


Тема №4 Влажный воздух

Вопрос 1. Основные понятия и определения

Газовую смесь, состоящую из сухого воздуха и водяного пара называют *влажным воздухом*.

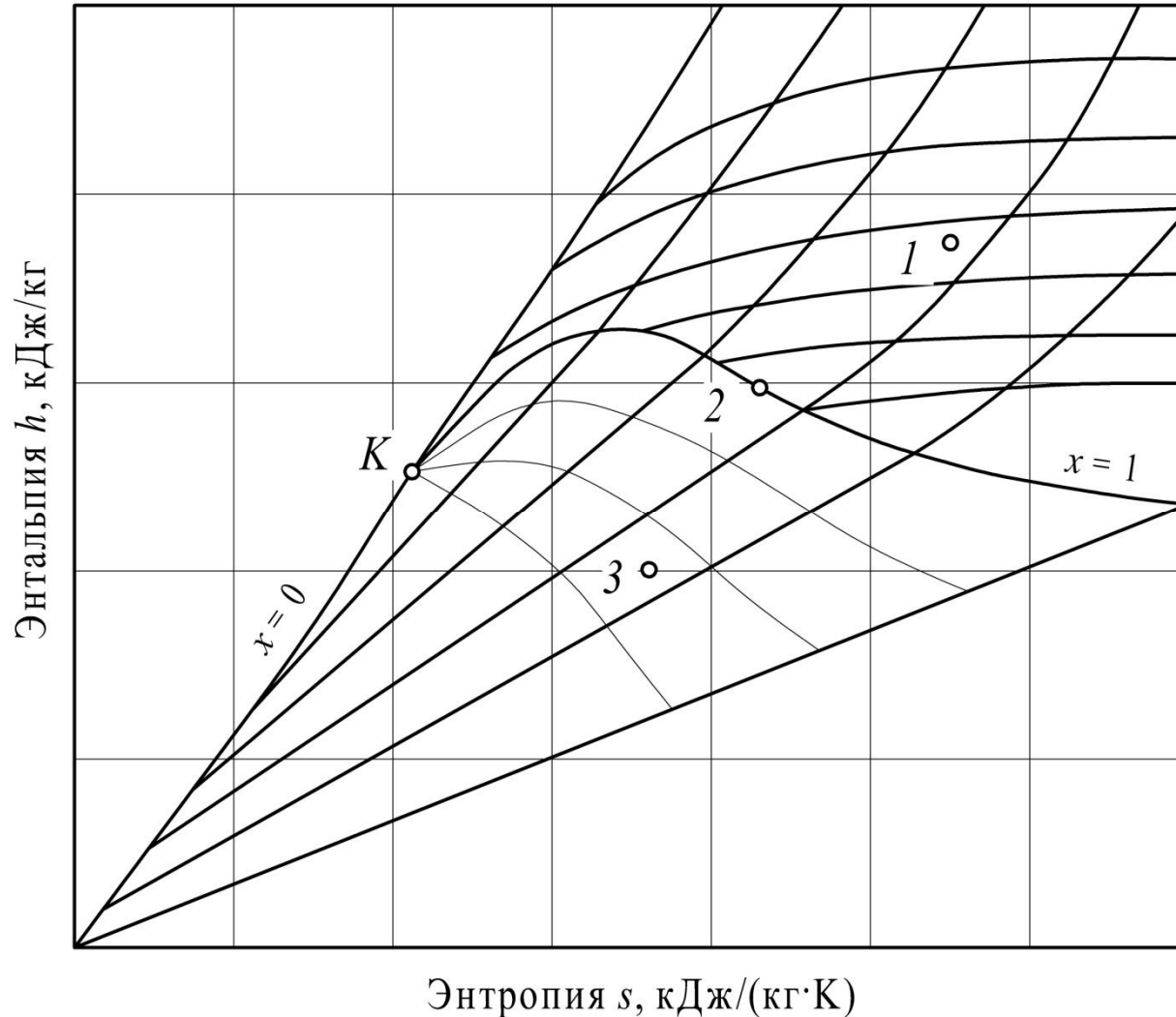



На основании закона Дальтона давление влажного воздуха (атмосферное давление) равно сумме парциальных давлений сухого воздуха и водяного пара

$$p = p_{\text{в}} + p_{\text{п}}.$$

Водяной пар во влажном воздухе может находиться в одном из трёх состояний, характеризующихся точками 1, 2 и 3 на рисунке.

Основные состояния водяного пара во влажном воздухе в hs -диаграмме.





Точка 1 – водяной пар находится в воздухе в виде перегретого пара.


Такой воздух является ненасыщенным влагой и может поглотить еще какое-то её количество, т.е. может использоваться для сушки.

Для такого пара

$$v_{\text{п}} > v_{\text{н}}; \quad \rho_{\text{п}} < \rho_{\text{н}}; \quad p_{\text{п}} < p_{\text{н}},$$

где $v_{\text{п}}$, $\rho_{\text{п}}$ и $p_{\text{п}}$ – удельный объём, плотность и парциальное давление пара во влажном воздухе;

$v_{\text{н}}$, $\rho_{\text{н}}$ и $p_{\text{н}}$ – удельный объём, плотность и парциальное давление насыщенного пара во влажном воздухе.




Точка 2 – водяной пар находится в воздухе
в виде сухого насыщенного пара.
Такой воздух полностью насыщен влагой.



Для такого пара

$$v_{\text{п}} = v_{\text{н}}; \quad \rho_{\text{п}} = \rho_{\text{н}}; \quad p_{\text{п}} = p_{\text{н}}.$$

Температура, до которой необходимо охладить ненасыщенный влажный воздух, чтобы содержащийся в нём перегретый пар стал сухим насыщенным, называется *точкой росы* и обозначается t_p .




Точка 3 – водяной пар находится в воздухе в виде влажного насыщенного пара.

Такой воздух перенасыщен влагой и часть влаги находится в нём в виде мельчайших капелек.



В этом случае

$$v_{\Pi} < v_{\text{H}}; \quad \rho_{\Pi} > \rho_{\text{H}}; \quad p_{\Pi} = p_{\text{H}}.$$




Масса водяного пара, содержащегося в 1 м³ влажного воздуха, называется *абсолютной влажностью* воздуха.

Или абсолютная влажность равна плотности водяного пара $\rho_{\text{п}}$ во влажном воздухе.

Отношение абсолютной влажности ненасыщенного воздуха к абсолютной влажности насыщенного воздуха при той же температуре называется *относительной влажностью* и обозначается φ

$$\varphi = \frac{\rho_{\text{п}}}{\rho_{\text{н}}}.$$



Относительная влажность может
выражаться в долях единицы или в процентах
и изменяться в пределах

от $\varphi = 0$ (0 %) (сухой воздух)

до $\varphi = 1$ (100 %) (воздух, насыщенный
влажностью).

На основании уравнения Клапейрона
можно записать

$$p_{\text{п}} = R_{\text{п}} \rho_{\text{п}} T; \quad p_{\text{н}} = R_{\text{п}} \rho_{\text{н}} T,$$

тогда отношение плотностей в предыдущем
выражении можно заменить отношением
давлений

$$\varphi = \frac{p_{\text{п}}}{p_{\text{н}}}.$$

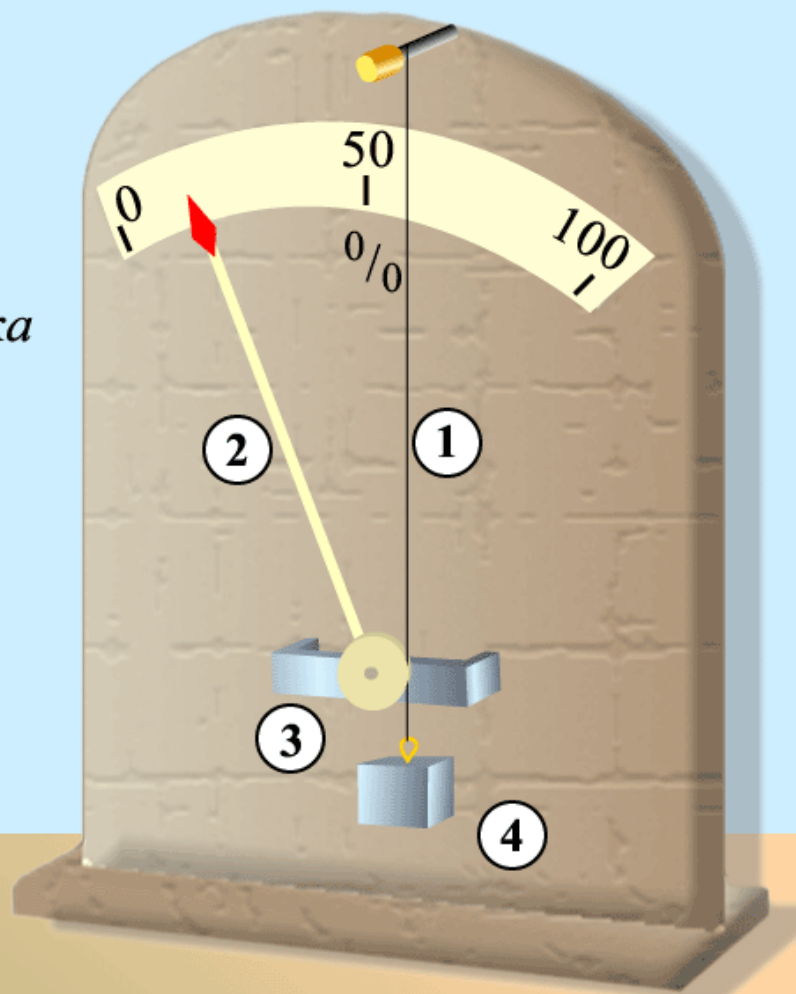


Приборы для измерения относительной влажности воздуха

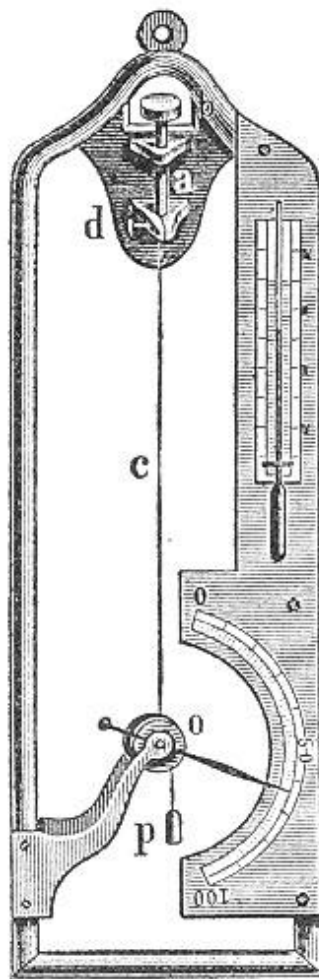
Приборы для измерения относительной влажности воздуха

Волосяной гигрометр

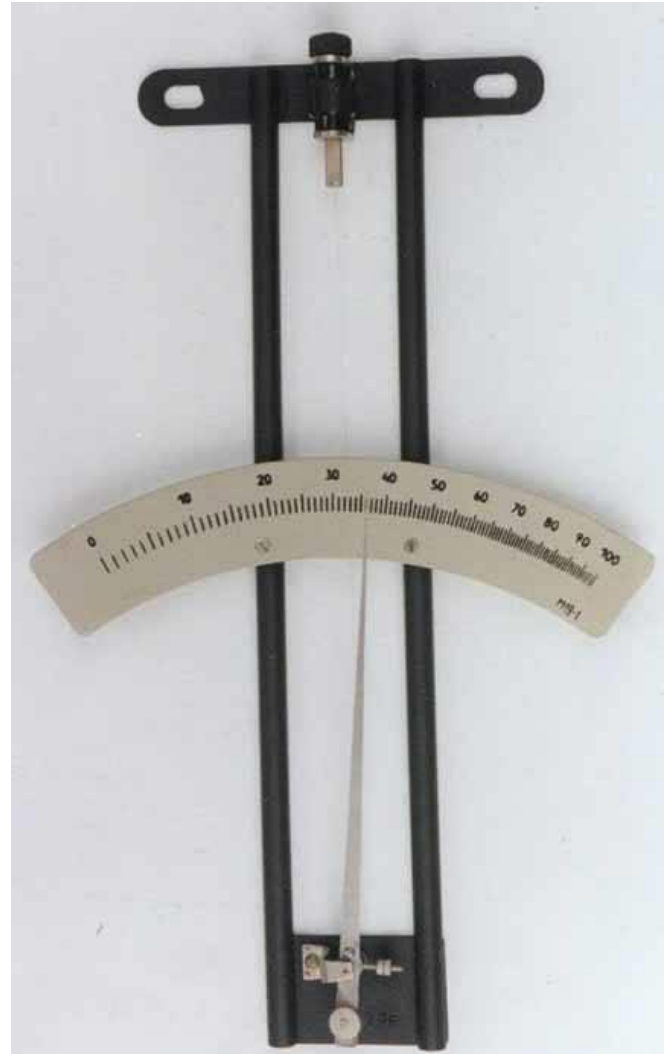
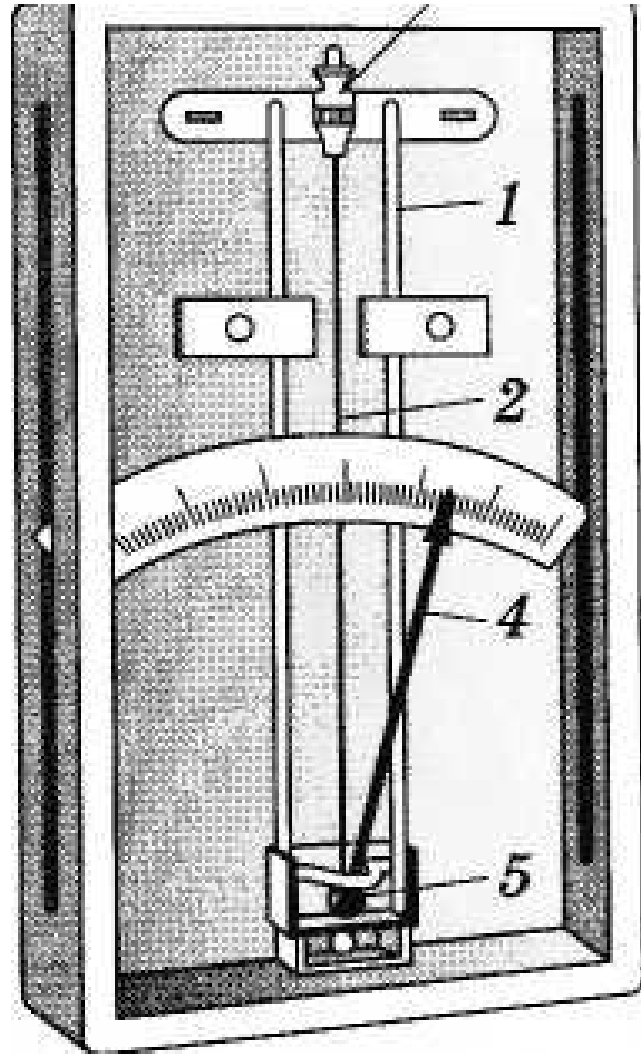
- 1 – волос
- 2 – стрелка
- 3 – ролик
- 4 – груз



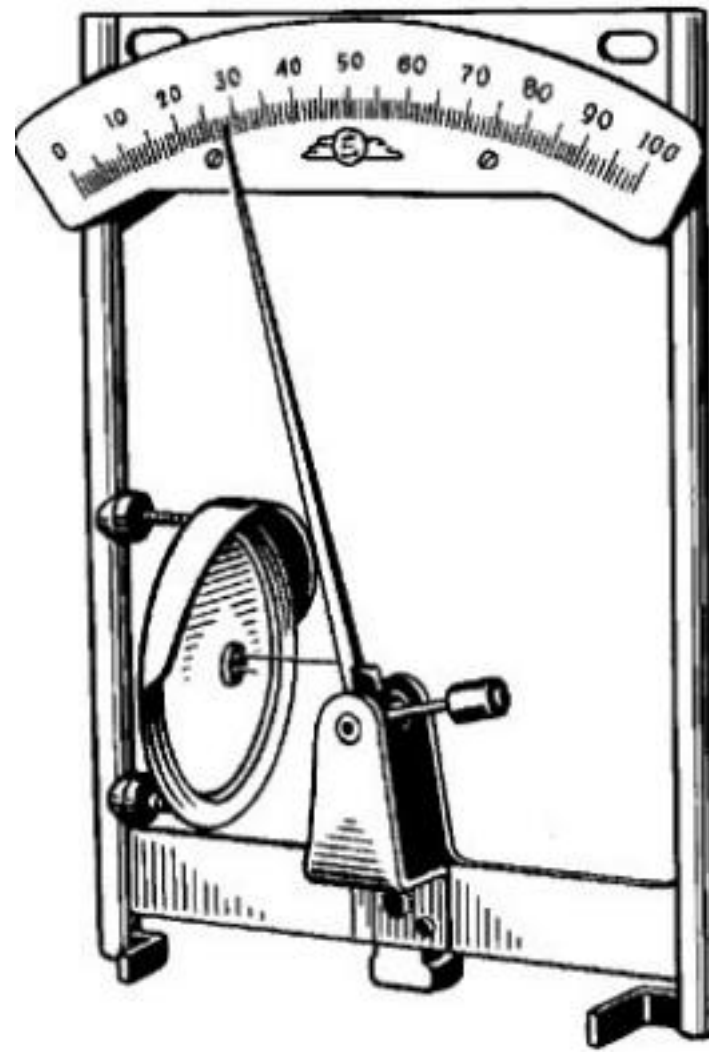
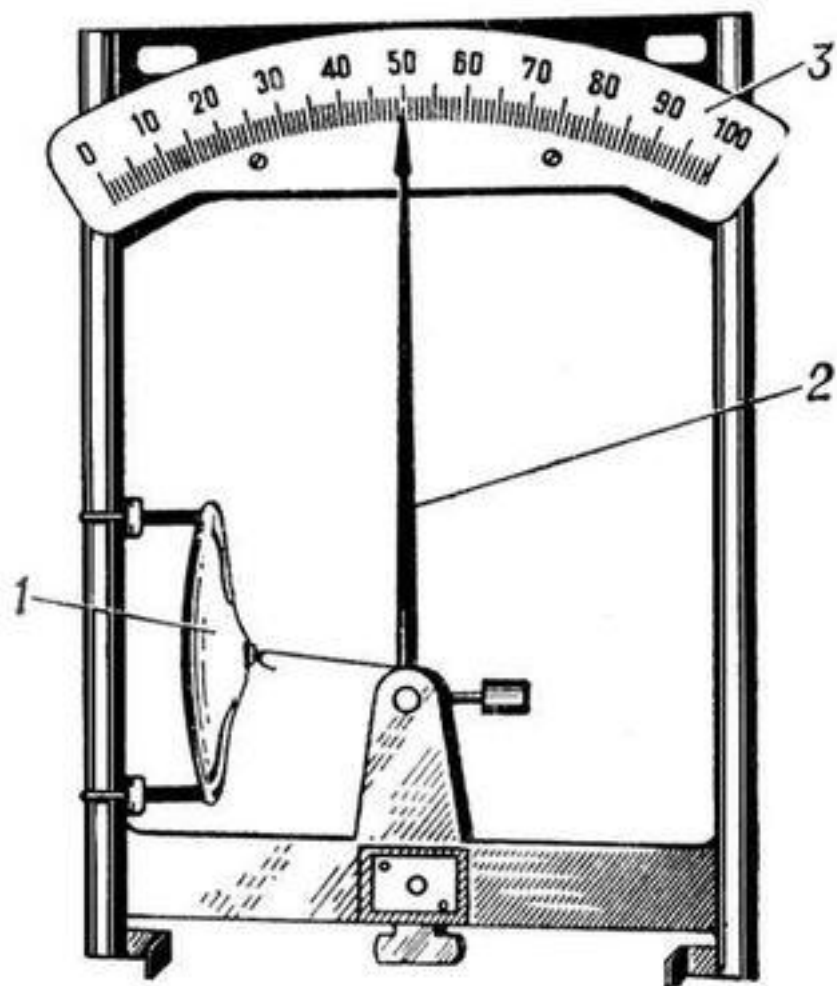
Волосяной гигрометр Г. Соссюра (1783 г.)



Волосяной гигрометр

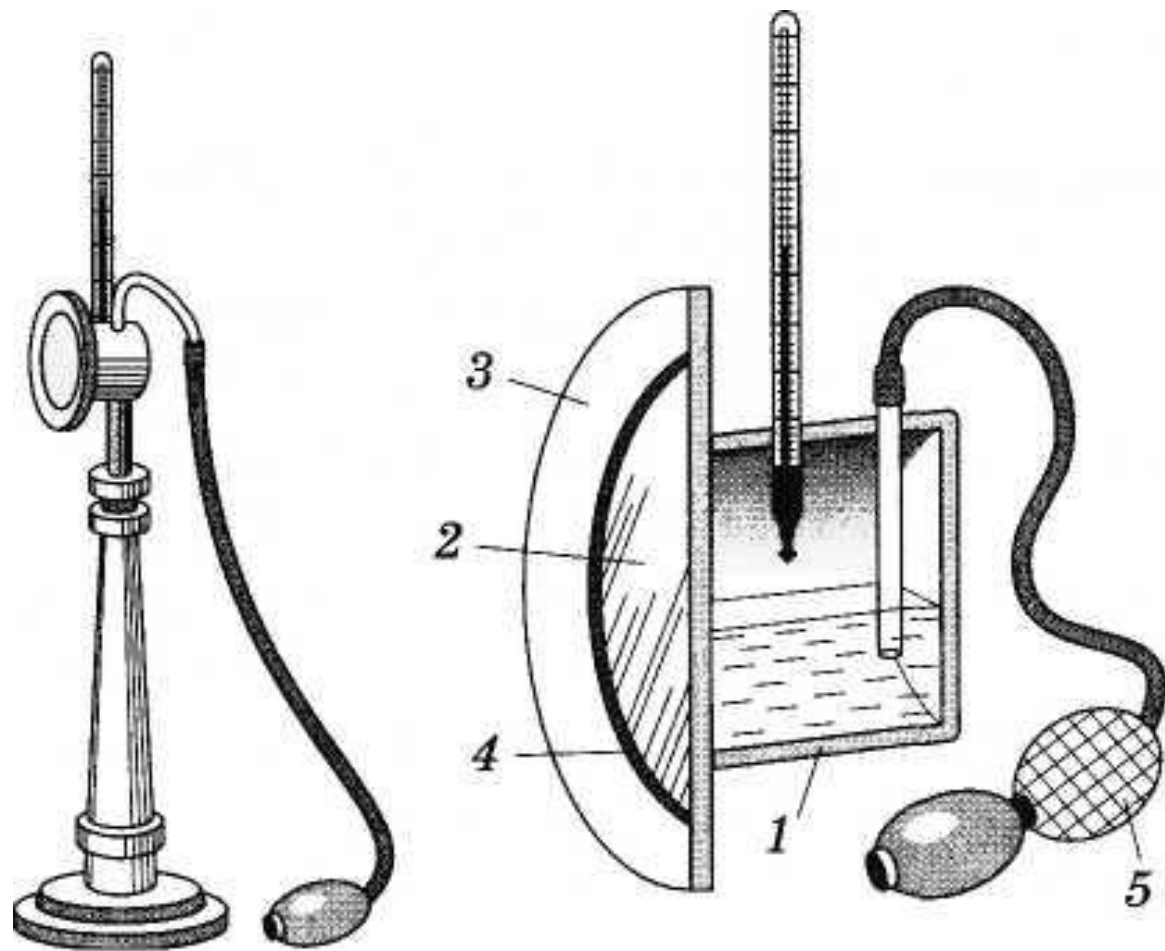


Пленочный гигрометр

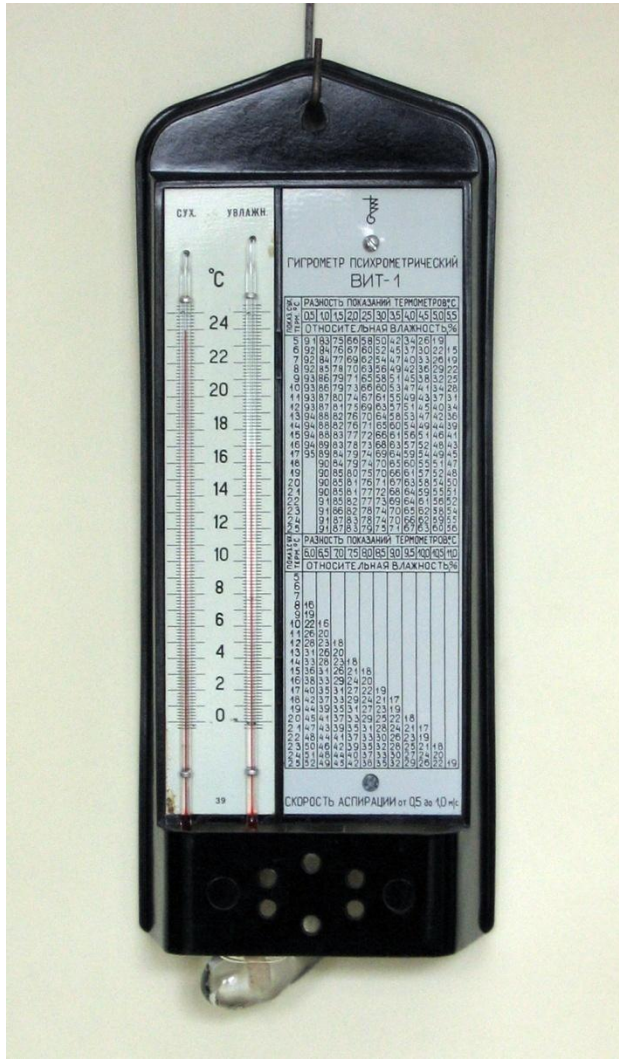


Конденсационный гигрометр Ламбрехта

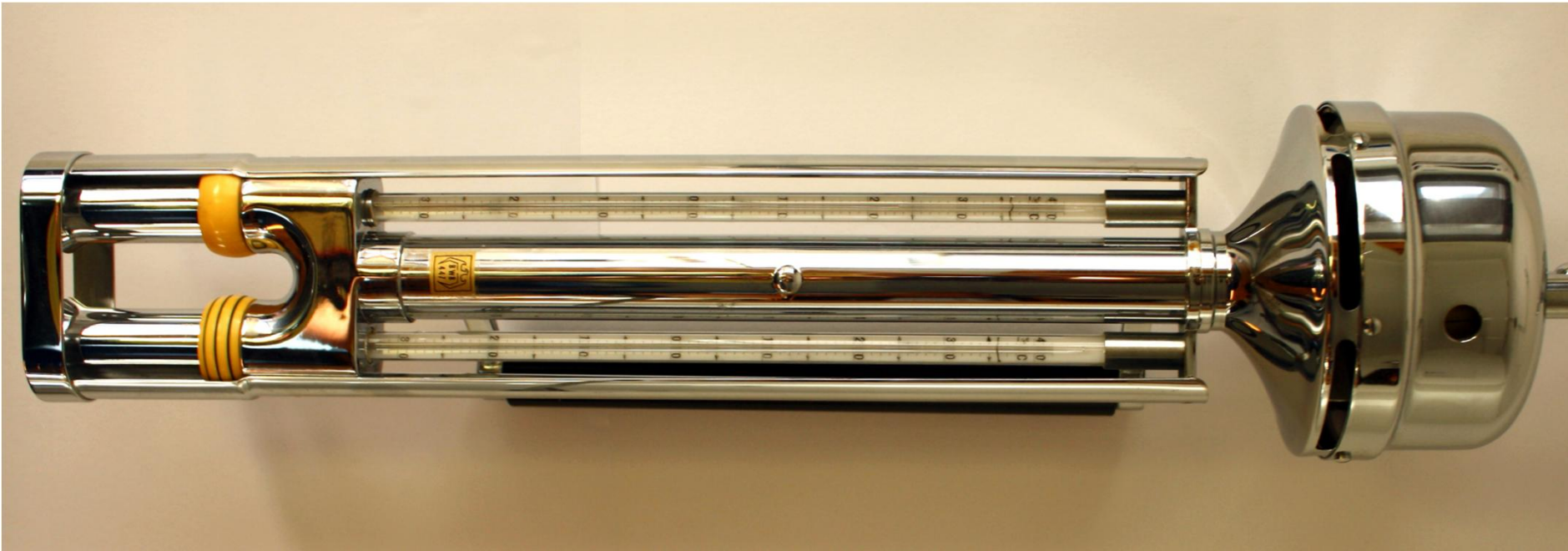
1. Металлическая коробочка
2. Передняя стенка
3. Кольцо
4. Теплоизолирующая прокладка
5. Резиновая груша
6. Термометр



Гигрометр психрометрический (психрометр Августа, 1867 г.)



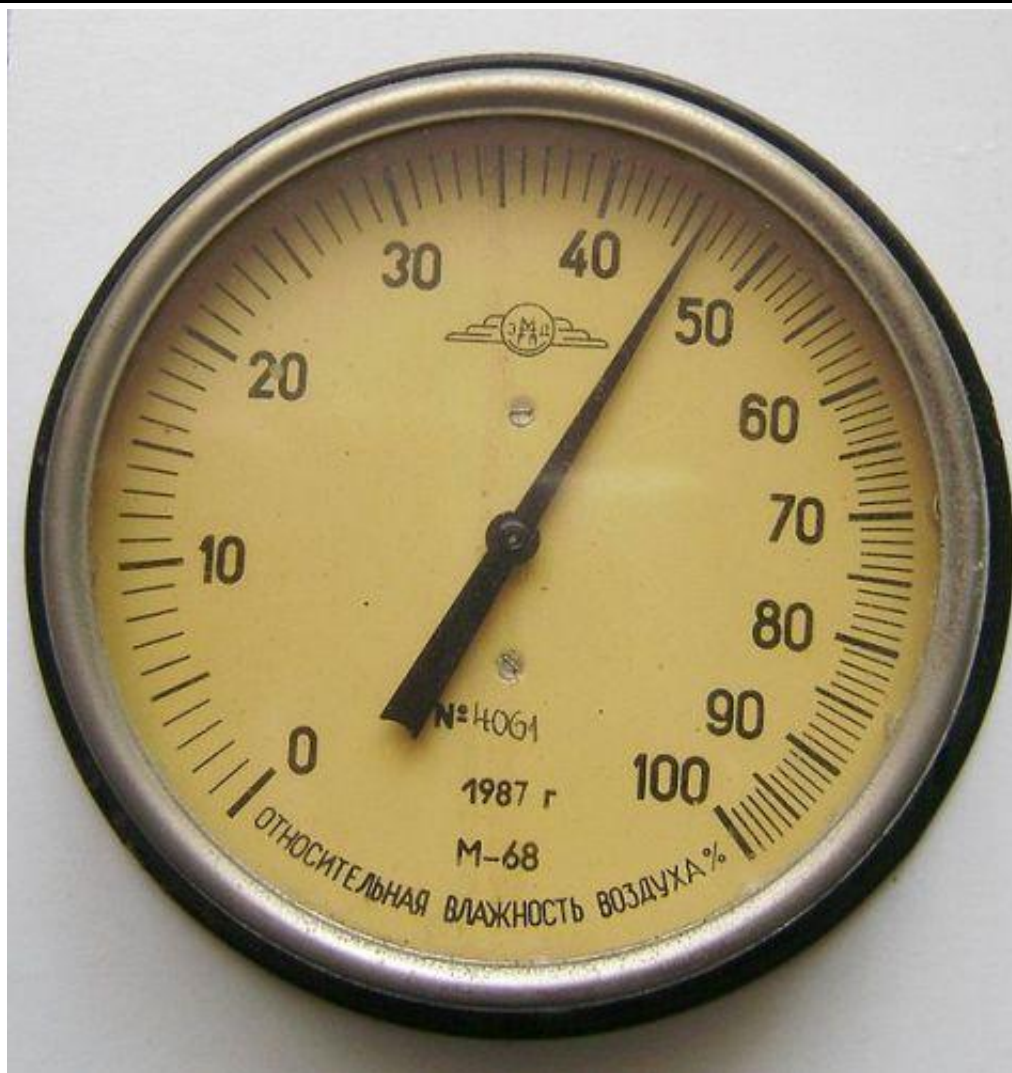
Аспирационный психрометр Ассмана



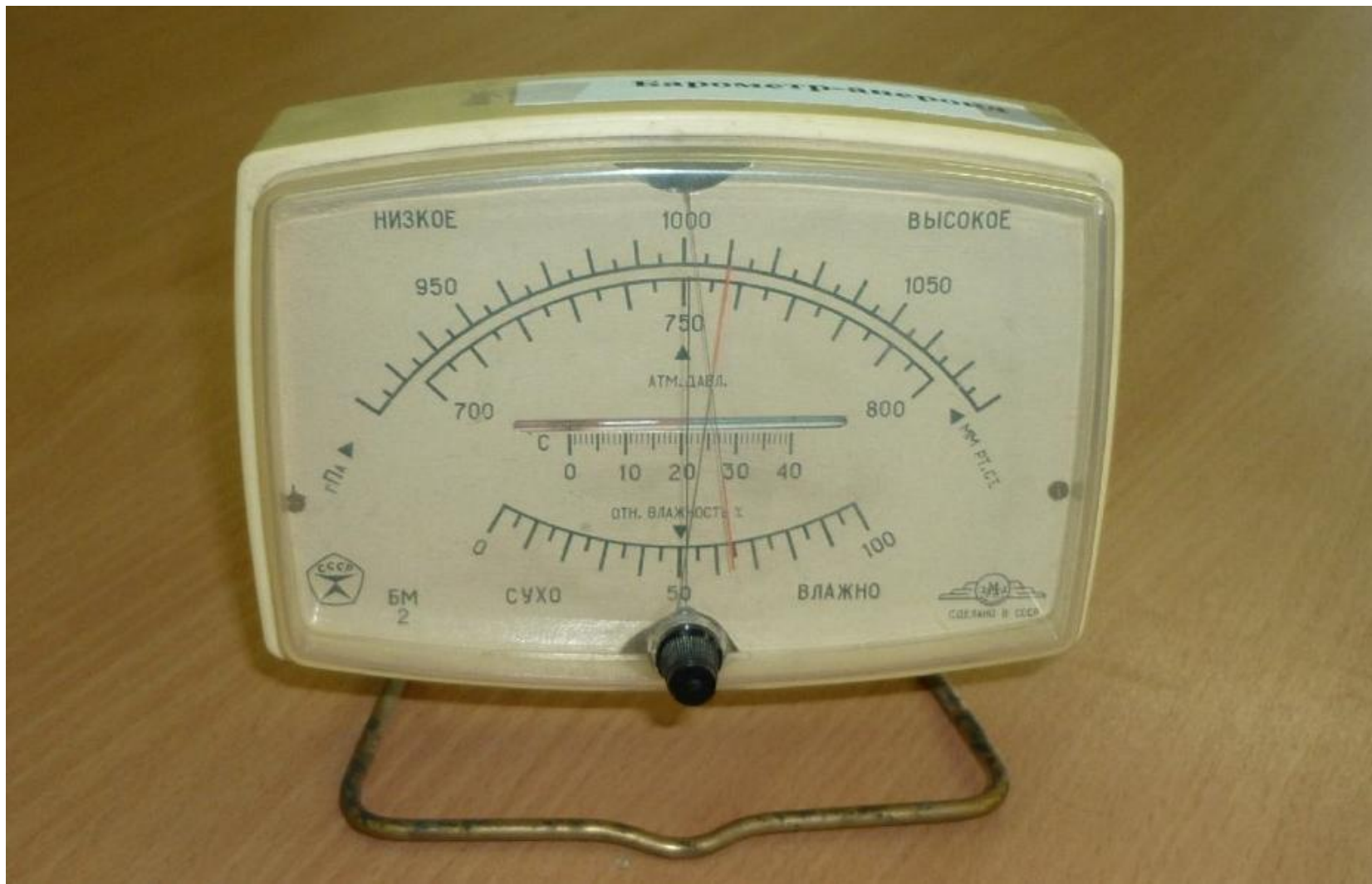
Психрометрическая таблица

Показания сухого термометра, °C	Разность показаний сухого и влажного термометров, °C										
	0	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
	Относительная влажность, %										
12	100	89	78	68	57	48	38	29	20	11	-
13	100	89	79	69	59	49	40	31	23	14	6
14	100	89	79	70	60	51	42	34	25	17	9
15	100	90	80	71	61	52	44	36	27	20	12
16	100	90	81	71	62	54	46	37	30	22	15
17	100	90	81	72	64	55	47	39	32	24	17
18	100	91	82	73	65	56	49	41	34	27	20
19	100	91	82	74	65	58	50	43	35	29	22
20	100	91	83	74	66	59	51	44	37	30	24
21	100	91	83	75	67	60	52	46	39	32	26
22	100	92	83	76	68	61	54	47	40	34	28
23	100	92	84	76	69	61	55	48	42	36	30
24	100	92	84	77	69	62	56	49	43	37	31
25	100	92	84	77	70	63	57	50	44	38	33

Гигрометр



Баротермогигрометр



Баротермогигрометр




Баротермогигрометр



Отношение массы пара $m_{\text{п}}$, находящегося во влажном воздухе, к массе содержащегося в нём сухого воздуха $m_{\text{в}}$ называется *влажностью воздуха* и обозначается d

$$d = \frac{m_{\text{п}}}{m_{\text{в}}},$$

т.е. это количество водяного пара, содержащееся в 1 кг сухого воздуха.



Влагосодержание может быть выражено в граммах на килограмм сухого воздуха (г/кг) или в килограммах на килограмм сухого воздуха (кг/кг).


Влагосодержание d можно определить, разделив почленно уравнения состояния для сухого воздуха

$$p_{\text{в}}V = m_{\text{в}}R_{\text{в}}T,$$

и водяного пара

$$p_{\text{п}}V = m_{\text{п}}R_{\text{п}}T,$$

находящихся в V м³ влажного воздуха.



$$\frac{p_{\text{B}}}{p_{\text{II}}} = \frac{m_{\text{B}} R_{\text{B}}}{m_{\text{II}} R_{\text{II}}}$$

$$\frac{p_{\text{B}}}{p_{\text{II}}} = \frac{m_{\text{B}} R_{\text{B}}}{m_{\text{II}} R_{\text{II}}} = \frac{1}{d} \cdot \frac{287}{461}$$

$$\frac{p_B}{p_{\Pi}} = \frac{m_B R_B}{m_{\Pi} R_{\Pi}} = \frac{1}{d} \cdot \frac{287}{461} = \frac{0,622}{d},$$

$$\frac{p_{\text{B}}}{p_{\text{П}}} = \frac{m_{\text{B}} R_{\text{B}}}{m_{\text{П}} R_{\text{П}}} = \frac{1}{d} \cdot \frac{287}{461} = \frac{0,622}{d},$$

откуда

$$d = 0,622 \frac{p_{\text{П}}}{p_{\text{B}}}$$


$$\frac{p_{\text{B}}}{p_{\text{П}}} = \frac{m_{\text{B}} R_{\text{B}}}{m_{\text{П}} R_{\text{П}}} = \frac{1}{d} \cdot \frac{287}{461} = \frac{0,622}{d},$$

откуда

$$d = 0,622 \frac{p_{\text{П}}}{p_{\text{B}}} = 0,622 \frac{\varphi \cdot p_{\text{H}}}{p - \varphi \cdot p_{\text{H}}}.$$

Влагосодержание d зависит от относительной влажности φ и парциального давления насыщенного пара p_H , которые, в свою очередь, зависят от температуры.

Так, например, при температуре $t = 0^\circ \text{C}$ парциальное давление насыщенного пара составляет $p_H = 611 \text{ Па}$, а при $t = 20^\circ \text{C}$ – $p_H = 2330 \text{ Па}$.



При температуре $t = 100^\circ \text{C}$ парциальное давление насыщенного пара составляет $p_{\text{H}} = 101325 \text{ Па}$.

Вопрос 2. Плотность, энтальпия и газовая постоянная влажного воздуха

Плотность влажного воздуха может быть найдена, как сумма плотностей сухого воздуха и пара

$$\rho = \rho_{\text{в}} + \rho_{\text{п}}.$$

Плотность сухого воздуха

$$\rho_{\text{в}} = \frac{1}{\nu_{\text{в}}},$$

а удельный объём

$$\rho_{\text{в}} = \frac{p_{\text{в}}}{R_{\text{в}}T} = \frac{p - \varphi \cdot p_{\text{н}}}{R_{\text{в}}T}.$$

Плотность водяного пара

$$\rho_{\text{п}} = \varphi \cdot \rho''.$$

Тогда окончательно получим

$$\rho = \frac{p - \varphi \cdot p_{\text{H}}}{R_{\text{В}} T} + \varphi \cdot \rho''.$$

Энтальпия влажного воздуха определяется как сумма энтальпий сухого воздуха и водяного пара

$$h = h_{\text{В}} + h_{\text{П}} \cdot d.$$



Энтальпия сухого воздуха равна

$$h_{\text{в}} = C_p \cdot t$$



Энтальпия сухого воздуха равна

$$h_{\text{в}} = C_p \cdot t = 1,005 \cdot t$$



Энтальпия сухого воздуха равна

$$h_{\text{в}} = C_p \cdot t = 1,005 \cdot t \approx t,$$



Энтальпия сухого воздуха равна

$$h_{\text{в}} = C_p \cdot t = 1,005 \cdot t \approx t,$$

а энтальпия водяного пара

$$h_{\text{п}} = 2490 + 1,93 \cdot t,$$

Энтальпия сухого воздуха равна


$$h_{\text{в}} = C_p \cdot t = 1,005 \cdot t \approx t,$$

а энтальпия водяного пара

$$h_{\text{п}} = 2490 + 1,93 \cdot t,$$

где 2490 – теплота парообразования, кДж/кг;

1,93 – теплоёмкость водяного пара,
кДж/кг·К.



Тогда для энтальпии влажного воздуха окончательно получим

$$h = t + (2490 + 1,93 \cdot t) \cdot d.$$

Газовая постоянная влажного воздуха может быть найдена из выражения

$$R = \frac{8314}{\mu_{\text{см}}}.$$



Молярная масса влажного воздуха $\mu_{\text{см}}$

$$\mu_{\text{см}} = \sum \mu_i r_i,$$

где объёмную долю i -го компонента r_i
выразим из зависимости

$$p_i = p \cdot r_i, \quad \text{откуда} \quad r_i = \frac{p_i}{p}.$$

Тогда молярная масса влажного воздуха

$$\mu_{\text{см}} = \mu_{\text{в}} \frac{p_{\text{в}}}{p} + \mu_{\text{п}} \frac{p_{\text{п}}}{p}$$

Тогда молярная масса влажного воздуха

$$\mu_{\text{см}} = \mu_{\text{в}} \frac{p_{\text{в}}}{p} + \mu_{\text{п}} \frac{p_{\text{п}}}{p} = 29 \frac{p - p_{\text{п}}}{p} + 18 \frac{p_{\text{п}}}{p},$$

ИЛИ

$$\mu_{\text{см}} = 29 - 11 \frac{\varphi p_{\text{н}}}{p},$$


а газовая постоянная влажного воздуха

$$R = \frac{8314}{29 - 11 \frac{\varphi p_H}{p}}.$$



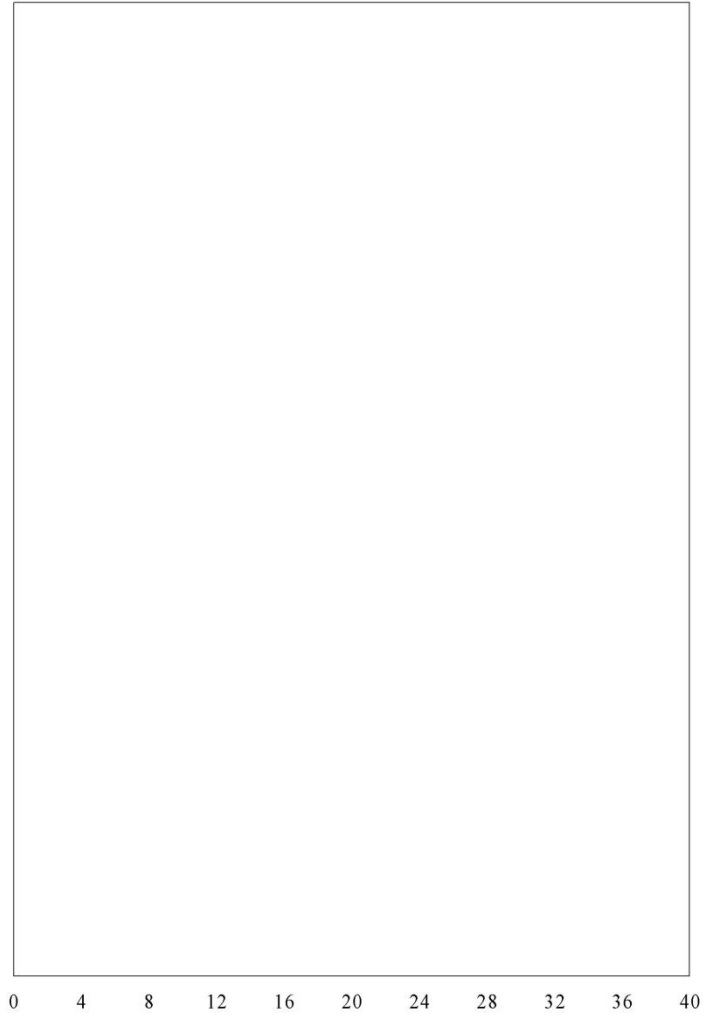
Вопрос 3. *h_d*-диаграмма и основные процессы влажного воздуха


Для определения параметров влажного воздуха графическим методом используют *h_d*-диаграмму, предложенную профессором Л.К. Рамзиным в 1918 г.



На диаграмме по оси абсцисс отложены значения влагосодержания d (г/кг), а по оси ординат – энтальпии h (кДж/кг).



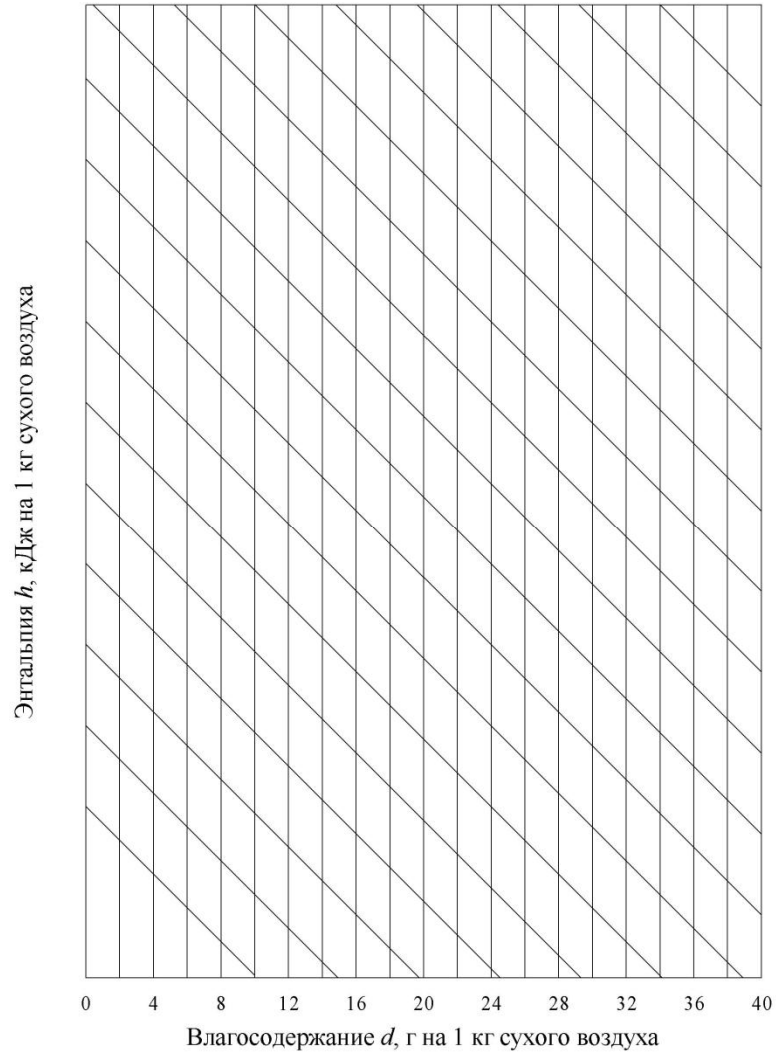




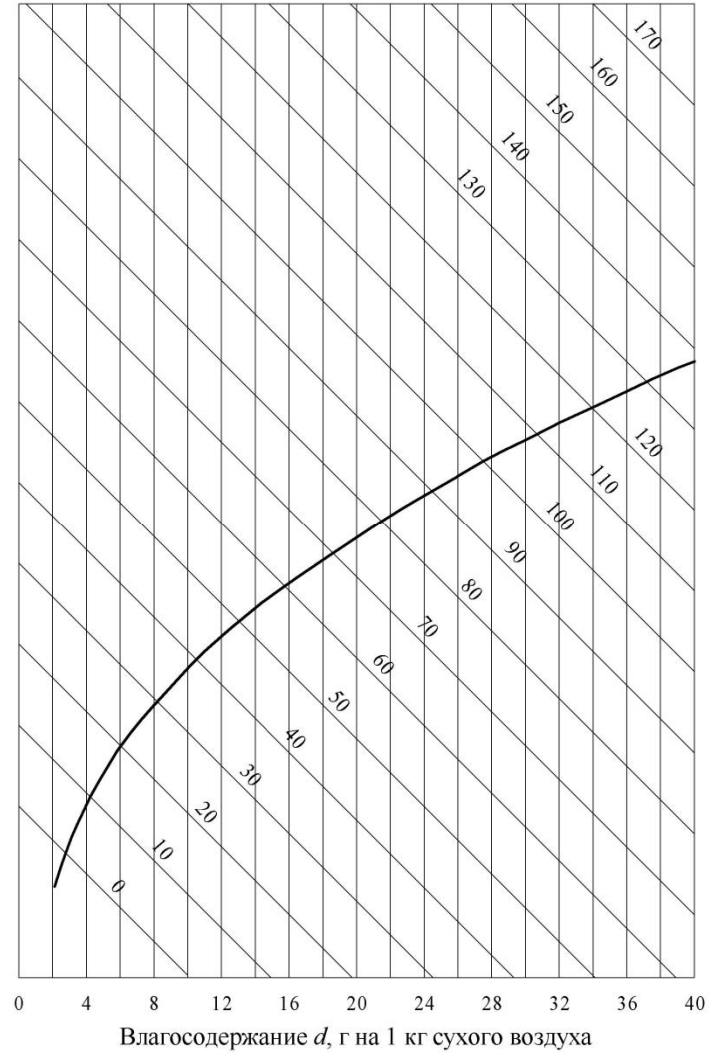
Линии постоянного влагосодержания представляют собой вертикальные прямые, а линии постоянной энтальпии – прямые, расположенные под углом 135° к оси ординат.



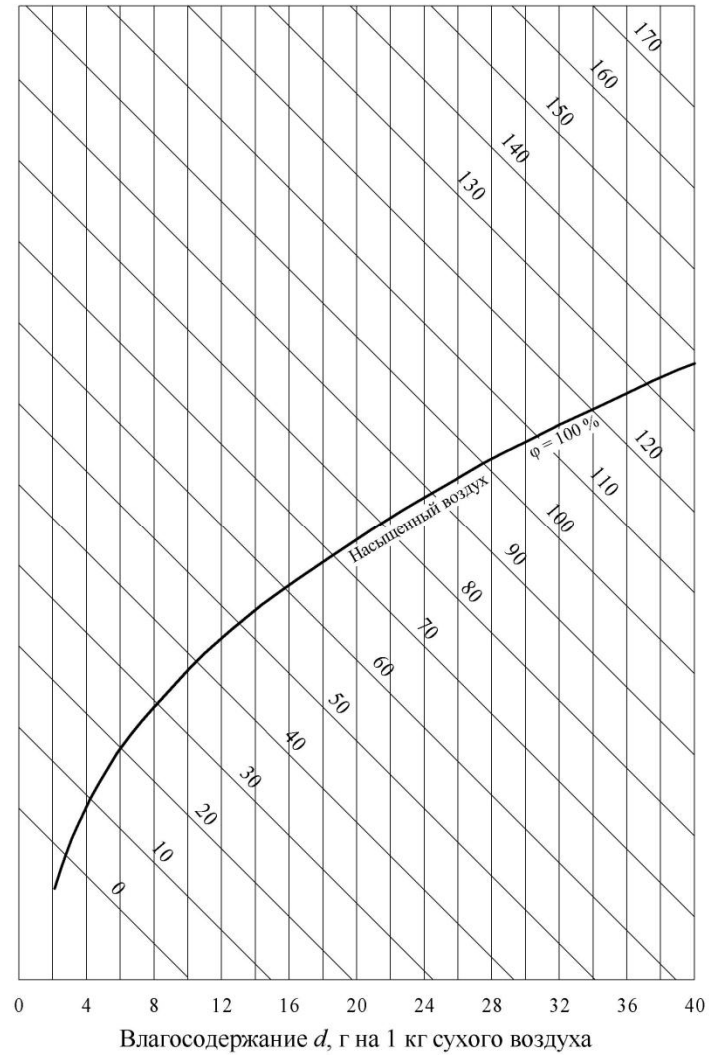
Влажосодержание d , г на 1 кг сухого воздуха



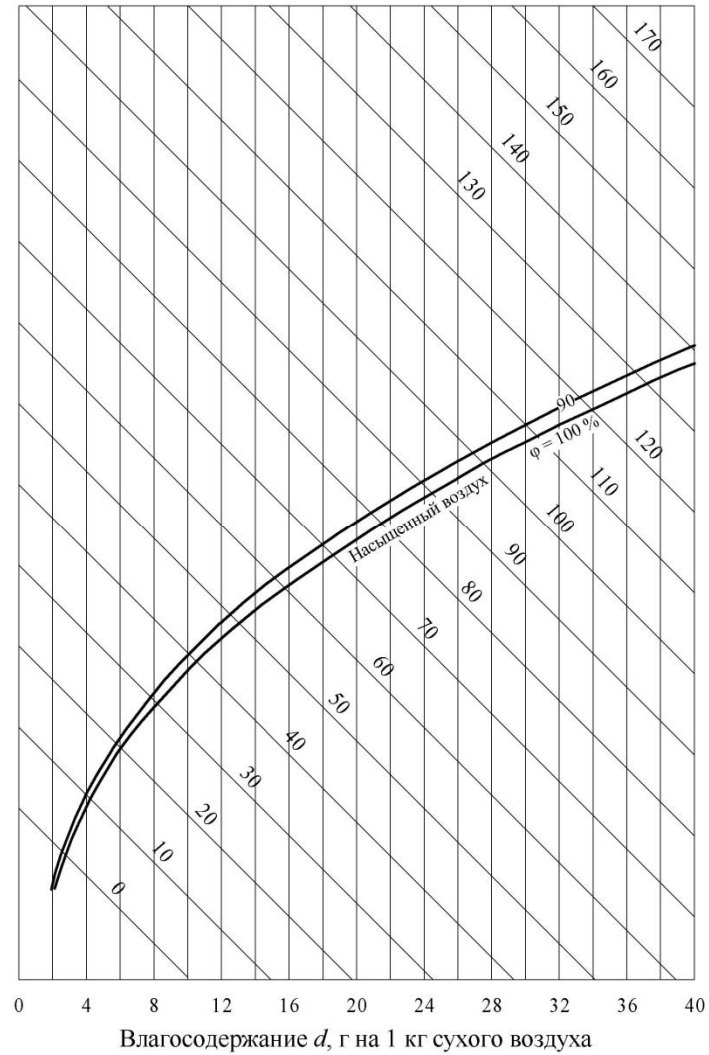
Энтальпия h , кДж на 1 кг сухого воздуха



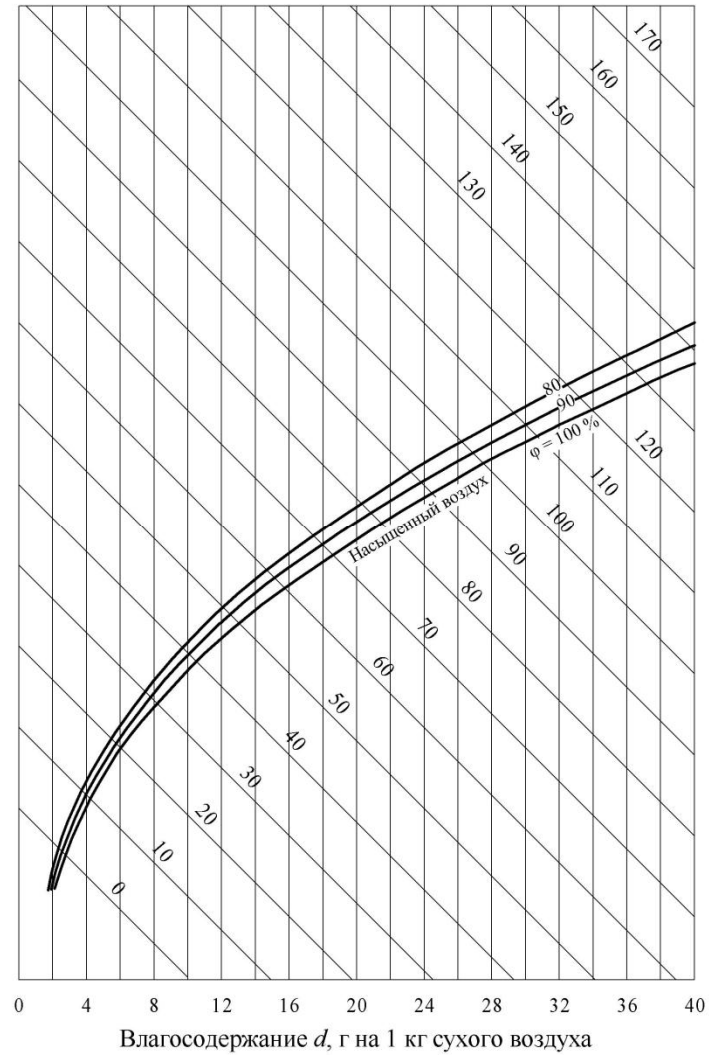
Энтальпия h , кДж на 1 кг сухого воздуха



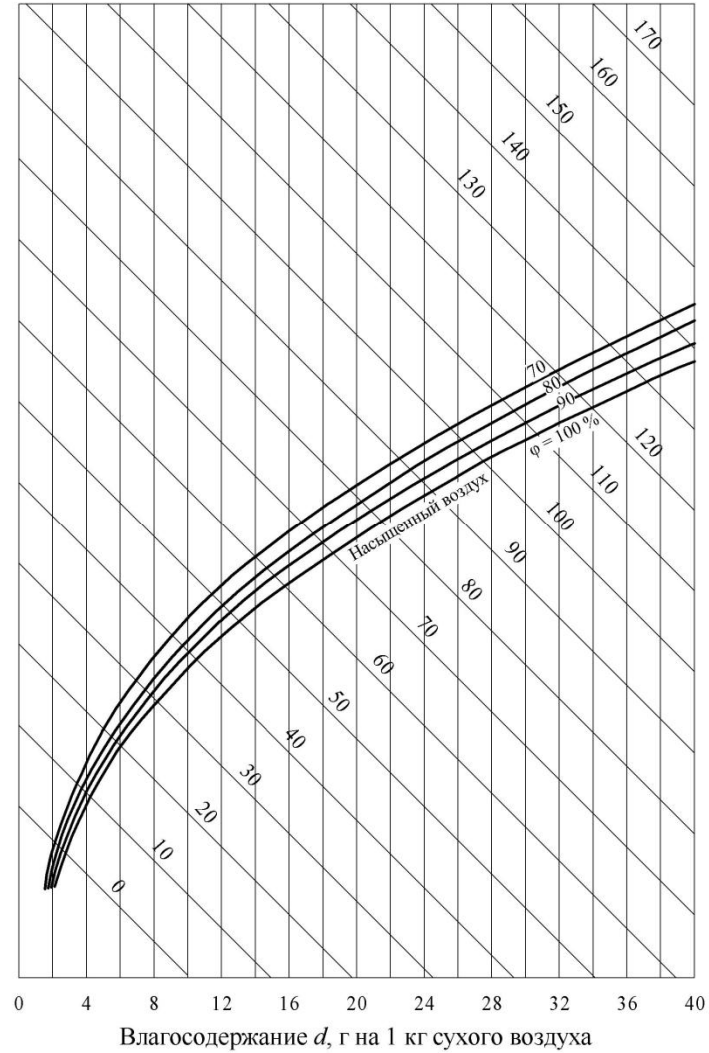
Энтальпия h , кДж на 1 кг сухого воздуха



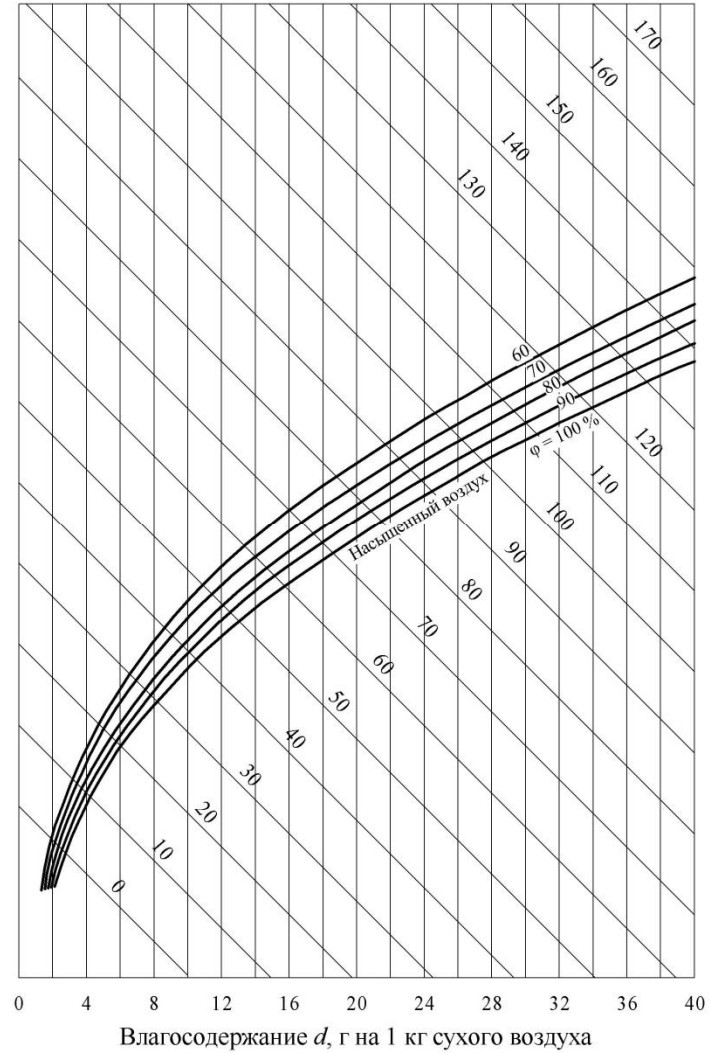
Энтальпия h , кДж на 1 кг сухого воздуха



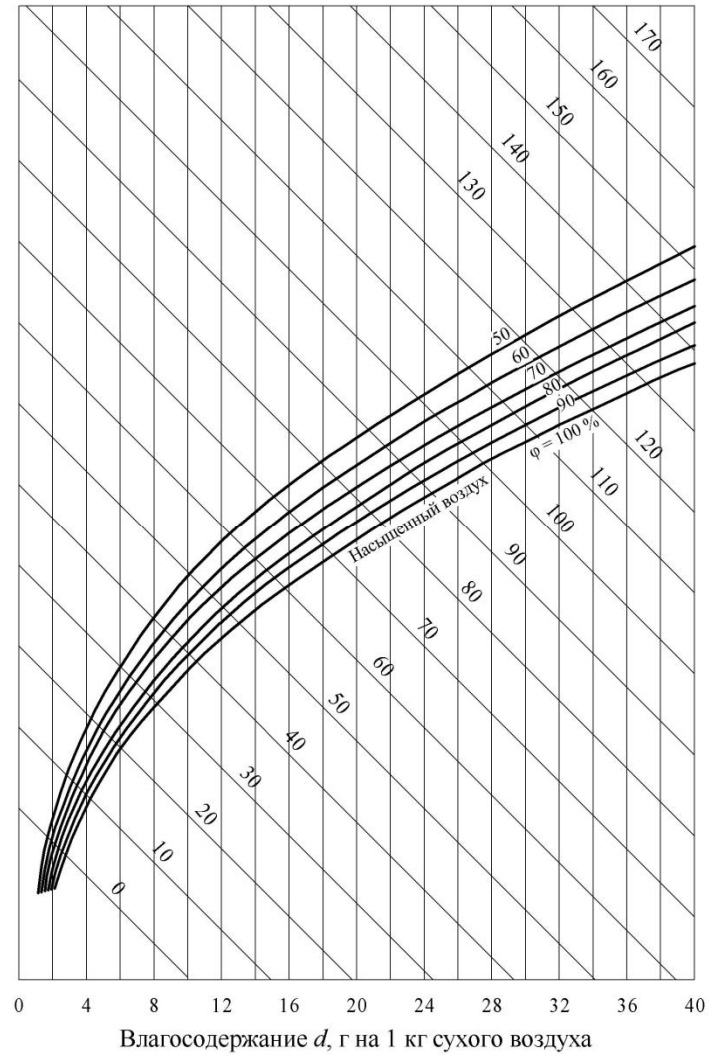
Энтальпия h , кДж на 1 кг сухого воздуха



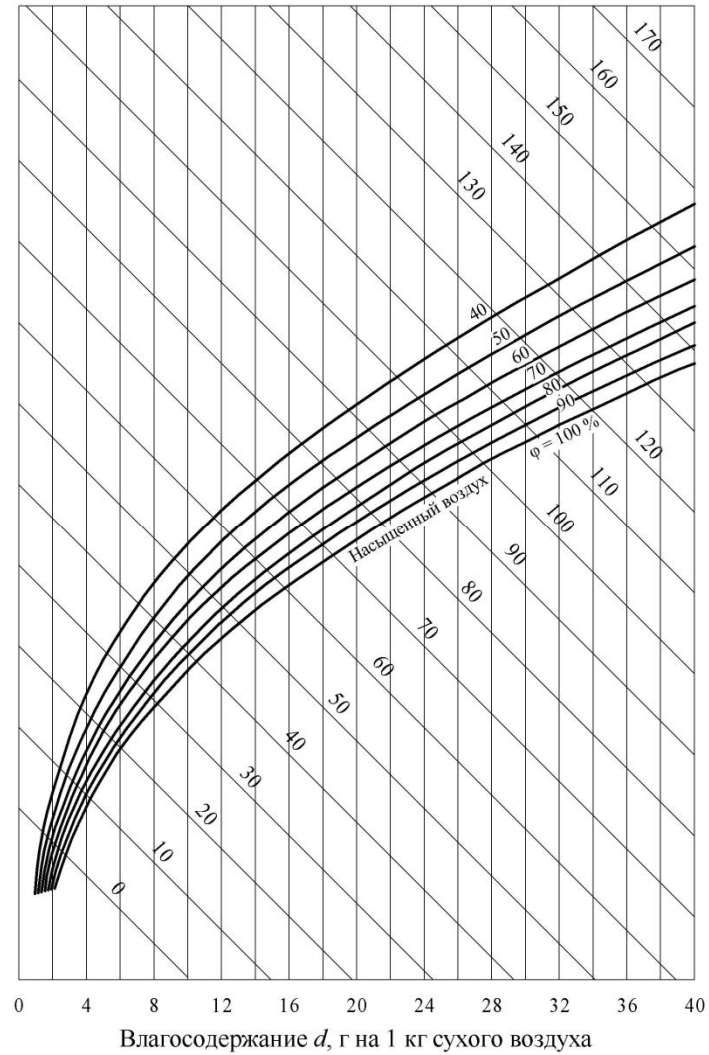
Энтальпия h , кДж на 1 кг сухого воздуха



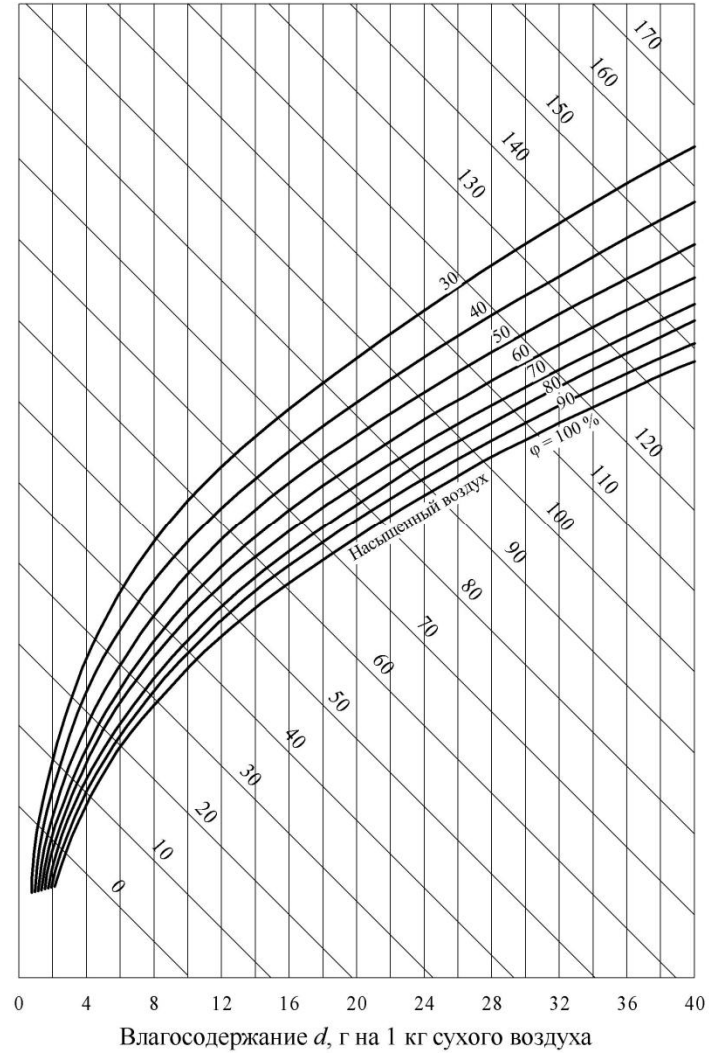
Энтальпия h , кДж на 1 кг сухого воздуха

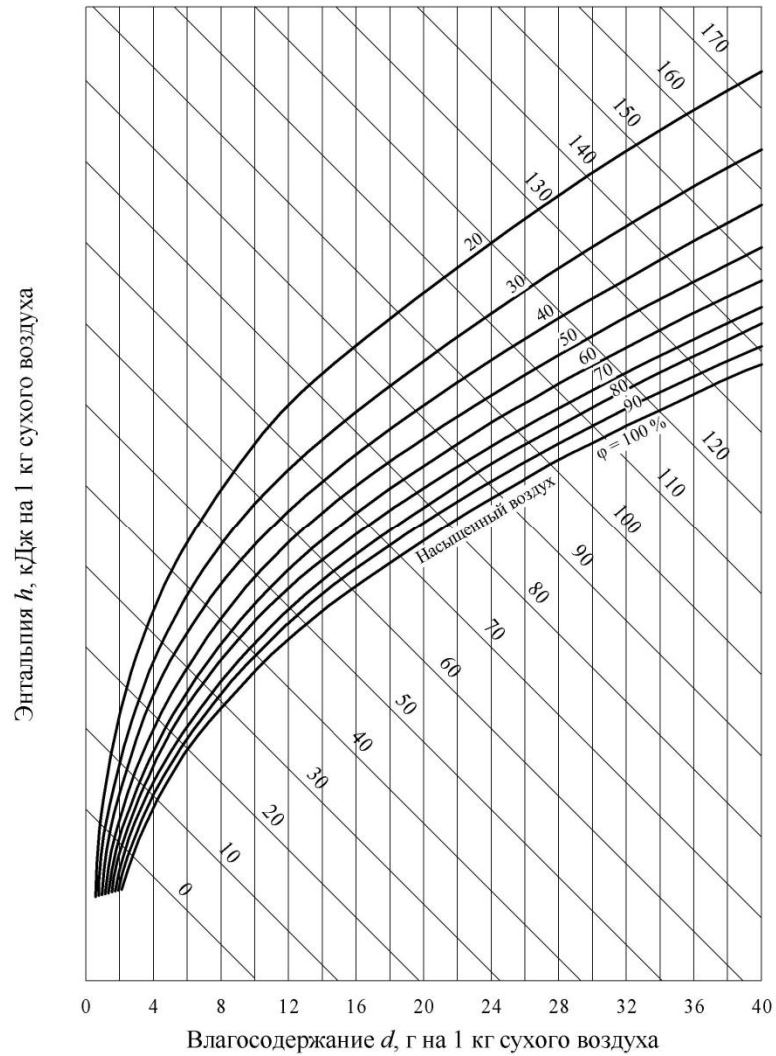


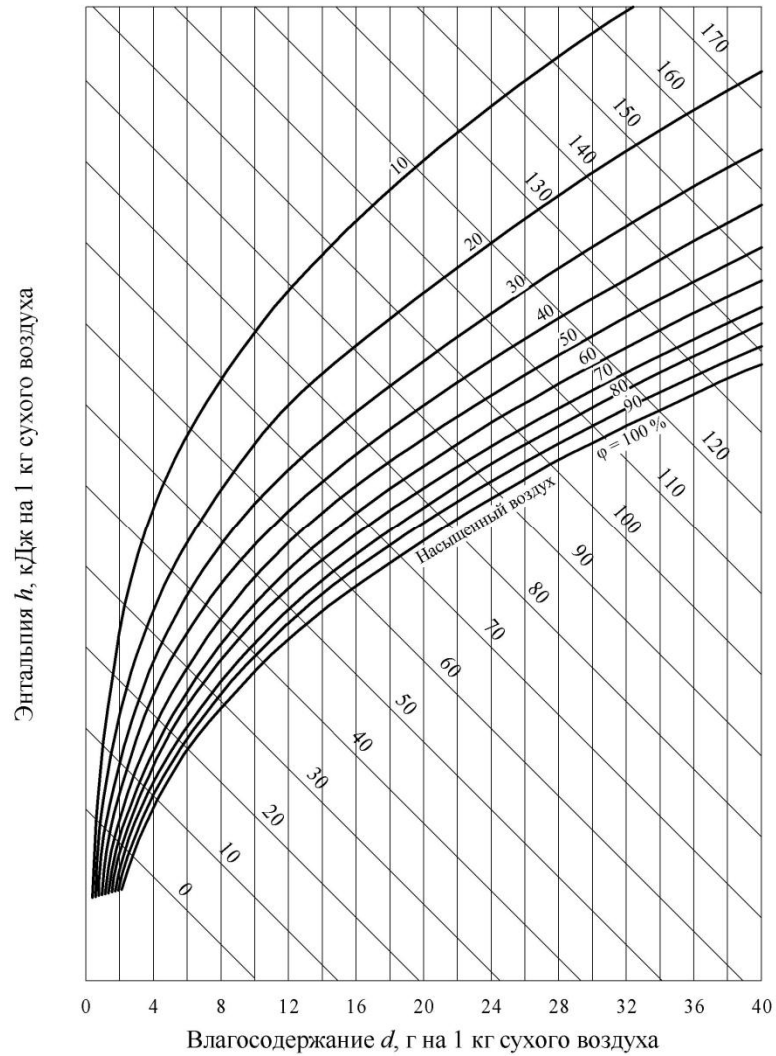
Энтальпия h , кДж на 1 кг сухого воздуха

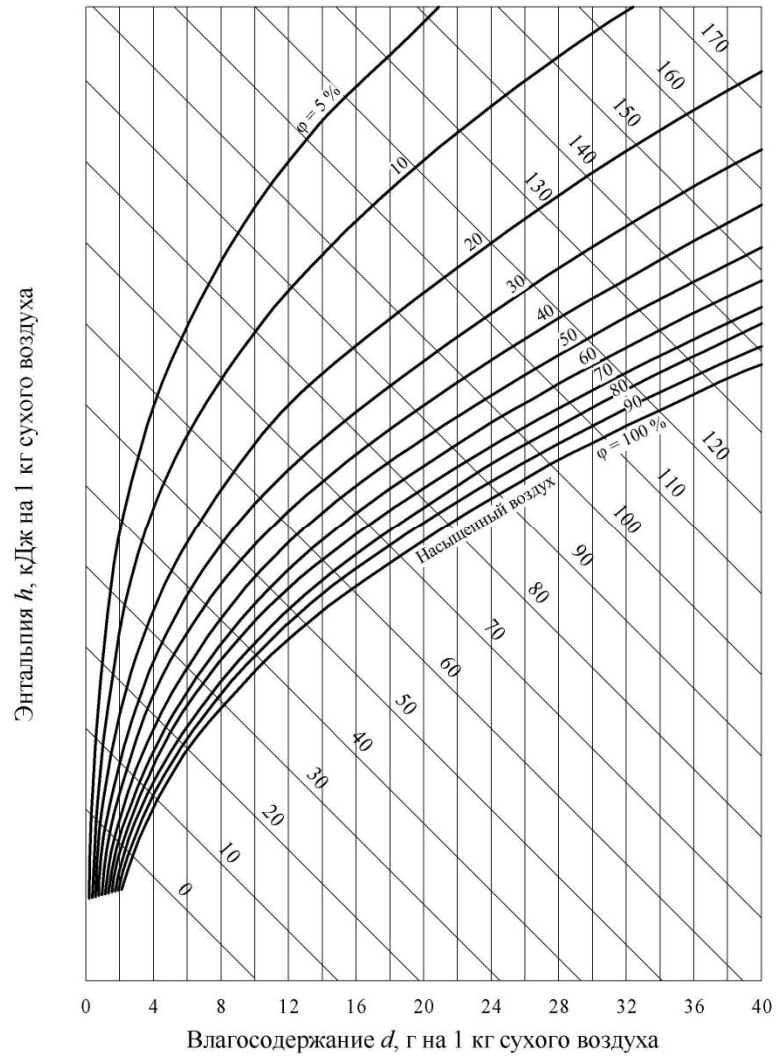


Энтальпия h , кДж на 1 кг сухого воздуха

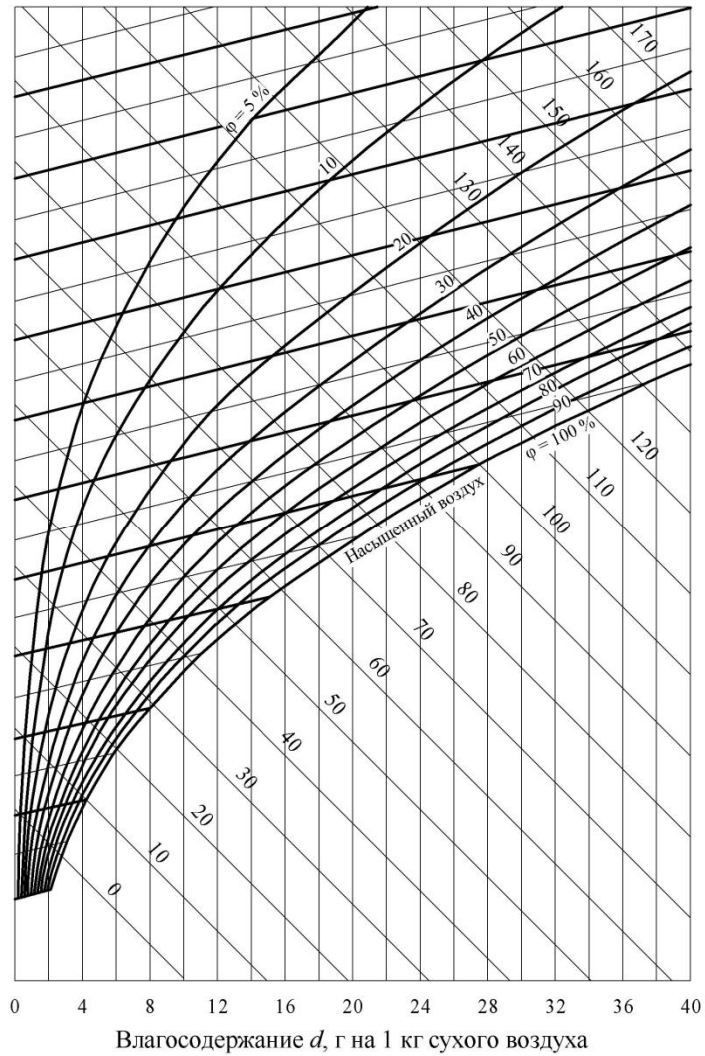


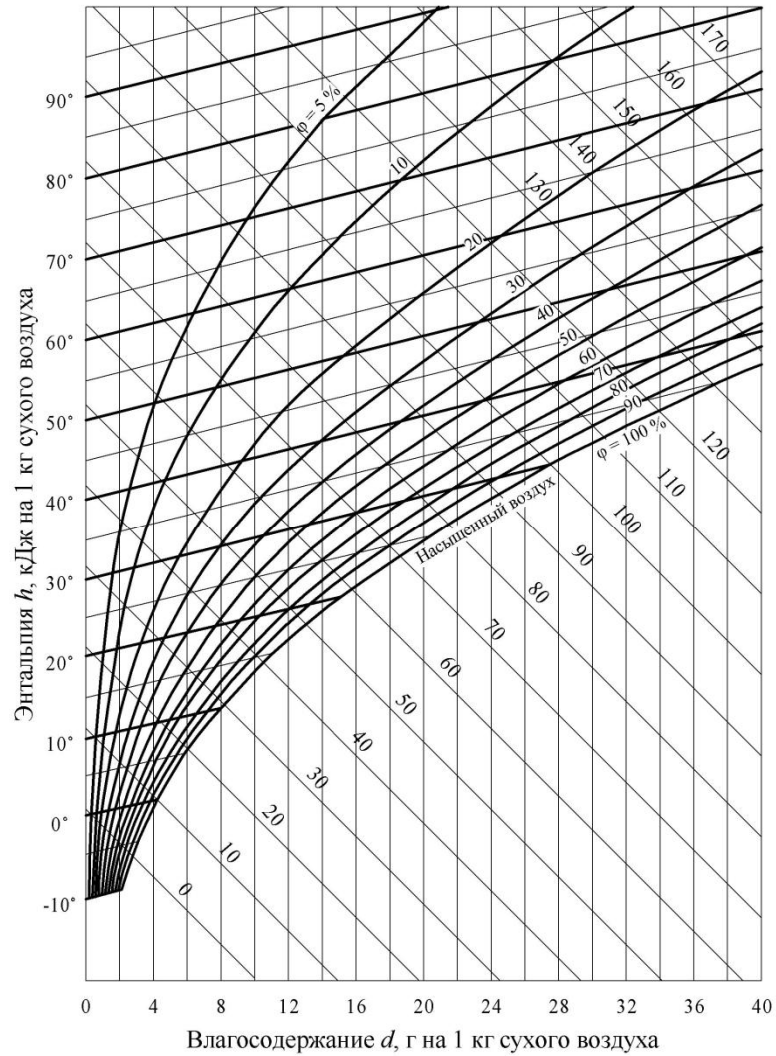


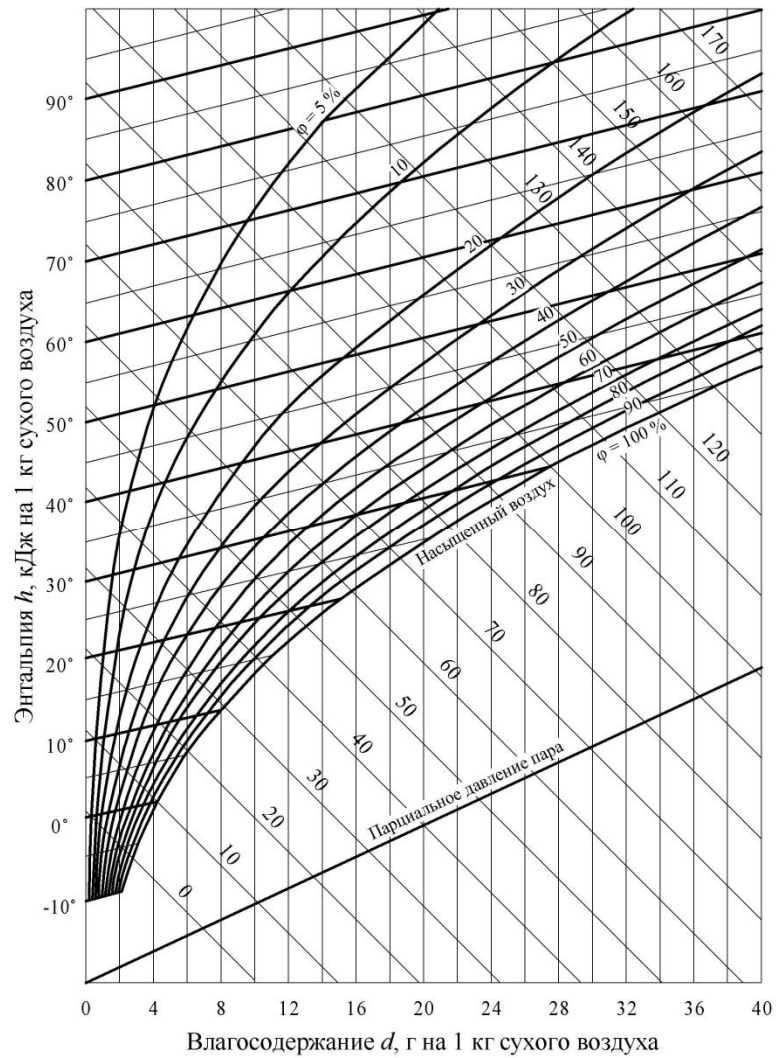


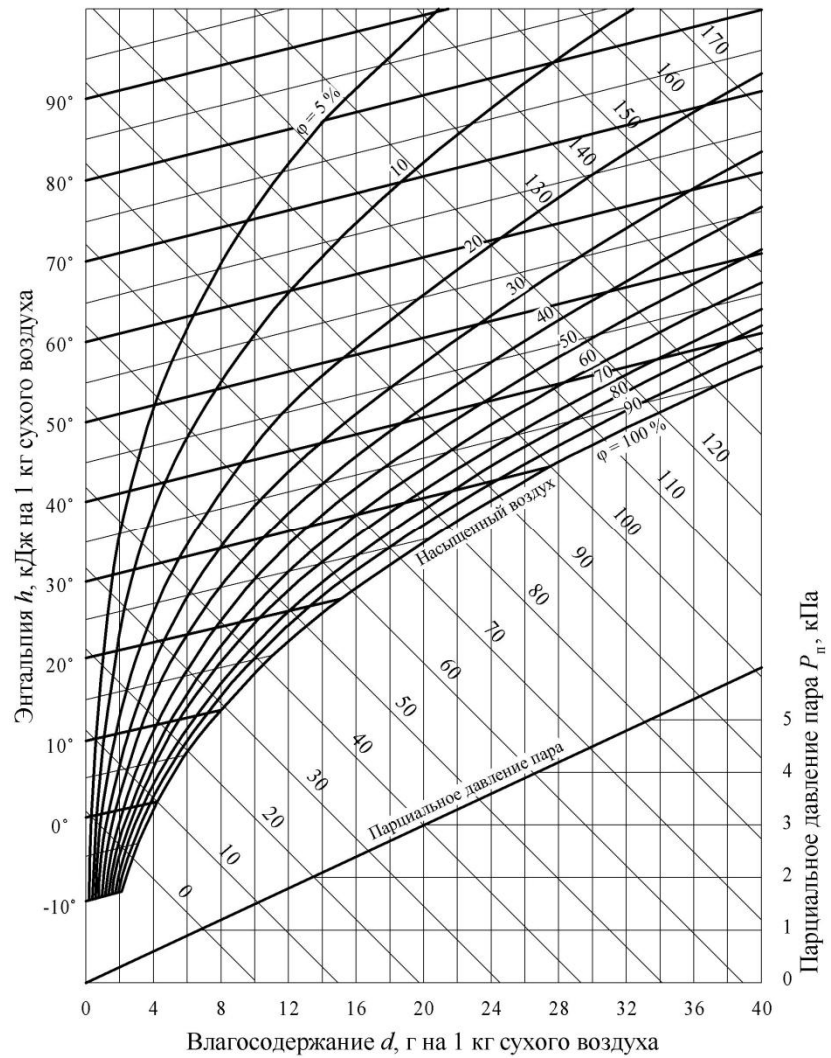


Энтальпия h , кДж на 1 кг сухого воздуха



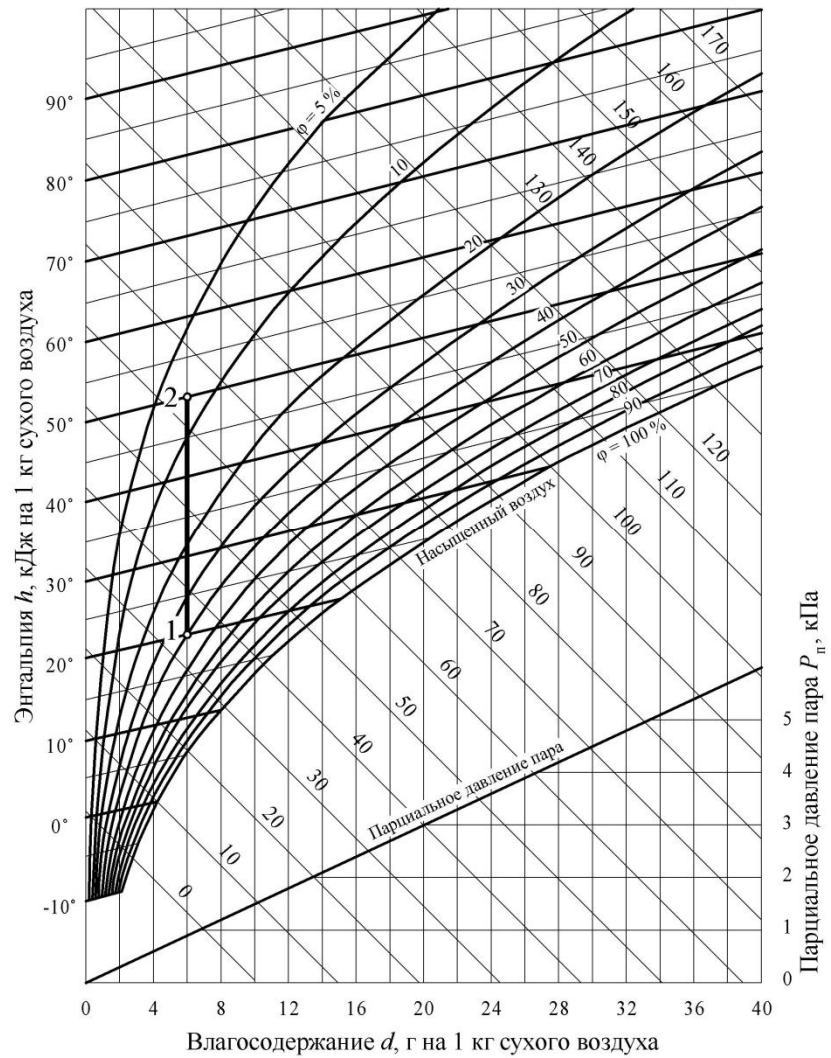






Процесс нагревания влажного воздуха

Процесс нагревания влажного воздуха осуществляется при постоянном влагосодержании ($d = \text{const}$) и на диаграмме изображается вертикальным отрезком 1–2.



Отрезок $1-2$ изображает процесс
нагревания воздуха от $t_1 = 20^\circ \text{C}$ при $\varphi_1 = 40\%$
до $t_2 = 50^\circ \text{C}$.




Количество теплоты, затрачиваемой на нагревание 1 кг влажного воздуха

$$q_{1-2} = h_2 - h_1.$$

Процесс сушки


Процесс сушки материалов воздухом заключается в том, что влага, содержащаяся в осушаемых объектах, испаряется и увеличивает влагосодержание воздуха.

Теоретический процесс сушки происходит без потерь теплоты в окружающую среду.

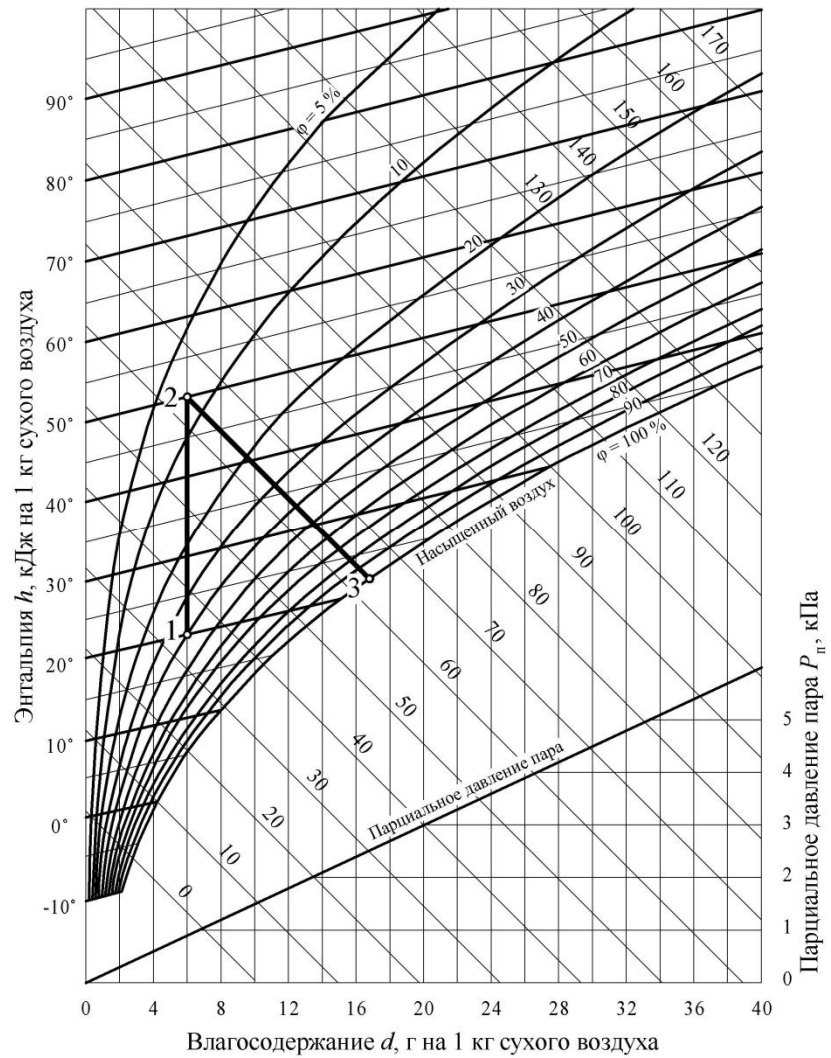



В этом случае количество теплоты, отданное воздухом на испарение влаги, вместе с паром снова возвращается во влажный воздух, т.е. теоретический процесс сушки протекает при постоянной энтальпии

$$h = \text{const.}$$



Процесс сушки (испарения влаги)
изображён на рисунке линией 2–3.





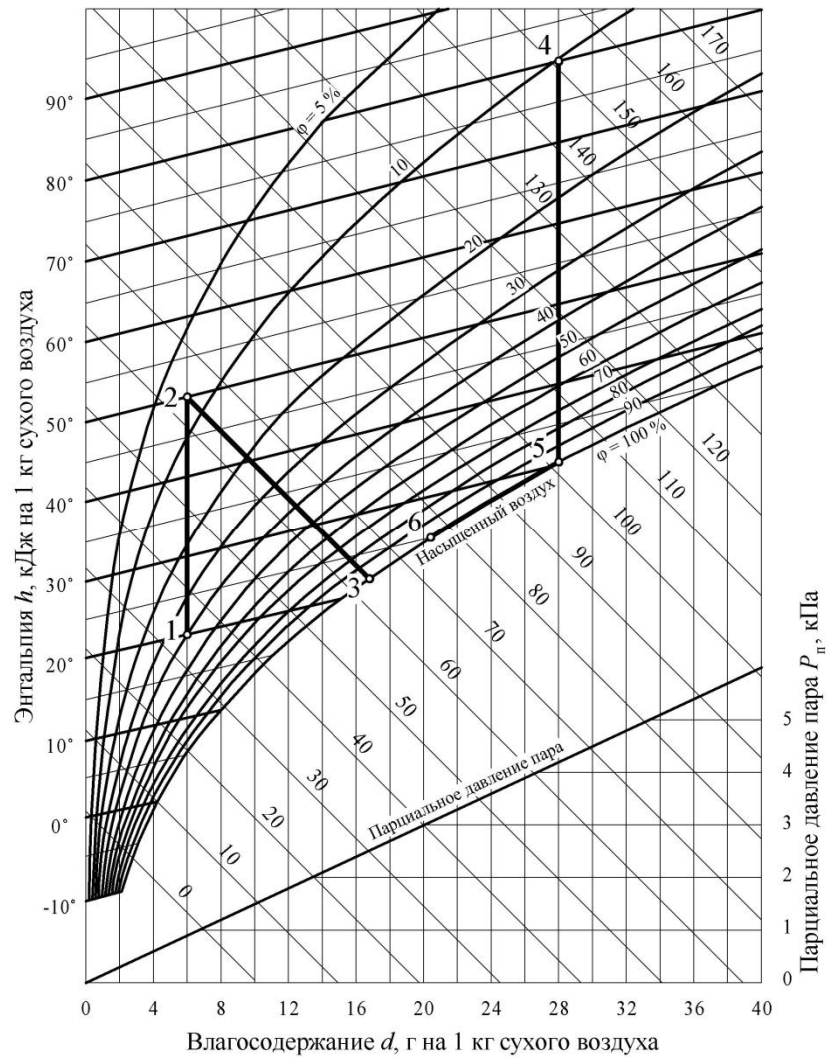
Количество влаги, отбираемой 1 кг воздуха в процессе сушки определяется, как разность влагосодержаний


$$\Delta d_{2-3} = d_3 - d_2 .$$

В процессе сушки увеличивается относительная влажность воздуха и уменьшается его температура.

Процесс охлаждения влажного воздуха


Процесс охлаждения ненасыщенного влажного воздуха также протекает при $d = \text{const}$ и изображается вертикальным отрезком 4–5.





Однако этот процесс справедлив только до состояния полного насыщения воздуха, т.е. точки 5, в которой $\varphi = 100\%$.


При дальнейшем охлаждении (процесс 5–6) происходит частичная конденсация пара и воздух становится пересыщенным влагой, которая будет выпадать из него в виде тумана или росы с уменьшением влагосодержания воздуха.



Процесс конденсации условно считается проходящим по линии полного насыщения, т.е. при $\varphi = 100\%$.

Количество влаги, выпавшей из воздуха в результате конденсации,

$$\Delta d_{4-6} = d_4 - d_6.$$



Количество теплоты, отданное при охлаждении, определяется, как разность энтальпий

$$q_{4-6} = h_6 - h_4 .$$

При нагреве относительная влажность воздуха φ уменьшается, при охлаждении – увеличивается.