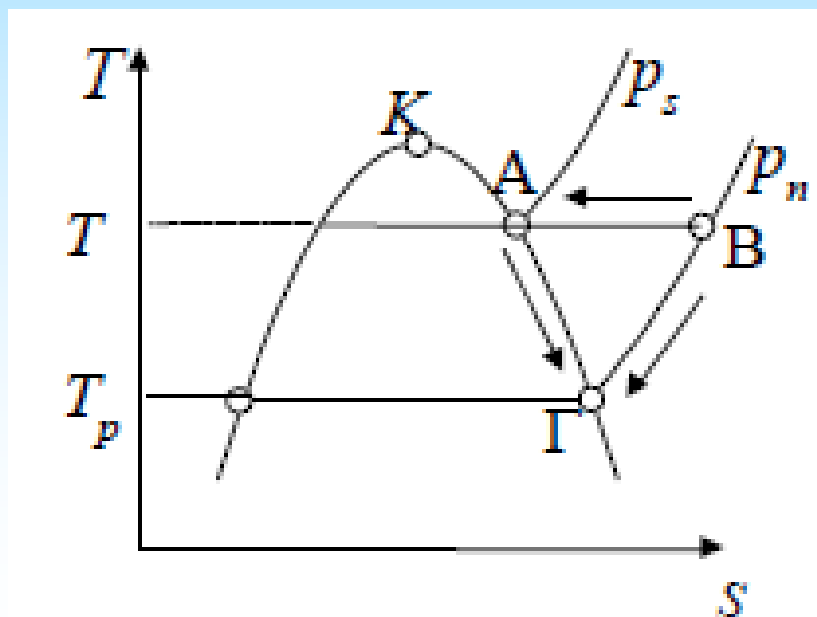


Рис. 7.1

Влажный воздух

Если понижать температуру ненасыщенного воздуха, можно достичь температуры, называемой **температурой точки росы (ТТР) (T_p)**, при которой давление пара (p_n) станет равной давлению насыщения (p_s) и ненасыщенный влажный воздух станет насыщенным с относительной влажностью $\varphi=100\%$

Температура точки росы измеряется **гигрометром**

Если охлаждать насыщенный влажный воздух (процесс $A - \Gamma$), то из него будет выпадать влага, т.к. уменьшается давление насыщения ($p_{s\Gamma} < p_{sA}$).

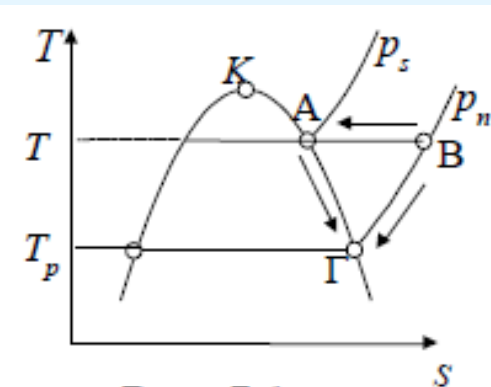


Рис. 7.1

Характеристики влажного воздуха

Абсолютная влажность – это масса пара, содержащегося в 1 м³ влажного воздуха (ρ_n , кг/м³). Для ненасыщенного влажного воздуха

$$\rho_n = \frac{1}{v_n},$$

где v_n - удельный объем перегретого пара

Для насыщенного влажного воздуха

$$\rho_n = \rho'' = \frac{1}{v''},$$

где v'' - удельный объем сухого насыщенного пара.

Характеристики влажного воздуха

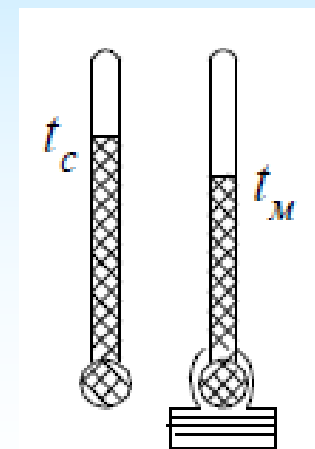
Относительной влажностью называется отношение абсолютной влажности воздуха (ρ_n) к максимально возможной при данной температуре абсолютной влажности воздуха (ρ''):

$$\varphi = \frac{\rho_n}{\rho''}, \quad \text{и} \quad \varphi = \frac{p_n}{p_s}$$
$$\varphi = \frac{\rho_n}{\rho''} 100\%$$

Относительная влажность измеряется *психрометром* (прибором, состоящим из двух термометров - “сухого” и “мокрого”.

Она является функцией следующих параметров:

$$\varphi = f(t_c, (t_c - t_m))$$



и определяется по психрометрическим таблицам или графикам.

Влажный воздух

Влагосодержание влажного воздуха— это отношение массы пара к массе (объему) сухого воздуха.

$$d = \frac{M_{\Pi}}{M_{\text{с.в}}}, \quad \left[\frac{\text{кг}}{\text{кг}}, \frac{\text{г}}{\text{кг}}, \frac{\text{г}}{\text{м}^3} \right]$$

Формула для расчета влагосодержания

$$d = 0,622 \frac{p_{\Pi}}{p - p_{\Pi}},$$

Влажный воздух

С учетом $p_{\Pi} = \varphi \cdot p_s$,

$$d = 0,622 \frac{\varphi \cdot p_s}{p - \varphi \cdot p_s},$$

где p — давление влажного воздуха, — давление насыщения, p_s определяемое по таблицам по температуре влажного воздуха t .

Для насыщенного влажного воздуха $\varphi=1$, а влагосодержание

$$d = 0,622 \frac{p_s}{p - p_s}, \left[\frac{\kappa \mathcal{Z}}{\kappa \mathcal{Z}_{C.B}} \right] \quad \text{или} \quad d = 622 \frac{p_s}{p - p_s}, \left[\frac{\mathcal{Z}}{\kappa \mathcal{Z}_{C.B}} \right]$$

Влажный воздух

Пример

Требуется определить влагосодержание воздуха насыщенного влажного воздуха атмосферном давлении и температуре - 40 °C

Решение

Атмосферное давление $p = 101325 \text{ Па}$

Давление насыщения пара при температуре - 40 °C

$$p_s = 12,85 \text{ Па}$$

Тогда

$$d = 622 \frac{p_s}{p - p_s} = 622 \frac{12,85}{101325 - 12,85} = 0,079 \frac{\text{г}}{\text{кг}_{\text{св}}}$$

Влажный воздух

Температура (ТТР), °C	Давление насыщенных паров над поверхностью воды (льда)			Массовое влажностное содержание, г/кг	Относительная влажность при 20°C, %
	кПа	мм рт. ст.	мбар		
-40	0,01285	0,10	0,13	0,0791	0,55
-39	0,01438	0,11	0,14	0,0886	0,61
-38	0,01608	0,12	0,16	0,099	0,69
-37	0,01796	0,13	0,18	0,1106	0,77
-36	0,02004	0,15	0,20	0,1235	0,86
-35	0,02235	0,17	0,22	0,1377	0,96
-34	0,0249	0,19	0,25	0,1534	1,06
-33	0,02771	0,21	0,28	0,1707	1,18
-32	0,03082	0,23	0,31	0,1899	1,32
-31	0,03424	0,26	0,34	0,211	1,46
-30	0,03802	0,29	0,38	0,2342	1,63
-29	0,04217	0,32	0,42	0,2598	1,80
-28	0,04673	0,35	0,47	0,2879	2,00
-27	0,05174	0,39	0,52	0,3188	2,21
-26	0,05725	0,43	0,57	0,3528	2,45
-25	0,06329	0,47	0,63	0,39	2,71
-24	0,06991	0,52	0,70	0,4308	2,99
-23	0,07716	0,58	0,77	0,4755	3,30
-22	0,0851	0,64	0,85	0,5245	3,64
-21	0,09378	0,70	0,94	0,578	4,01
-20	0,10326	0,77	1,03	0,6366	4,42

Давление насыщенных паров, влагосодержание и относительная влажность воздуха, при различных значениях ТТР (при атмосферном давлении)

ТТР- температура точки росы

Влажный воздух

Энтальпия

Энтальпия влажного воздуха определяется как энтальпия газовой смеси, состоящей из 1 кг сухого воздуха и d кг водяного пара

$$h = h_{c.v} + d \cdot h_n$$

$$h = 1,004 \cdot t + d \cdot (2500 + 1,926 \cdot t)$$

где

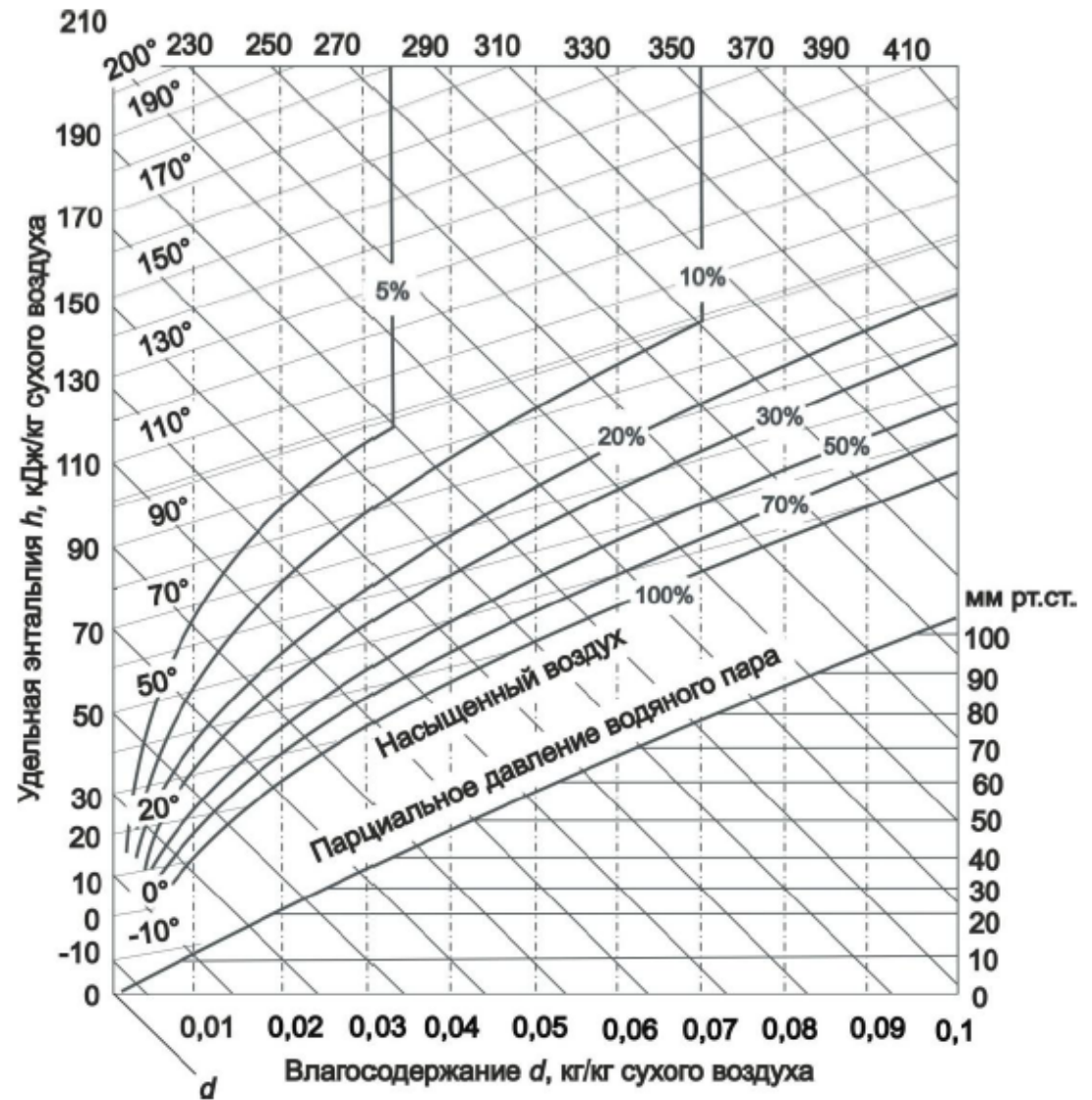
$$h_{c.v} = 1,004 \cdot t$$

$$h_n = r + c_{Pn} \cdot t = 2500 + 1,926 \cdot t$$

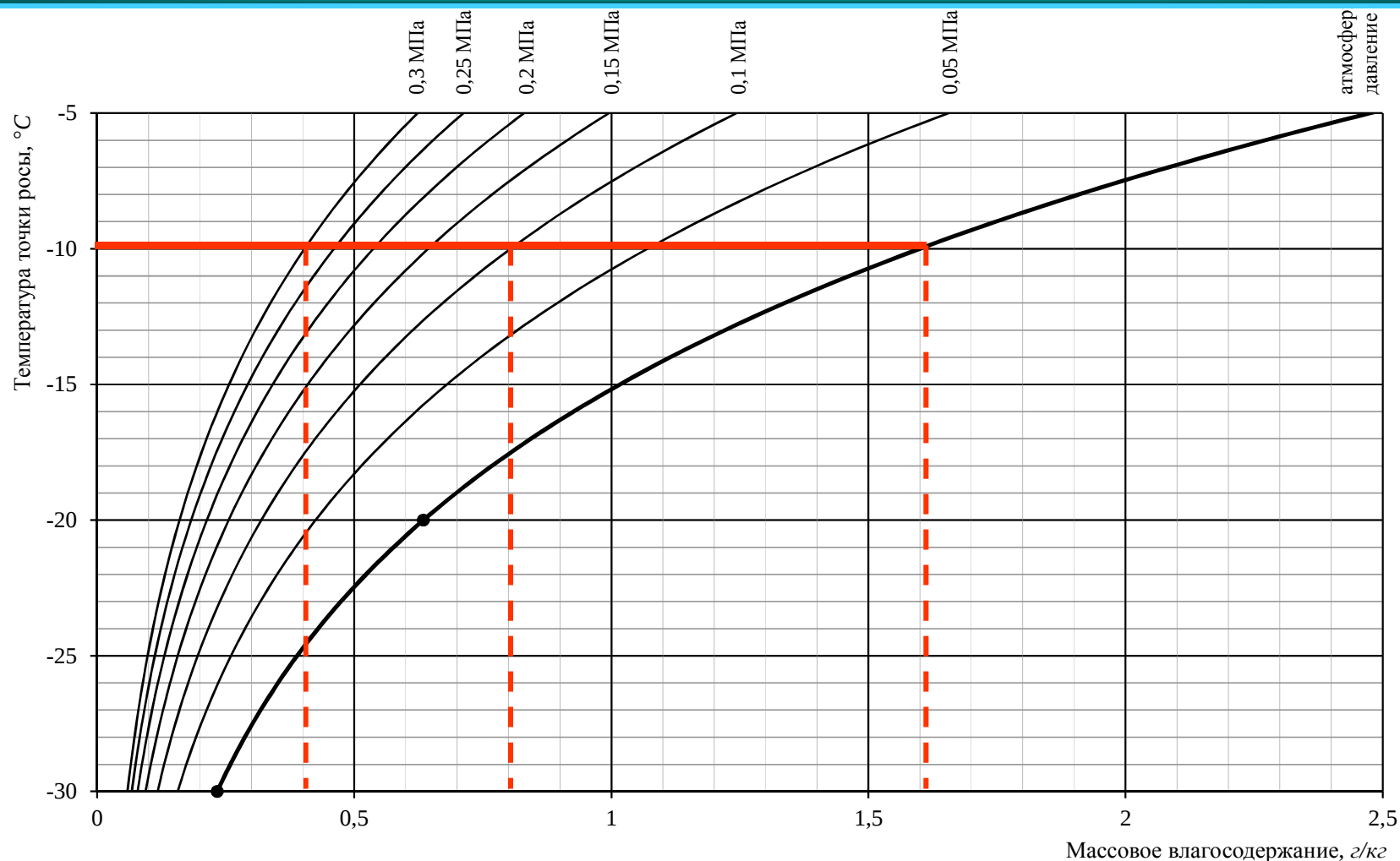
Влажный воздух

Для определения параметров влажного воздуха и для графической иллюстрации процессов влажного воздуха применяют h - d диаграмму.

Диаграмма построена для атмосферного воздуха давления $p=745$ мм.рт.ст., поэтому, если давление влажного воздуха отличается от этого, пользоваться диаграммой нельзя и следует пользоваться таблицами.



Влажный воздух



Зависимости ТТР насыщенного воздуха от его массового влагосодержания при различных давлениях

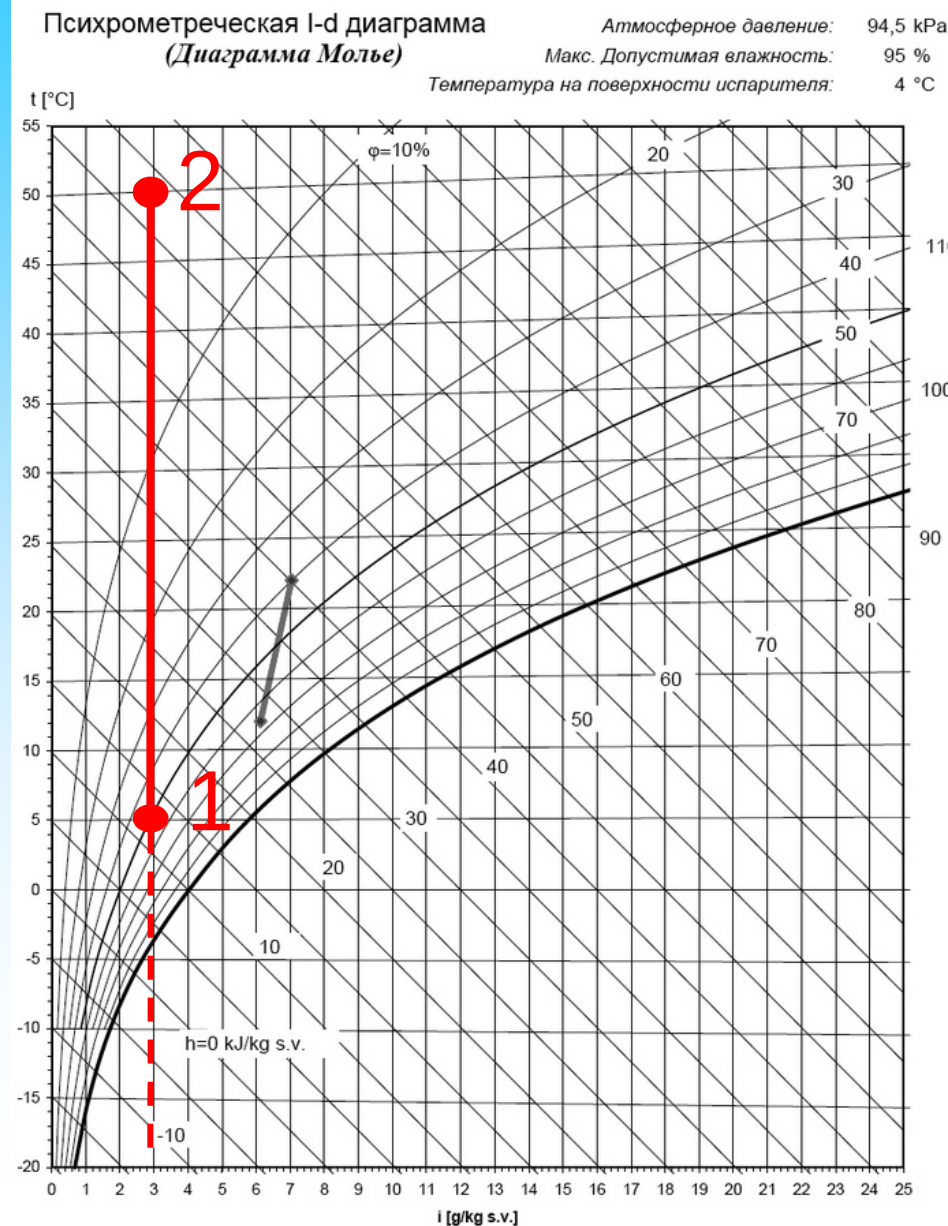
При одинаковой температуре максимальное влагосодержания воздуха увеличивается со снижением давления

Процессы во влажном воздухе

В процессе **изобарного** **нагрева:**

- Влагосодержание не изменяется ($d_1 = d_2$)
- Относительная влажность уменьшается ($\varphi_2 < \varphi_1$)
- Энтальпия увеличивается ($h_2 > h_1$)
- Теплота, необходимая для нагрева 1 кг сухого воздуха, равна

$$q = h_2 - h_1, \frac{\kappa_{Дж}}{\kappa_{с.в.}}$$



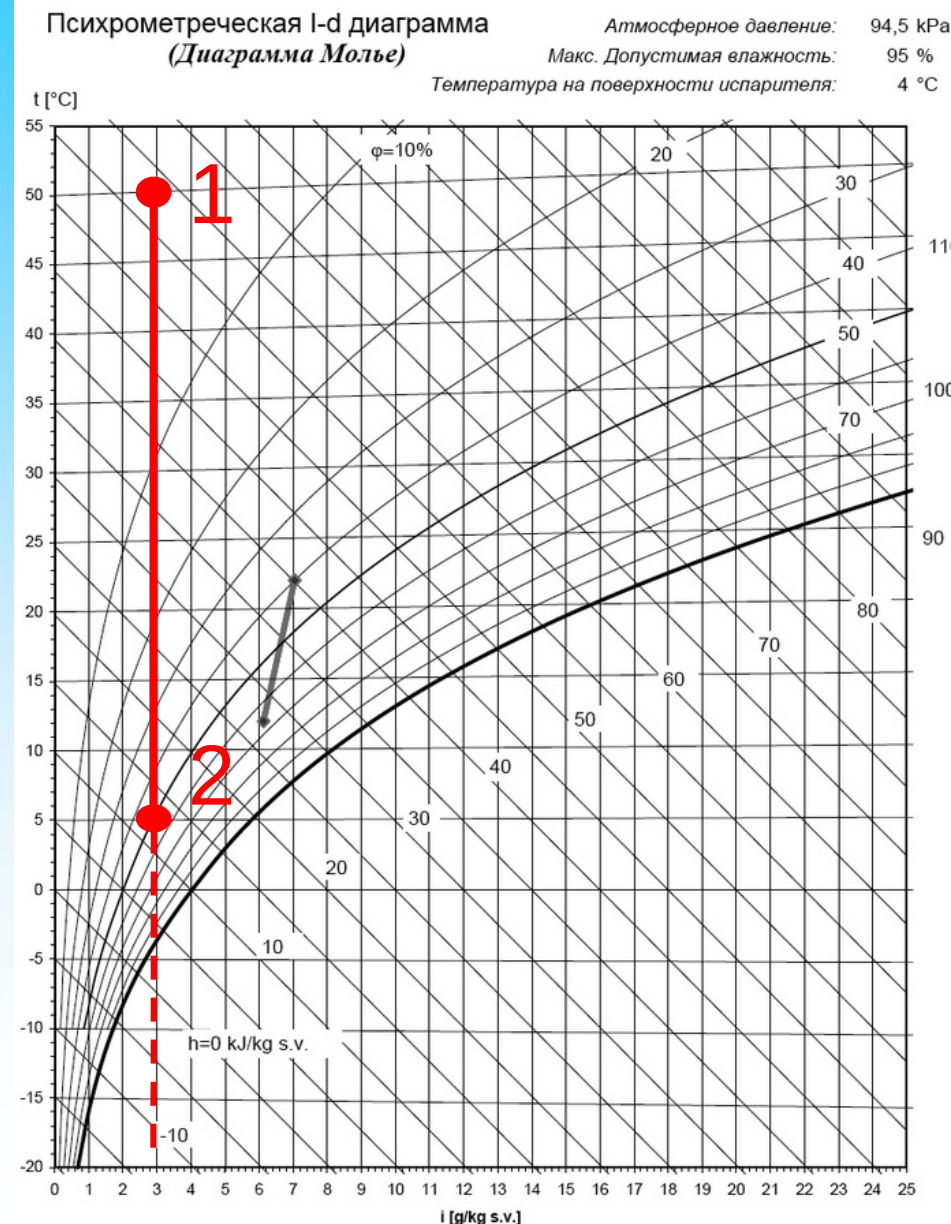
Процессы во влажном воздухе

Охлаждение воздуха

1 случай $t_2 > t_p$

- Влагосодержание не изменяется ($d_1 = d_2$)
- Относительная влажность увеличивается ($\phi_2 > \phi_1$)
- Энтальпия уменьшается ($h_2 < h_1$)
- Теплота, отводимая от воздуха

$$q = h_1 - h_2, \frac{\kappa_{Дж}}{\kappa_{\mathcal{E}_{с.в.}}}$$

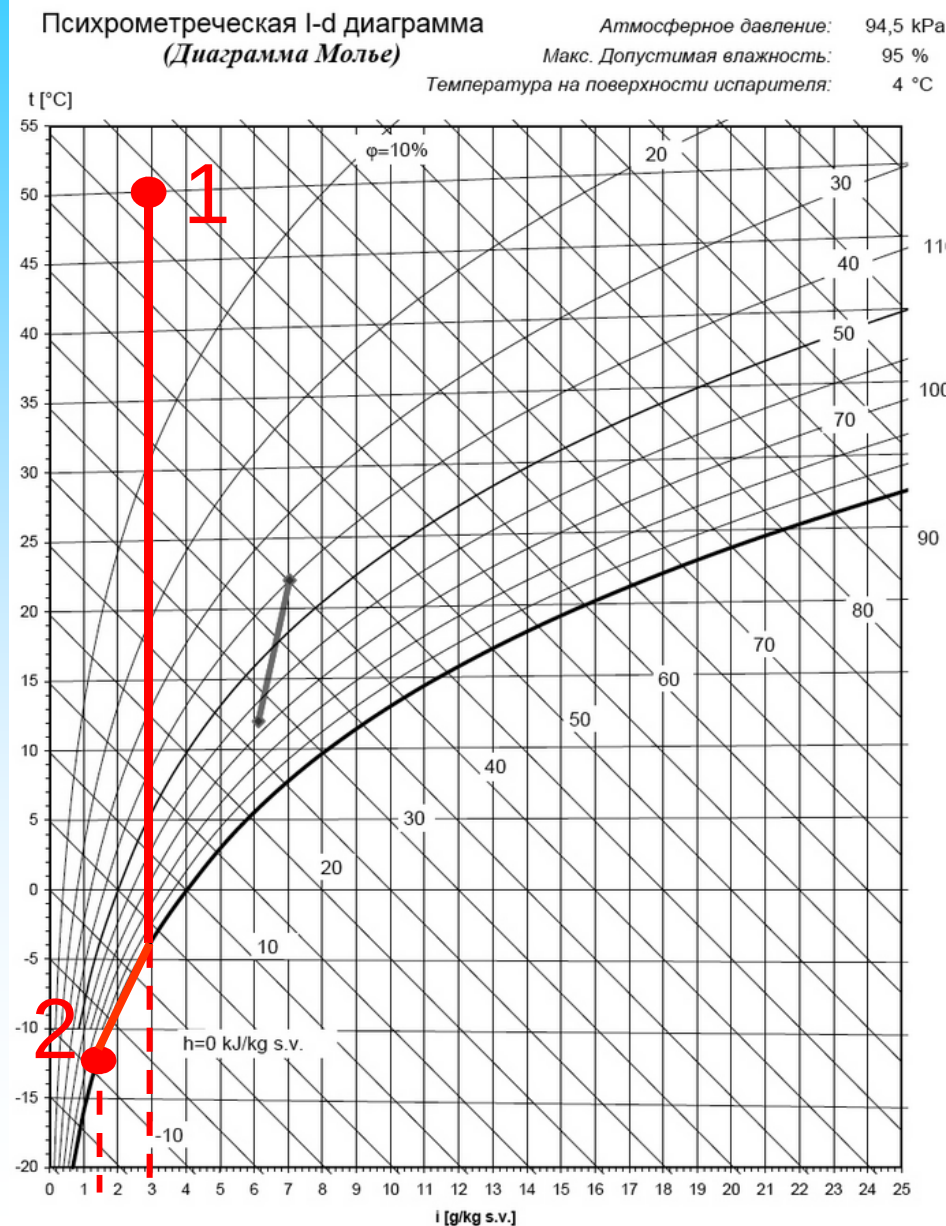


Процессы во влажном воздухе

2 случай $t_2 < t_p$

Если температура, до которой охлаждается воздух (t_2), меньше температуры точки росы (процесс 1-2), то воздух, достигнув состояния насыщения ($t = t_p$, $\phi = 100\%$), при дальнейшем понижении температуры будет оставаться насыщенным и из него будет выпадать влага, поскольку $d_2 < d_1$. Теплота, отводимая от воздуха

$$q = h_1 - h_2 + r \cdot (d_1 - d_2), \frac{\text{кДж}}{\text{кг с.в.}}$$



Процессы во влажном воздухе

Сушка материалов

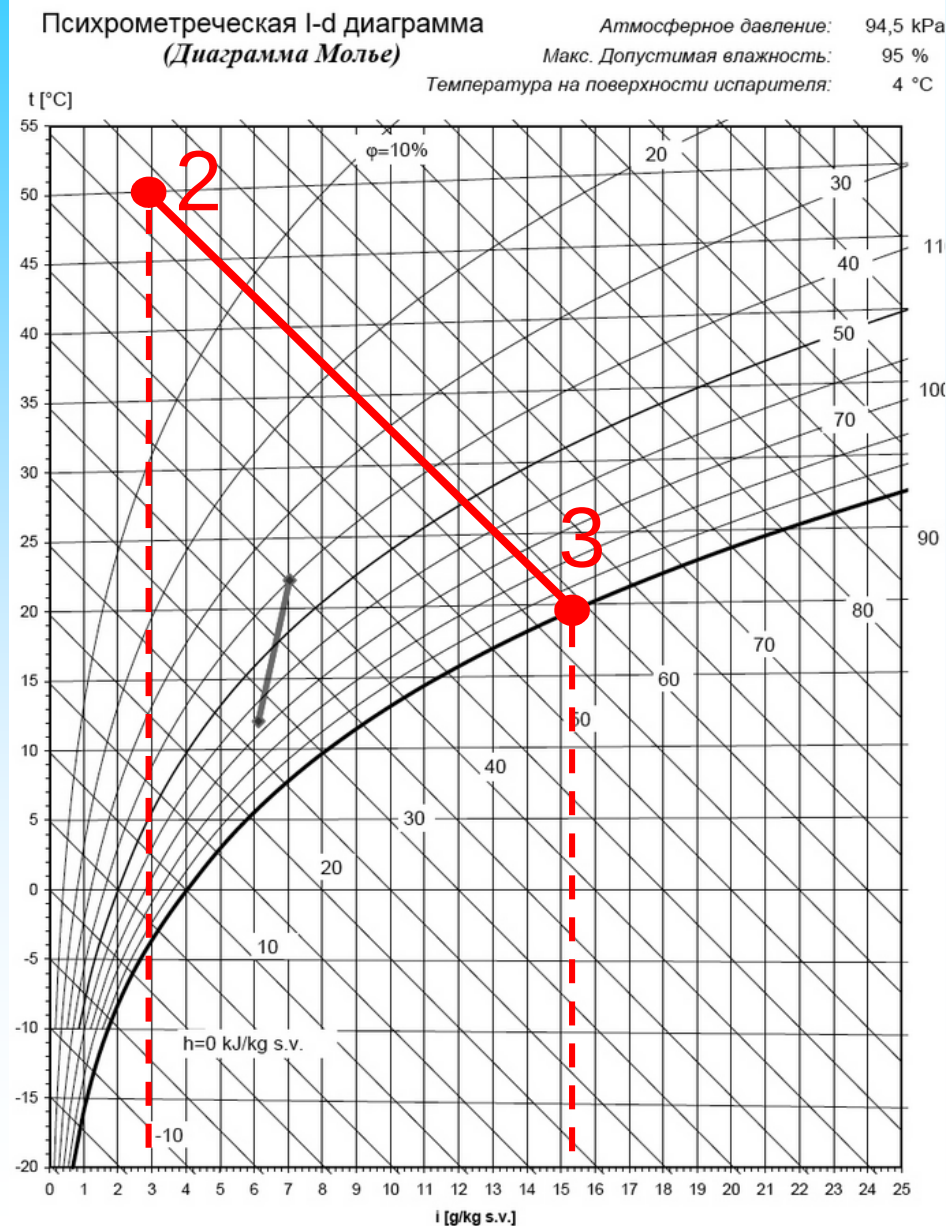
В процессе сушки различных материалов воздух является сушильным агентом, и чем выше его температура, а, следовательно, давление насыщения (p_s), тем больше он может поглотить влаги.

В процессе **сушки** воздухом:

- Энтальпия не изменяется ($h_2 = h_3$)
- Относительная влажность увеличивается ($\phi_3 > \phi_2$)
- Влагосодержание увеличивается ($d_3 > d_2$)
- Количество влаги, воспринятой воздухом:

$$M_{вл} = d_3 - d_2, \left[\frac{\kappa \mathcal{Z}_{пара}}{\kappa \mathcal{Z}_{с.в.}} \right]$$

$$G_{вл} = \frac{G_{воз} (d_3 - d_2)}{1 + d_2}, \left[\frac{\kappa \mathcal{Z}_{пара}}{c} \right]$$



Влажный воздух

Задание:

Воздух с параметрами t_1 и ϕ_1 охлаждают при постоянном давлении $p = 2$ бар до температуры t_2 . Температура t_2 меньше температуры точки росы ($t_2 < t_p$). Значения t_1 , ϕ_1 и t_2 даны в табл. 2.10 по вариантам.

Определить уменьшение влагосодержания воздуха ($d_1 > d_2$) и температуру точки росы t_p , а также отводимую теплоту q , кДж/кг с.в., в процессе охлаждения. Показать процесс охлаждения и изотерму t_p в hd -диаграмме.

Первая цифра шифра	$t_1, ^\circ\text{C}$	$\phi_1, \%$	Вторая цифра шифра	$t_2, ^\circ\text{C}$
0	45	62	0	10
1	47	66	1	8
2	50	70	2	6
3	53	73	3	4
4	60	77	4	6
5	65	81	5	8
6	40	90	6	10
7	46	88	7	12
8	55	78	8	14
9	70	95	9	9