

# ВЛАЖНЫЙ ВОЗДУХ

## Практическое занятие №8

### План занятия:

1. Парогазовые смеси
2. Задачи

### 1. ПАРОГАЗОВЫЕ СМЕСИ

Большинство газов, применяемых в технике, содержит пары тех или иных жидкостей. Наиболее распространенными являются **смесь воздуха с водяным паром**, смесь воздуха с парами бензина, керосина и т. п. Характер изменения параметров парогазовой смеси (**давление, температура, энтальпия и др.**) имеет большое значение в расчетах **процесса сушки, кондиционирования воздуха, обледенения самолетов** и т.д.

Рассмотрим основные закономерности, применяемые для расчёта параметров парогазовых смесей на примере **смеси воздуха с водяным паром**. Смесь воздуха с водяным паром называют также **влажным воздухом**.

Смесь, состоящая из сухого воздуха и перегретого пара, называется **ненасыщенным влажным воздухом**, а смесь из сухого воздуха и насыщенного пара - **насыщенным влажным воздухом**.

При охлаждении влажного воздуха до определенной температуры (**температуры точки росы или температуры насыщения**) водяной пар становится насыщенным и может начать конденсироваться.

Полагая, что перегретый водяной пар, входящий в состав влажного воздуха, приближается по своим свойствам к идеальному газу, **влажный воздух можно рассматривать как смесь идеальных газов**.

По закону Дальтона давление смеси идеальных газов  $p$  равно сумме парциальных давлений:

$$\begin{aligned} p &= p_{\text{с.в.}} + p_{\text{в.п.}} \\ \text{или} & \\ \rho &= \rho_{\text{с.в.}} + \rho_{\text{в.п.}} \end{aligned} \quad (1)$$

с.в. - сухой воздух, в.п. - водяной пар,  $\rho$  [кг/м<sup>3</sup>] - плотность,  $p$  [Па] - давление.

#### 1.1. Основными характеристиками влажного состояния газа являются:

**относительная влажность**  $\varphi$ , которая определяет степень насыщения воздуха паром:

$$\varphi = \frac{p_{\text{в.п.}}}{p_{\text{н.в.п.}}} = \frac{\rho_{\text{в.п.}}}{\rho_{\text{н.в.п.}}} \quad (2)$$

в.п., н.в.п. - водяной пар и насыщенный водяной пар соответственно.

**абсолютная влажность**  $D$ , определяющая массу пара, содержащегося в 1 м<sup>3</sup> воздуха:

$$D = \rho_{\text{в.п.}} \quad (3)$$

**влажностное содержание**  $d$  это масса пара, содержащегося в 1 кг сухого воздуха:

$$d = \frac{\rho_{\text{в.п.}}}{\rho_{\text{с.в.}}} \quad (4)$$

## 1.2. Связь основных параметров газовой смеси с характеристиками влажного состояния

Предположим известно **давление**  $p_0$ , **температура**  $t_0$  и **относительная влажность**  $\varphi$  воздуха.

Необходимо определить плотности водяного пара и сухого воздуха, парциальные давления пара и воздуха, влажностное содержание и абсолютную влажность, массовую концентрацию пара и воздуха, газовую постоянную влажного воздуха, теплоёмкость и энтальпию влажного воздуха.

По известной температуре можно определить **давление насыщенных водяных паров** (кривая насыщения). Для водяного пара кривая насыщения описывается зависимостью:

$$p_{\text{н.в.п.}} [\text{Па}] = 133,322 \cdot \exp \left[ 18,3036 - \frac{3816,44}{T - 46,13} \right], \quad T [\text{К}] \quad (5)$$

**Плотность водяного пара:**

$$\rho_{\text{в.п.}} \left[ \frac{\text{кг}}{\text{м}^3} \right] = \varphi \rho_{\text{н.в.п.}} = \varphi \frac{p_{\text{н.в.п.}}}{R_{\text{в.п.}} T} \quad (6)$$

**Плотность сухого воздуха:**

$$\rho_{\text{с.в.}} \left[ \frac{\text{кг}}{\text{м}^3} \right] = \frac{p_0 - \varphi p_{\text{н.в.п.}}}{TR_{\text{с.в.}}} \quad (7)$$

**Парциальное давление водяного пара:**

$$p_{\text{в.п.}} [\text{Па}] = \varphi p_{\text{н.в.п.}} \quad (8)$$

**Парциальное давление сухого воздуха:**

$$p_{\text{с.в.}} [\text{Па}] = p_0 - \varphi p_{\text{н.в.п.}} \quad (9)$$

**Влажностное содержание:**

$$d = \frac{D}{\rho_{\text{с.в.}}} = \frac{R_{\text{с.в.}} p_{\text{в.п.}}}{R_{\text{в.п.}} p_{\text{с.в.}}} = \frac{M_{\text{в.п.}} p_{\text{в.п.}}}{M_{\text{с.в.}} p_{\text{с.в.}}} = \frac{18 p_{\text{в.п.}}}{29 p_{\text{с.в.}}} = 0,620 \frac{p_{\text{в.п.}}}{p_{\text{с.в.}}} = 0,620 \frac{p_{\text{в.п.}}}{p_0 - p_{\text{в.п.}}} \quad (10)$$

$$d = 0,620 \frac{\varphi p_{\text{н.в.п.}}}{p_0 - \varphi p_{\text{н.в.п.}}}$$

**Абсолютная влажность:**

$$D \left[ \frac{\text{кг}}{\text{м}^3} \right] = \varphi p_{\text{н.в.п.}} \quad (11)$$

**Массовая концентрация водяных паров:**

$$K_{\text{в.п.}} = \frac{\rho_{\text{в.п.}}}{\rho} = \frac{\rho_{\text{в.п.}}}{\rho_{\text{в.п.}} + \rho_{\text{с.в.}}} = \frac{1}{1 + \frac{\rho_{\text{с.в.}}}{\rho_{\text{в.п.}}}} = \frac{d}{d+1} \quad (12)$$

**Массовая концентрация сухого воздуха:**

$$K_{\text{с.в.}} = 1 - K_{\text{в.п.}} = \frac{1}{d+1} \quad (13)$$

**Газовая постоянная влажного воздуха:**

$$R \left[ \frac{\text{Дж}}{\text{кг} \cdot \text{град}} \right] = K_{\text{в.п.}} R_{\text{в.п.}} + K_{\text{с.в.}} R_{\text{с.в.}} = \frac{d}{d+1} \frac{\mathfrak{R}}{18} + \frac{1}{d+1} \frac{\mathfrak{R}}{29} = \frac{\mathfrak{R}}{d+1} (0,055d + 0,034) \quad (14)$$

**Теплоёмкость влажного воздуха:**

$$c_p \left[ \frac{\text{Дж}}{\text{кг} \cdot \text{град}} \right] = K_{\text{в.п.}} c_{p\text{в.п.}} + K_{\text{с.в.}} c_{p\text{с.в.}} = \frac{dc_{p\text{в.п.}} + c_{p\text{с.в.}}}{d+1} \quad (15)$$

$$c_{\text{рн.у.}} \left[ \frac{\text{Дж}}{\text{кг} \cdot \text{град}} \right] = \frac{1800d + 1000}{d+1}$$

**Энтальпия влажного воздуха:**

$$h \left[ \frac{\text{Дж}}{\text{кг}} \right] = K_{\text{в.п.}} h_{\text{в.п.}} + K_{\text{с.в.}} h_{\text{с.в.}} = \frac{dh_{\text{в.п.}} + h_{\text{с.в.}}}{d+1} = \frac{t}{d+1} (c_{p\text{с.в.}} + dc_{p\text{в.п.}}) \quad (16)$$

$$h = c_p t; \quad t \left[ ^\circ\text{C} \right]$$

При расчёте энтальпии влажного воздуха температуру принято записывать в градусах Цельсия, принимая за начало отсчёта энтальпии 0 градусов Цельсия.

## 2. ЗАДАЧИ

### Задача №1

Определить плотности водяного пара  $\rho_{\text{в.п.}}$  и сухого воздуха  $\rho_{\text{с.в.}}$ , парциальные давления пара и воздуха -  $p_{\text{в.п.}}$ ;  $p_{\text{с.в.}}$ , влагосодержание -  $d$  и абсолютную влажность -  $D$ , массовую концентрацию пара и воздуха -  $K_{\text{в.п.}}$ ;  $K_{\text{с.в.}}$ , газовую постоянную влажного воздуха -  $R$ , теплоёмкость и энтальпию влажного воздуха -  $c_p$ ;  $h$  для атмосферных показателей: давление: 730 мм.рт.ст., температура:  $+17^\circ\text{C}$ , относительная влажность: 37%.

### Задача №2

Определить массу воды, находящуюся в парообразном состоянии, в комнате объёмом  $90 \text{ м}^3$  для атмосферных показателей: давление:  $p_0 = 761$  мм.рт.ст., температура:  $t_0 = 23^\circ\text{C}$ , относительная влажность:  $\phi = 40\%$  (комфортные условия для человека).

### Задача №3

Определить газовую постоянную влажного воздуха при атмосферном давлении:  $p_0 = 750$  мм.рт.ст., температуре:  $t_0 = 5^\circ\text{C}$  и относительной влажности:  $\phi = 98\%$  (воздух в дождливую погоду поздней осенью).

#### **Задача №4**

Определить массовую концентрацию водяного пара во влажном воздухе при атмосферном давлении:  $p_0 = 760$  мм.рт.ст., температуре:  $t_0 = 80^\circ\text{C}$  и относительной влажности:  $\varphi = 95\%$  (условия в русской бане).

#### **Задача №5**

Определить массовую концентрацию водяного пара во влажном воздухе при атмосферном давлении:  $p_0 = 760$  мм.рт.ст., температуре:  $t_0 = 95^\circ\text{C}$  и относительной влажности:  $\varphi = 5\%$  (условия в сауне).