

Лекция 5. Основные параметры атмосферного воздуха. I-d диаграмма

Газовая оболочка земли — атмосфера — является частью биосферы. Она имеет массу $5,14 \cdot 10^6$ т и состоит из 75,55 % азота, 23,1 % кислорода и 1,35 % инертных и прочих газов. Соотношение количеств этих компонентов в атмосферном воздухе стабильно. Кроме того, в атмосферном воздухе всегда содержится некоторое количество водяных паров, которое может изменяться в значительных пределах. Смесь сухого газа с водяным паром называют *влажным газом* или *влажным воздухом*. Каждый газ, в том числе и пар, входящий в состав смеси, занимает тот же объем, что и вся смесь, имеет температуру смеси и находится под своим парциальным давлением p_i , Па, которое определяют по уравнению Клапейрона:

$$p_i = \frac{M_i RT}{V \mu_i} = \frac{v_i}{V} RT, \quad (1)$$

где M_i — масса i -го газа, кг;

R — универсальная газовая постоянная, равная в системе единиц СИ $8,314 \cdot 10^3$ Дж/(кмоль · К);

T — температура смеси, К;

V — объем смеси, м³;

μ_i — молекулярная масса газа, кг/кмоль;

v_i — количество молей i -го газа, входящего в состав смеси ($v_i = M_i / \mu_i$).

Отношение массы газа M_i к объему смеси V называют *концентрацией* ω_i данного газа в смеси.

Сумма парциальных давлений газовых компонентов смеси равна полному давлению смеси (закон Дальтона):

$$p = p_1 + p_2 + p_3 + \dots + p_i = \sum_{i=1}^n p_i, \quad (2)$$

где n — число компонентов смеси.

Барометрическим давлением атмосферного воздуха p_b называют сумму парциальных давлений сухой его части ($p_{с.в}$) и водяного пара ($p_{в.п}$):

$$p_b = p_{с.в} + p_{в.п}. \quad (3)$$

Барометрическое давление измеряют в Паскалях.

Значение парциального давления компонента смеси в состоянии полного насыщения называют *парциальным давлением насыщения* p_n , или *упругостью насыщенного пара*.

Смесь, состоящую из сухого воздуха и перегретого водяного пара, называют *ненасыщенным влажным воздухом*, а смесь, состоящую из сухого воздуха и насыщенного пара, — *насыщенным влажным воздухом*.

Относительная влажность φ , %, паровоздушной смеси представляет собой отношение концентрации водяного пара ненасыщенного воздуха к концентрации водяного пара насыщенного воздуха при одинаковых температурах и давлениях:

$$\varphi = \frac{\omega_n}{\omega_{п.н}} 100 = \frac{p_n}{p_{п.н}} 100, \quad (4)$$

где ω_n — концентрация водяного пара ненасыщенного воздуха, кг/м³;

$\omega_{п.н}$ — концентрация водяного пара насыщенного воздуха, кг/м³;

p_n и $p_{п.н}$ — соответственно парциальные давления ненасыщенного и насыщенного пара при температуре паровоздушной смеси.

Для насыщенного воздуха $\varphi = 100$ %. Относительную влажность воздуха в

помещении нормируют; для общественных и жилых помещений она считается допустимой в диапазоне 30 ... 70 %.

Количество водяного пара, приходящегося на 1 кг сухой части влажного воздуха, называют *влажностью воздуха* d , г/кг, сухого воздуха:

$$d = M_{в.п}/M_{с.в}, \quad (5)$$

где $M_{в.п}$ — масса водяных паров, г;

$M_{с.в}$ — масса сухого воздуха, кг.

Используя уравнение Клапейрона, можно записать:

$$d = \frac{\mu_{в.п} p_{в.п}}{\mu_{с.в} p_{с.в}}, \quad (6)$$

где $\mu_{в.п}$ — молекулярная масса водяного пара;

$p_{в.п}$ — его парциальное давление;

$\mu_{с.в}$ — молекулярная масса сухого воздуха;

$p_{с.в}$ — его парциальное давление.

Подставив соответствующие значения молекулярных масс с учетом формулы (3), получим:

$$d = \frac{18}{29} \frac{p_{в.п}}{p_{с.в}} 1000 = 621 p_{в.п} / (p_{б} - p_{в.п}), \quad (7)$$

т. е. на влажность воздуха влияет барометрическое давление, при котором находится воздушно-паровая смесь.

Плотность влажного воздуха ρ , кг/м³, представляет собой отношение массы воздушно-паровой смеси M , кг, к объему этой смеси V , м³:

$$\rho = M/V. \quad (8)$$

Плотность газа прямо пропорциональна его давлению и обратно пропорциональна температуре. Плотность влажного воздуха всегда меньше плотности сухого воздуха, так как молекулярная масса пара меньше молекулярной массы воздуха.

Удельная массовая теплоемкость влажного воздуха (при постоянном давлении) представляет собой количество теплоты, которое нужно затратить для того, чтобы нагреть на один градус 1 кг сухой части влажного воздуха и приходящееся на его долю количество водяных паров:

$$c_p = c_{с.в} + c_{в.п} d / 1000, \quad (9)$$

где $c_{с.в}$ — удельная массовая теплоемкость сухого воздуха, равная 1,0048 кДж/(кг · К) (средняя для температур в интервале 0 ... 100 °С);

$c_{в.п}$ — удельная массовая теплоемкость водяного пара, равная 1,8068 кДж/(кг · К);

d — влажность воздуха, г/кг.

Удельной объемной теплоемкостью влажного воздуха называют количество теплоты, которое нужно затратить, чтобы нагреть на один градус 1 м³ влажного воздуха. При барометрическом давлении 1 000 кПа и температуре 0 °С удельная объемная теплоемкость влажного воздуха составляет 1,29 кДж/(м³·К). При изменении температуры и давления удельная объемная теплоемкость влажного воздуха меняется пропорционально объемной массе, поэтому при определении расходов теплоты на нагревание воздуха (или его охлаждение) целесообразнее пользоваться удельной массовой теплоемкостью.

Удельное теплосодержание сухого воздуха, Дж/кг,

$$I = c_{с.в} T, \quad (10)$$

где T — температура воздуха, К.

Удельное теплосодержание насыщенного пара, Дж/кг,

$$I_{н.п} = I_{ж} + r = c_{ж}T_{ж} + r, \quad (11)$$

где $I_{ж}$ — удельное теплосодержание жидкости, Дж/кг;

r — удельная теплота испарения, Дж/кг;

$c_{ж}$ — удельная теплоемкость жидкости, Дж/(кг · К);

$T_{ж}$ — температура жидкости, К.

Удельную теплоту испарения, кДж/кг, определяют по эмпирической формуле М. И. Фильнеева: $r = 2500 - 2,38T_{ж}$.

В системе единиц СИ основное уравнение для определения удельного теплосодержания (энтальпии) влажного воздуха имеет вид:

$$I_{вл} = 1,005t + (2500 + 1,8068t)d \cdot 10^{-3}. \quad (12)$$

В 1918 г. Л. К. Рамзин, используя уравнение (12), предложил I-d диаграмму, которую успешно применяют до настоящего времени для определения удельного теплосодержания влажного воздуха в зависимости от температуры и количества влаги в нем. Диаграмма, пересчитанная Л. В. Петровым применительно к системе единиц СИ, показана на рисунке 1.

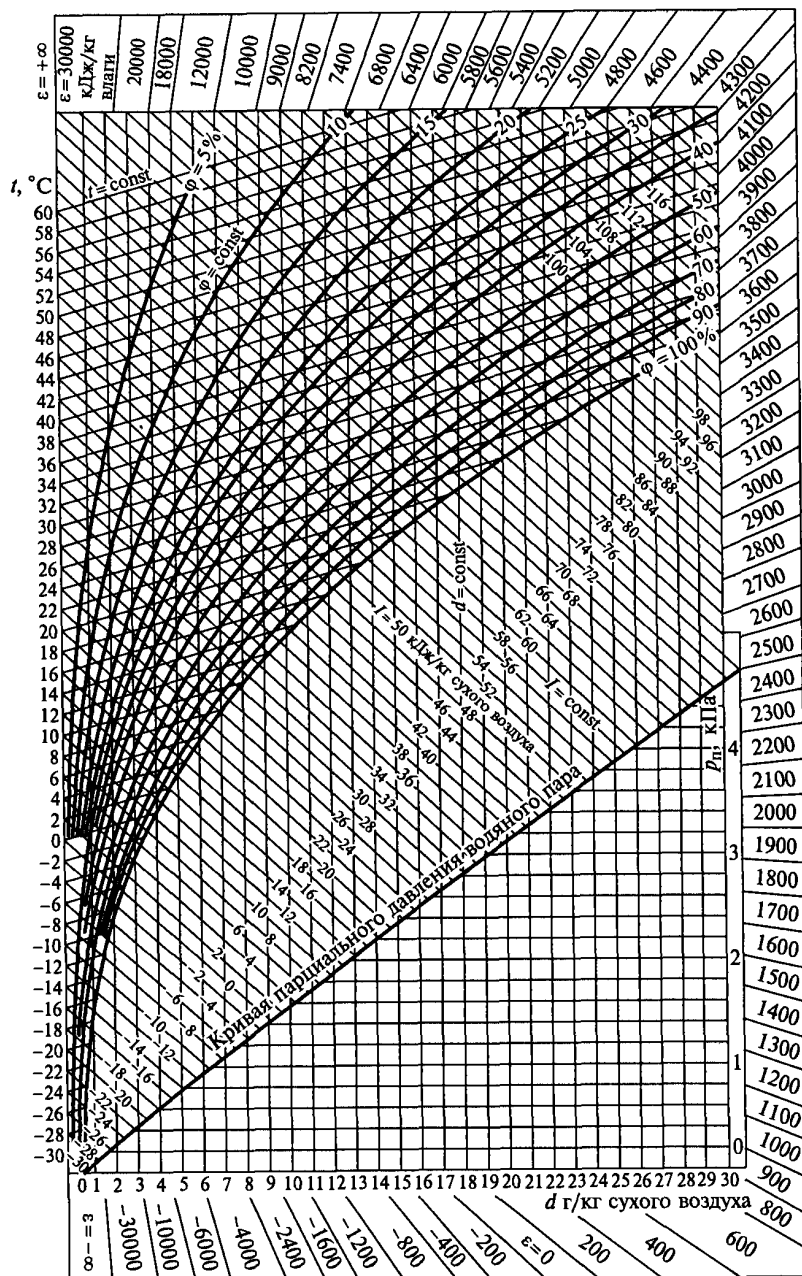


Рисунок 1 - I-d диаграмма влажного воздуха

За начало отсчета удельного теплосодержания влажного воздуха ($I_{\text{вл}} = 0$) условно принято удельное теплосодержание воздуха при температуре $0\text{ }^{\circ}\text{C}$. Это означает, что при температуре ниже $0\text{ }^{\circ}\text{C}$ его удельное теплосодержание может иметь отрицательное значение.

Диаграмма построена в косоугольной системе координат с углом между осями 135° . При построении диаграммы приняты следующие масштабы: для удельного теплосодержания I 1 см соответствует 2 кДж/кг сухого воздуха; для влагосодержания d 1 см соответствует 1 г/кг сухого воздуха; для парциального давления водяного пара 1 см соответствует $0,2\text{ кН/м}^2$.

С помощью этой диаграммы на основании двух любых известных параметров воздуха можно найти и остальные его параметры.

Точкой росы t_p влажного воздуха называют температуру, до которой нужно охладить ненасыщенный воздух, чтобы он стал насыщенным при сохранении постоянного влагосодержания. Чтобы определить точку росы влажного воздуха с заданным влагосодержанием d , следует вычислить парциальное давление водяного пара $p_{\text{в.п}}$ по вытекающей из (7) формуле:

$$p_{\text{в.п}} = \frac{dp_6}{(621 + d)}. \quad (13)$$

Затем по справочнику, содержащему таблицы парциального давления насыщения $p_{\text{в.п}}$ водяными парами влажного воздуха, находят соответствующую температуру насыщения — это и будет точка росы.

Температурой мокрого термометра t_m называют температуру, которую имеет влажный воздух на стадии полного насыщения в процессе испарения воды без подвода теплоты извне при постоянном теплосодержании.