

1.11 Влажный воздух

При давлениях, близких к атмосферному, парциальное давление водяного пара в воздухе обычно невелико, поэтому для влажного воздуха (как для смеси) можно применять формулы, справедливые для идеальных газов, а именно, уравнение состояния идеальных газов (15) – (17) а также уравнение закона Дальтона – уравнение (31).

Основные характеристики влажного воздуха: абсолютная и относительная влажность, влагосодержание.

Абсолютная влажность - количество водяного пара в 1м^3 влажного воздуха, численно равное плотности пара (ρ_n) при его парциальном давлении (P_n). Согласно закону Дальтона общее давление влажного воздуха состоит из парциального давления водяного пара (P_n) и парциального давления сухого воздуха (P_v).

Относительная влажность (ϕ) - отношение действительной абсолютной влажности ρ_n к максимально возможной абсолютной влажности $\rho_{n \max}$ при той же температуре:

$$\phi = \rho_n / \rho_{n \max}. \quad (171)$$

При определении $\rho_{n \max}$ различают два случая:

1) Температура влажного воздуха меньше или равна температуре насыщенного водяного пара при давлении, которое замерено для влажного воздуха. В этом случае $\rho_{\max} = \rho_n$, т. е. плотности насыщенного пара при данной температуре и находится по таблицам насыщенного водяного пара.

2) Температура влажного воздуха, а следовательно, и находящегося в нем водяного пара, больше температуры насыщенного водяного пара при давлении, которое замерено для

влажного воздуха, тогда $\rho_{п \max}$ равен плотности перегретого водяного пара и определяется по таблицам перегретого водяного пара.

Относительная влажность может быть определена по уравнению

$$\varphi = \frac{P_{п}}{P_{н}}, \quad (172)$$

где $P_{п}$ — парциальное давление водяного пара;

$P_{н}$ — давление насыщенного водяного пара при температуре воздуха. Для данной температуры воздуха значение $P_{н}$ берется из таблицы насыщенного пара (приложение Д).

Влагосодержание воздуха - отношение массы водяного пара ($m_{п}$), содержащегося во влажном воздухе, к массе сухого воздуха ($m_{в}$):

$$d = \frac{G_{п}}{G_{в}} = \frac{\rho_{п}}{\rho_{в}}. \quad (173)$$

Единицы измерения влагосодержания – килограмм на килограмм или грамм на килограмм. Влагосодержание можно рассчитать: в кг/кг - по уравнению

$$d = \frac{0,622 P_{п}}{P - P_{п}}, \quad (174)$$

в г/кг - по уравнению

$$d = \frac{622 P_{п}}{P - P_{п}}, \quad (175)$$

где $P_{п}$ - парциальное давление пара, Па;

P - общее давление, Па.

Из уравнения (175) следует, что

$$P_{п} = P \frac{d}{622 + d}. \quad (176)$$

Если парциальное давление водяного пара $P_{п}$ равно давлению насыщения $P_{н}$ при данной температуре, то влагосодержание при насыщении

$$d_{\max} = 0,622 \frac{P_H}{P - P_H}, \quad (177)$$

откуда

$$P_H = P \frac{d_{\max}}{0,622 + d_{\max}}, \quad (178)$$

где d_{\max} — максимальное влагосодержание влажного воздуха, определяемое при данном давлении влажного воздуха.

Влагосодержание и относительная влажность связаны между собой следующим уравнением:

$$\phi = \frac{d / (0,622 + d)}{P / P_{\max}}, \quad (179)$$

где P_{\max} - максимально возможное давление водяного пара при данной температуре.

Степенью насыщения называется отношение влагосодержания к максимально возможному влагосодержанию влажного воздуха при данной температуре и давлении:

$$\psi = \frac{d}{d_{\max}}. \quad (180)$$

Между ψ и ϕ существуют следующие соотношения:

$$\psi = \phi \frac{0,622 + d}{0,622 + d_{\max}} \quad \text{и} \quad \psi = \phi \frac{P - P_H}{P - P_H}. \quad (181)$$

Для невысоких температур, когда P_H довольно мало по сравнению с общим давлением P , можно полагать, что $\psi = \phi$.

Температура (t_p), до которой нужно охладить ненасыщенный влажный воздух, чтобы содержащийся в нем перегретый пар стал насыщенным (т.е. $\phi = 100\%$), называется **температурой точки росы**. При охлаждении ниже данной температуры происходит конденсация водяного пара.

Плотность влажного воздуха, кг/м³, определяют по формуле

$$\rho = \frac{P}{287 T} - 0,0129 \frac{\phi P_n}{T}, \quad (182)$$

где P и P_n – давление воздуха, Па;

T – температура воздуха, К.

Энтальпия влажного воздуха равна сумме энтальпий 1 кг сухого воздуха и энтальпии d кг пара:

$$h = h_b + h_n d, \quad (183)$$

где d выражено в кг/кг, а h , h_b , h_n – в кДж/кг.

Энтальпия водяного пара h_b , содержащегося во влажном воздухе, ккал/кг, определяется по формуле

$$h_n = 597 + 0,46 t. \quad (184)$$

Тогда энтальпия влажного воздуха, ккал/ кг сухого воздуха,

$$h = 0,24 t + d (597 + 0,46 t). \quad (185)$$

Энтальпию влажного воздуха обычно относят к 1 кг сухого воздуха, т.е. к $(1+d)$ кг влажного воздуха.

Если смешиваются два потока воздуха (G_1 и G_2) и заданы их влагосодержания и энтальпии d_1 , h_1 и d_2 , h_2 , то после смешения

$$d_{cm} = \frac{d_1 + a d_2}{1 + a}, \quad h_{cm} = \frac{h_1 + a h_2}{1 + a}, \quad (186)$$

где $a = G_2/G_1$.

Для решения задач, связанных с изменением состояния влажного воздуха, применяют h - d -диаграмму (приложение Ж).

В этой диаграмме по оси абсцисс отложено влагосодержание d , а по оси ординат - энтальпия влажного воздуха h . Для лучшего использования диаграммы координатные оси в ней проведены под углом 135°. Диаграмма построена для барометрического давления

воздуха 745 мм рт. ст. В прилагаемой диаграмме наклонная ось не показана, вместо нее из начала координат проведена горизонтальная прямая, на которой даны значения влагосодержания d .

Линии $h=\text{const}$ идут параллельно наклонной оси абсцисс. Линии $d=\text{const}$ располагаются вертикально, параллельно оси ординат. Изотермы сухого воздуха располагаются наклонно к оси абсцисс. Кривая насыщения $\varphi=100\%$ делит площадь hd -диаграммы на две области. Область диаграммы, лежащая над линией насыщения, соответствует состоянию ненасыщенного влажного воздуха при разных значениях φ . Область диаграммы, лежащая под линией насыщения, соответствует состоянию воздуха, насыщенного водяным паром.

В нижней части hd -диаграммы приводится кривая парциальных давлений водяного пара $p_n = f(d)$. Справа по оси ординат отложены значения P_n в миллиметрах ртутного столба.

Имея два любых параметра, по hd -диаграмме легко найти все параметры, характеризующие состояние влажного воздуха. Например, зная φ и t , быстро находят величины h , d и P_n .

Точку росы также легко определить по hd -диаграмме. Для этого необходимо из точки, которая характеризует заданное состояние воздуха, провести вертикальную прямую до пересечения с линией насыщения. Тогда изотерма, проходящая через точку, лежащую на линии насыщения, даст температуру точки росы.

Основные процессы с влажным воздухом также удобно рассчитывать по hd -диаграмме. Так, процесс нагревания или охлаждения влажного воздуха изображается в hd -диаграмме как процесс, идущий при $d=\text{const}$. Процесс сушки изображается как процесс, протекающий при $h=\text{const}$.

Примеры решения задач

77 Через воздухоохладитель пропускается 100000 м^3 воздуха в 1 ч при абсолютном давлении $P=740 \text{ мм рт. ст.}$, температуре $t=4^\circ\text{C}$ и относительной влажности $\phi =80\%$, при этом воздух охлаждается до 0°C . Определить количество отведенного тепла и количество влаги, выпадающей на поверхности охладителя.

Решение:

Для определения парциального давления водяного пара, находящегося в воздухе, по таблицам водяного насыщенного пара (приложение Д) находим давление насыщенного водяного пара при температуре смеси $t = 4^\circ\text{C}$ – $P_n=6,1 \text{ мм рт. ст.}$ Тогда

$$P_{п.} = \phi P_n = 0,8 \cdot 6,1 = 4,88 \text{ мм рт. ст.,}$$

Влагосодержание влажного воздуха на входе в охладитель определяем по формуле (174)

$$d_1 = 0,622 \frac{4,88}{740 - 4,88} = \frac{0,622 \cdot 4,88}{735,12} = 0,00414 \text{ кг / кг.}$$

Энтальпию влажного воздуха на входе в охладитель определяем по формуле (185)

$$h_1 = 0,24 \cdot 4 + 0,00414 \cdot (597 + 0,46 \cdot 4) = 3,43 \text{ ккал / кг} = 14,35 \text{ кДж / кг.}$$

Определим парциальное давление водяного пара во влажном воздухе на выходе из охладителя при 0°C . Из таблицы (приложение Д) находим, что при $t = 0^\circ\text{C}$ $P_n=4,6 \text{ мм рт. ст.}$ Тогда влагосодержание влажного воздуха на выходе из охладителя при $t_2=0^\circ\text{C}$

$$d_2 = 0,622 \cdot \frac{3,68}{740 - 3,68} = 0,00311 \text{ кг / кг.}$$

Изменение влагосодержания 1 кг влажного воздуха при охлаждении его в охладителе

$$\Delta d = d_1 - d_2 = 0,00414 - 0,00311 = 0,00103 \text{ кг/кг.}$$

Количество сухого воздуха, проходящего через воздухоохладитель, определяем из уравнения (15):

$$G = \frac{P V}{R T} = \frac{(740 - 4,88) \cdot 133,3 \cdot 100000}{287 \cdot 277} = 123000 \text{ кг/ч} = 32,4 \text{ кг/с.}$$

Энтальпию влажного воздуха на выходе из охладителя при температуре 0°C определяем по уравнению (185):

$$h_2 = 0,24 \cdot 0 + 0,00311 \cdot (597 + 0,46 \cdot 0) = 1,86 \text{ ккал/кг} = 7,8 \text{ кДж/кг.}$$

Изменение энтальпии 1 кг влажного воздуха при охлаждении его в охладителе

$$\Delta h = h_1 - h_2 = 3,43 - 1,86 = 1,57 \text{ ккал/кг} = 6,55 \text{ кДж/кг.}$$

Количество тепла, отводимого от всего воздуха, проходящего через охладитель в 1 ч,

$$Q = G (h_1 - h_2) = 32,4 \cdot 6,55 = 224 \text{ кДж/с.}$$

Количество влаги, выпавшей на поверхности охладителя,

$$G_w = \Delta d G = 0,00103 \cdot 123000 = 126 \text{ кг/ч.}$$

78 По техническим условиям производства в одном из цехов завода необходимо поддерживать следующие параметры воздуха: температуру $t_2 = 22^\circ\text{C}$ и относительную влажность $\phi_2 = 80\%$. Для этой цели в цех непрерывно поступает свежий атмосферный воздух при температуре $t_1 = 18^\circ\text{C}$ и относительной влажности $\phi_1 = 30\%$. Барометрическое давление $P_{\text{бар}} = 752 \text{ мм рт. ст.}$

Определить: 1) количество добавляемой влаги на 1 кг поступающего воздуха (Δd); 2) температуру t_3 , до которой необходимо

подогреть свежий воздух, если это увлажнение производить водой при температуре воды $t_w=12^\circ\text{C}$; 3) параметры водяного пара, если требуемое влагосодержание свежего воздуха поддерживать путем вдувания пара, не применяя в этом случае подогрева свежего воздуха.

Решение:

Влагосодержание поступающего свежего воздуха

$$d_1 = 0,622 \frac{\varphi_1 P_{н1}}{P - \varphi_1 P_{н1}} = 0,622 \cdot \frac{0,3 \cdot 15,48}{752 - 0,3 \cdot 15,48} = 0,00386 \text{ кг / кг ,}$$

где $P_{н1}=15,48$ мм рт. ст., определяется при 18°C по паровым таблицам для водяного пара (приложение Д).

Влагосодержание при $t_2=22^\circ\text{C}$ и $\varphi_2=80\%$

$$d_2 = 0,622 \frac{0,8 \cdot 19,83}{752 - 0,8 \cdot 19,83} = 0,01345 \text{ кг / кг ,}$$

где $P_{н2}=19,83$ мм рт. ст., определяется при 22°C по паровым таблицам для водяного пара (приложение Д).

Для определения температуры t_3 найдем количество тепла, которое необходимо затратить при подогреве воздуха и воды, по уравнению

$$\begin{aligned} Q &= C_{pв} (t_2 - t_1) + \Delta d (597 - h_d) + C_{пн} (d_2 t_2 - d_1 t_1) = \\ &= 0,24 \cdot (22 - 18) + 0,00959 \cdot (597 - 12) + 0,46 \cdot (0,01345 \cdot 22 - 0,00386 \cdot 18) = \\ &= 6,65 \text{ ккал / кг} = 27,8 \text{ кДж / кг.} \end{aligned}$$

Тогда

$$t_3 = t_1 + \frac{Q}{C_{pв} + d_1 C_{пн}} = 18 + \frac{6,65}{0,24 + 0,00368 \cdot 0,46} = 45,5^\circ\text{C} .$$

Тепло влажного воздуха

$$Q = C_{пв} (t_2 - t_1) + \Delta d (597 - h_d) + C_{пн} (d_2 t_2 - d_1 t_1) = 0 .$$

Отс.да

$$\begin{aligned}h_d &= 597 + \frac{1}{\Delta d} [C_{pв} (t_2 - t_1) + C_{pп} (d_2 t_2 - d_1 t_1)] = \\&= 597 + \frac{1}{0,00959} [0,24 \cdot (22 - 18) + 0,46 \cdot (0,01345 \cdot 22 - 0,00386 \cdot 18)] = \\&= 708 \text{ ккал/кг.}\end{aligned}$$

Зная энтальпию пара $h_n = 708$ ккал/кг, по паровым таблицам или по h_s -диаграмме определяем, что это перегретый пар; его абсолютное давление $P_{2п} = 5$ бар и температура $t_2 = 250^\circ\text{C}$.

79 В камере смешения смешивается $G_1 = 10000$ кг воздуха, параметры которого $t_1 = 20^\circ\text{C}$, $\Phi_1 = 60\%$, и $G_2 = 30000$ кг воздуха, параметры которого $t_2 = 50^\circ\text{C}$, $\Phi_2 = 50\%$. Определить параметры воздуха после смешения.

Решение:

По h_d -диаграмме находим:

при $t_1 = 20^\circ\text{C}$, $\Phi_1 = 60\%$ - $h_1 = 42$ кДж/кг; $d_1 = 9$ г/кг сухого воздуха;

при $t_2 = 50^\circ\text{C}$, $\Phi_2 = 50\%$ - $h_2 = 160$ кДж/кг; $d_2 = 42$ г/кг сухого воздуха.

По условиям задачи

$$a = \frac{G_2}{G_1} = \frac{30000}{10000} = 3.$$

Влагосодержание смеси по формуле (186)

$$d_{см} = \frac{9 + 3 \cdot 42}{1 + 3} = 33,8 \text{ г/кг},$$

энтальпия смеси

$$h_{см} = \frac{10 + 3 \cdot 160}{1 + 3} = 130 \text{ кДж/кг}.$$

По полученным данным находим на h -диаграмме (приложение Ж) параметры:

$$t_{\text{см}} = 42,5^{\circ}\text{C}; \quad \varphi = 60\%.$$

80 Состояние влажного воздуха характеризуется следующими параметрами: температура 30°C и относительная влажность 40% . Определить энтальпию влажного и сухого воздуха, а также энтальпию влаги, содержащейся в воздухе. Задачу решить, применяя h -диаграмму.

Решение:

По h -диаграмме (приложение Ж) находим точку пересечения изотермы $t=30^{\circ}\text{C}$ и линии $\varphi=40\%$. Эта точка даст нам энтальпию 1 кг влажного воздуха $h=56,5\text{ кДж/кг}$.

Энтальпия сухого воздуха

$$h_{\text{в}} = 0,24 t = 0,24 \cdot 30 = 7,2\text{ ккал/кг} = 30,2\text{ кДж/кг}.$$

Отсюда

$$h_{\text{воды}} = 56,5 - 30,2 = 26,3\text{ кДж/кг}.$$

Задачи

278 Относительная влажность воздуха, определенная по психрометру, составляет 40% , температура воздуха $t=25^{\circ}\text{C}$, барометрическое давление 750 мм рт. ст. . Определить влагосодержание воздуха и температуру точки росы.

Ответ: $d = 0,00797\text{ кг/кг}$; $t_p = 10,5^{\circ}\text{C}$.

279 Установка для кондиционирования воздуха имеет камеру смешения. В эту камеру поступает воздух из цеха завода в количестве $V_{\text{ц}}=6000\text{ м}^3/\text{ч}$ с температурой $t_{\text{ц}} = 20^{\circ}\text{C}$ и относительной влажностью

$\phi_c=40\%$ и свежий наружный воздух в количестве $V_c=14000\text{м}^3/\text{ч}$ с температурой $t_c = 5^\circ\text{C}$ и относительной влажностью $\phi_c=70\%$. Полагая процесс смешения воздуха в камере адиабатным, определить: 1) влагосодержание d , 2) энтальпию h , 3) температуру t и 4) относительную влажность ϕ воздуха на выходе камеры смешения. Барометрическое давление равно 750 мм. рт. ст.

Ответ: $d=0,0044\text{ кг/кг}$; $h =20,4\text{ кДж/кг}$;

$t=9,32^\circ\text{C}$; $\phi=60\%$.

280 Состояние атмосферного воздуха определяется следующими параметрами: барометрическое давление 750 мм рт. ст., температура 15°C , парциальное давление водяного пара по психрометру 9,5 мм рт. ст. Определить: относительную влажность, абсолютную влажность, плотность сухого воздуха, плотность пара, плотность смеси пара и воздуха, точку росы, газовую постоянную влажного воздуха, влагосодержание воздуха, энтальпию воздуха.

Ответ: $\phi=0,746$; $\rho_n=9,9\text{ г/м}^3$; $\rho_B=1,2\text{ кг/м}^3$; $\rho_n = 9,9\text{ кг/м}^3$;

$\rho =1,2099\text{ кг/м}^3$; $t_p=10,5^\circ\text{C}$; $R=289,4\text{ Дж/(кг}\cdot\text{K)}$;

$d = 0,00798\text{ кг/кг}$; $h=35,1\text{ кДж/кг}$.

281 Температура влажного воздуха $t = 25^\circ\text{C}$, а температура точки росы $t_p = 20^\circ\text{C}$. Определить относительную влажность воздуха, энтальпию, абсолютную влажность воздуха, влагосодержание, парциальное давление водяного пара. При решении задачи использовать h - d -диаграмму.

Ответ: $\phi = 75\%$; $h = 62,8\text{ кДж/кг}$;

$\rho_n = 17,25\text{ г/м}^3$; $d=15\text{ г/кг}$; $P_n = 18\text{ мм рт. ст.}$

282 Показания сухого и мокрого термометров: $t_c=65^\circ\text{C}$ и $t_m=50^\circ\text{C}$. Определить состояние этого воздуха и его параметры. При решении использовать h - d -диаграмму.

Ответ: $\varphi = 53\%$; $d = 81 \text{ г/кг}$; $h = 277 \text{ кДж/кг}$;

$P_n = 85 \text{ мм рт. ст.}$; $t_p = 47,5^\circ \text{ С}$.

283 Воздух при начальной температуре $t_1 = 25^\circ \text{С}$ и относительной влажности $\varphi_1 = 80\%$ подвергается охлаждению до температуры $t_2 = 10^\circ \text{С}$. Определить количество тепла, которое надо отвести от воздуха на 1 кг выпавшей влаги. При решении использовать h -диаграмму.

Ответ: $q = 4550 \text{ кДж/кг}$.

284 Состояние влажного воздуха задано следующими параметрами: температура 25°С и степень насыщения $\psi = 0,7$. При постоянном давлении 755 мм рт. ст. воздух подвергается охлаждению до конечной температуры $t_2 = 10^\circ \text{С}$. Определить, сколько влаги выделится при охлаждении воздуха и сколько тепла необходимо отвести от 1 кг воздуха?

Ответ: $6,5 \text{ г/кг}$; $q = - 31,4 \text{ кДж/кг}$.

285 Определить количество силикагеля, служащего для поглощения паров воды из воздуха, которое необходимо загрузить в камеру сгорания, если объем камеры сгорания 3 м^3 . Консервация двигателя производилась при 60%-ной влажности и температуре окружающего воздуха 30°С .

Согласно техническим условиям двигатель должен храниться при 50%-ной влажности и температуре от $- 20$ до $+ 40^\circ \text{ С}$. Поглощательная способность силикагеля $0,2 \text{ кг воды на } 1 \text{ кг силикагеля}$.

Ответ: $m = 0,263 \text{ кг}$.

286 Газовый двигатель всасывает $500 \text{ м}^3/\text{ч}$ воздуха при температуре 25°С . Относительная влажность воздуха $0,4$. Какое количество водяного пара всасывается двигателем в час?

Ответ: $G = 4,6$ кг/ч.

287 Наружный воздух, имеющий температуру 20°C и влагосодержание 6 г/кг, подогревается до температуры 45°C . Определить относительную влажность наружного и подогретого воздуха. Барометрическое давление принять равным 1 бар.

Ответ: $\varphi_1 = 40\%$; $\varphi_2 = 9,8\%$.

288 Психрометр, установленный в сушильной камере, показывает температуру: $t_c = 30^{\circ}\text{C}$ и $t_m = 20^{\circ}\text{C}$. Скорость движения воздуха $0,5$ м/с. Определить состояние воздуха, если $P_{\text{бар}} = 745$ мм рт. ст.

Ответ: $\varphi = 40\%$; $d = 11,5$ г/кг.