

# ИССЛЕДОВАНИЕ ПРОЦЕССОВ УВЛАЖНЕНИЯ ВОЗДУХА В ПЕННОМ СЛОЕ

Лабораторная работа №2

## План занятия:

1. Цель работы
2. Основы термодинамики двухфазных состояний
3. Влажный воздух
4. Измерение относительной влажности воздуха
5. Описание экспериментальной установки
6. Порядок проведения эксперимента
7. Методика обработки экспериментальных данных
8. Содержание отчёта
9. Контрольные вопросы

## 1. ЦЕЛЬ РАБОТЫ

Экспериментально определить изменение состояния влажного воздуха в процессах, протекающих в пенном слое.

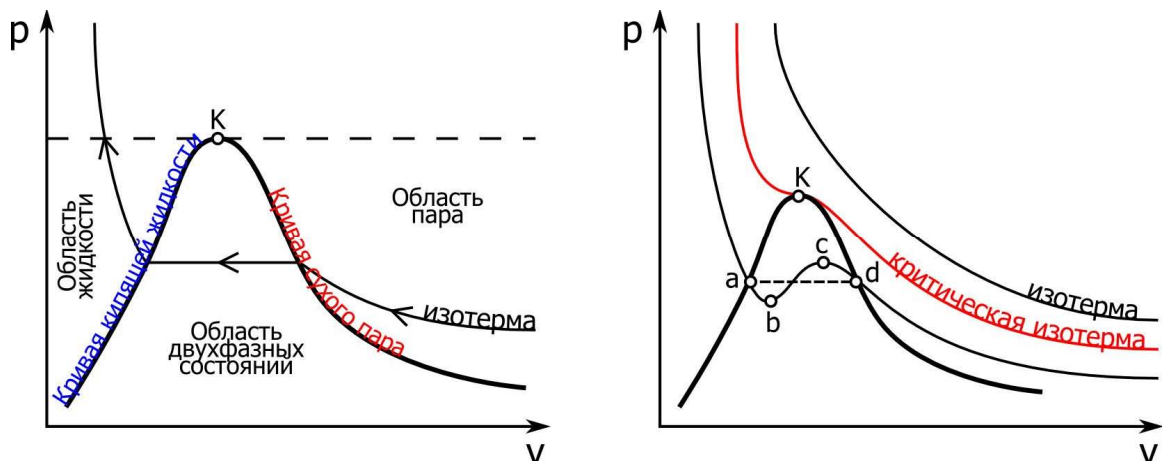
## 2. ОСНОВЫ ТЕРМОДИНАМИКИ ДВУХФАЗНЫХ СОСТОЯНИЙ

### 2.1. Уравнение состояния реальных газов и паров

Все реальные газы являются парами тех или иных жидкостей, причем, чем ближе газ к переходу в жидкое состояние, тем больше его отклонение от свойств идеального газа.

Рассмотрим процесс сжатия пара при постоянной температуре. При увеличении давления пар достигает **состояния насыщения** (сжижения), соответствующего заданной температуре. Далее при увеличении давления пар начнёт **конденсироваться** и в определенный момент полностью превратится в жидкость. В процессе конденсации пара давление остаётся постоянным. Зависимость давления от температуры пара в состоянии насыщения называется **кривой насыщения**.

На  $p-v$  диаграмме область двухфазных состояний (пар и жидкость) лежит между кривыми кипящей жидкости и сухого насыщенного пара. При увеличении давления эти кривые сближаются и соединяются в так называемой **критической точке** ( $p_{кр}, T_{кр}$ ). При температуре выше критической пар сконденсироваться не может.



Для газов с более или менее значительной плотностью (пары близкие к состоянию насыщения) нельзя пренебрегать силами сцепления между молекулами, объемом, занимаемым ими, а также ассоциацией молекул в группы.

**Уравнение состояния реального газа** с учетом сил, действующих между молекулами, и их удельного объема, носит название уравнения Ван-дер-Ваальса, и имеет вид:

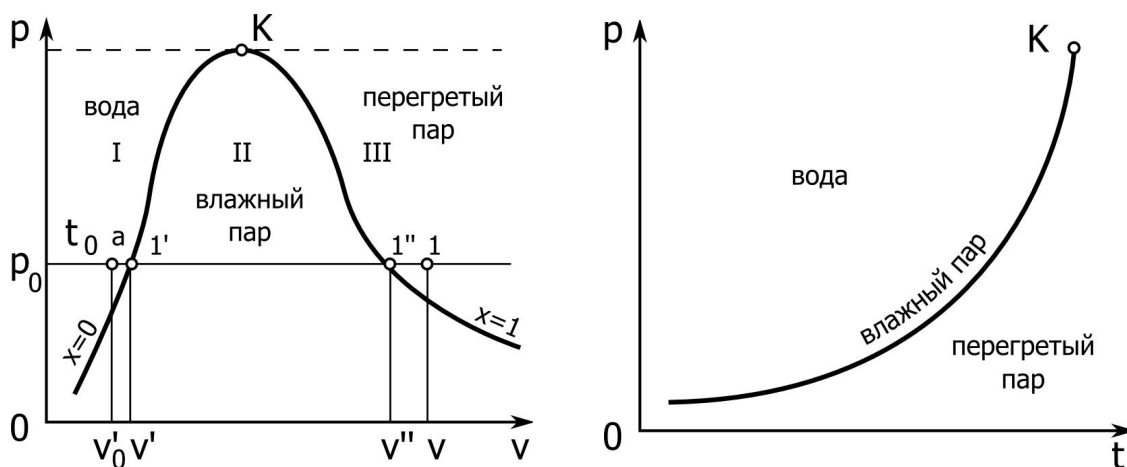
$$\left(p + \frac{a}{v^2}\right)(v - b) = RT. \quad (1)$$

Здесь  $b$  – удельный объем самих молекул;  $a/v^2$  – внутреннее давление, определяемое притяжением молекул газа.

Как видно из рисунка, процесс конденсации пара по уравнению Ван-дер-Ваальса идёт не при постоянном давлении. Кривая конденсации имеет минимум в точке ( $b$ ) и максимум в точке ( $c$ ). Состояния пара, описываемые участками кривой  $a-b$  и  $c-d$ , называются **метастабильными** и могут быть реализованы в лабораторных условиях при конденсации чистых паров. В реальных условиях процесс конденсации (кипения) идёт по прямой ( $a-d$ ).

## 2.2. Водяной пар. Парообразование при постоянном давлении.

Водяной пар получил широкое распространение в технике в качестве теплоносителя или рабочего тела парокompрессионных установок. Теоретический материал, представленный ниже, описывает термодинамические процессы для водяного пара, однако получаемые соотношения могут быть использованы и при анализе поведения паров других жидкостей.



Рассмотрим подробно процесс парообразования при постоянном давлении, на основе  $p-v$  диаграммы состояния водяного пара, представленной на рисунке. Сплошной линией обозначена область двухфазных состояний. Следует отметить, что обе ветви этой линии на  $p-t$  диаграмме отображаются в виде кривой - **кривой насыщения**.

В точке ( $a$ ) вода находится при атмосферном давлении  $p_0$ , имеет удельный объем  $v_0'$  и температуру  $t_0$ . Если к воде начать подводить тепло, её объем увеличится, и по достижении **параметров насыщения** в точке ( $1'$ ) начнётся процесс кипения.

Процесс ( $1'-1''$ ) – **изобарно-изотермический процесс кипения**. Точка ( $1'$ ) соответствует кипящей жидкости, точка ( $1''$ ) – сухому насыщенному пару. Между точками ( $1'$ ) и ( $1''$ ) система находится в двухфазном состоянии, пар называется **влажным насыщенным**. Влажный насыщенный пар представляет собой смесь пара с жидкостью,

причем жидкость может быть сосредоточена в одном месте объёма или равномерно распределена в виде мельчайших капель.

**Степень сухости пара** в двухфазной области определяется по формуле:

$$x = \frac{m_{\text{сухого пара}}}{m_{\text{влажного пара}}}, \quad (2)$$

у кипящей жидкости  $x = 0$ , а у сухого насыщенного пара  $x = 1$ .

Если к сухому насыщенному пару продолжать подводить тепло, его температура и объём будут увеличиваться. Такой пар называется **перегретым**. Область перегретого пара определяется параметрами системы:  $v > v''$ ,  $t > t_n$ . Процесс перегрева пара изображён на рисунке в виде отрезка прямой (1"-1).

Следует отметить, что точка ( $K$ ) – критическая точка ограничивает параметры системы (температуру и давление), при которых возможен процесс парообразования. Для воды критическая температура  $t_{кр} = 374,15$  °C, критическое давление  $p_{кр} = 22,1048$  МПа, критический удельный объём  $v_{кр} = 0,0031$  м<sup>3</sup>/кг.

Вследствие незначительной сжимаемости воды можно принять, что плотность воды при 0 °C и любых давлениях есть величина постоянная, а  $v'_0 = 0,001$  м<sup>3</sup>/кг. Начало отсчета внутренней энергии энтальпии и энтропии берется от 0 °C и соответствующего давления насыщения  $p_n(0$  °C) = 610 Па. При этих параметрах энтальпия, энтропия, а также внутренняя энергия воды берутся условно равными нулю:  $h'_0 = 0$ ,  $s'_0 = 0$ ,  $u'_0 = 0$ .

Термодинамические параметры кипящей жидкости принято обозначать с одним штрихом, т.е.  $c_p', t', h', v', s'...$ , а сухого насыщенного пара – с двумя штрихами, т.е.  $c_p'', t'', h'', v'', s''...$

Удельное количество теплоты необходимое для нагрева жидкости от температуры  $t_0 = 0$  °C до температуры кипения  $t'$  выражается соотношением:

$$q_1 = \overline{c_p'}(t' - t_0). \quad (3)$$

Изменение энтропии жидкости в процессе нагрева можно подсчитать по формуле:

$$\Delta s_1 = \int_{t_0}^{t'} \frac{dq}{T} = \overline{c_p'} \int_{t_0}^{t'} \frac{dT}{T} = \overline{c_p'} \left( \ln \left( \frac{t' + 273,15}{t_0 + 273,15} \right) \right). \quad (4)$$

Удельное количество теплоты необходимое для преобразования жидкости в парообразное состояние (теплота фазового перехода):

$$q_2 = r = h'' - h'. \quad (5)$$

Изменение энтропии жидкости в процессе парообразования равно:

$$\Delta s_2 = \frac{r}{T'}. \quad (6)$$

Удельное количество теплоты необходимое для перегрева сухого насыщенного пара от температуры  $t''$  до температуры  $t_1$ :

$$q_3 = \overline{c_p''}(t_1 - t''). \quad (7)$$

Изменение энтропии пара в процессе нагрева можно подсчитать по формуле:

$$\Delta s_3 = \int_{t''}^{t_1} \frac{dq}{T} = \overline{c_p}'' \int_{T''}^{T_1} \frac{dT}{T} = \overline{c_p}'' \left( \ln \left( \frac{t_1 + 273,15}{t'' + 273,15} \right) \right). \quad (8)$$

В формулах (3) - (7) приняты следующие обозначения:  $\overline{c_p}'$  – средняя удельная теплоемкость жидкости для диапазона температур от  $t_0$  до  $t'$ , Дж/(кг·град);  $r$  – удельная теплота парообразования жидкости при данной температуре кипения  $t'$ , Дж/кг;  $h'$  и  $h''$  – удельные энтальпии кипящей жидкости и сухого насыщенного пара при данной температуре кипения  $t'$  и  $t''$ , соответственно, Дж/кг;  $\overline{c_p}''$  – средняя удельная теплоемкость сухого пара для диапазона температур от  $t''$  до  $t_1$ , Дж/(кг·град).

### 3. ВЛАЖНЫЙ ВОЗДУХ

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.

**Влажным воздухом** называют **смесь сухого воздуха и водяного пара**. Смесь сухого воздуха и насыщенного водяного пара называется **насыщенным влажным воздухом**, сухого воздуха и перегретого водяного пара - **ненасыщенным влажным воздухом**. Температура, до которой нужно охладить ненасыщенный влажный воздух, чтобы находящийся в нем перегретый водяной пар стал насыщенным при данном парциальном давлении, называется **точкой росы**. Дальнейшее охлаждение влажного воздуха приводит к конденсации водяного пара с образованием тумана. **Парциальным (собственным) давлением** называют давление, которое имел бы компонент смеси (в данном случае сухого воздуха или водяного пара), если бы он занимал весь объем смеси и имел температуру смеси.

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:

$$p = p_{с.в.} + p_{в.п.}$$

или

$$\rho = \rho_{с.в.} + \rho_{в.п.} \quad (9)$$

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

Чем больше в смеси водяного пара, тем больше парциальное давление  $p_{в.п.}$ . Максимальное значение  $p_{в.п.}$  при данной температуре влажного воздуха соответствует давлению насыщения  $p_{н.в.п.}$ , которое зависит только от температуры и определяется по соответствующим таблицам.

Основными характеристиками влажного состояния газа являются:

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

$$D = \rho_{в.п.} \cdot \quad (10)$$

Абсолютная влажность воздуха численно равная плотности пара при парциальном давлении  $p_{в.п.}$ . Наибольшая плотность водяного пара достигается в насыщенном влажном воздухе при данной температуре.

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

$$\varphi = \frac{p_{в.п.}}{p_{н.в.п.}} = \frac{\rho_{в.п.}}{\rho_{н.в.п.}} \quad (11)$$

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

Относительная влажность воздуха - это отношение абсолютной влажности воздуха к максимально возможной абсолютной влажности при той же температуре.

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

$$d = \frac{\rho_{в.п.}}{\rho_{с.в.}} \quad (12)$$

Получим связь основных параметров газовой смеси с характеристиками влажного состояния. Предположим известно **давление  $p_0$ , температура  $t_0$  и относительная влажность  $\varphi$  воздуха**. По известной температуре можно определить **давление насыщенных водяных паров** (кривая насыщения). Для водяного пара кривая насыщения описывается зависимостью:

$$p_{н.в.п.} [Па] = 133.322 \cdot \exp \left[ 18.3036 - \frac{3816.44}{T - 46.13} \right], \quad T [K] \quad (13)$$

**Плотность водяного пара:**

$$\rho_{в.п.} \left[ \frac{кг}{м^3} \right] = \varphi \rho_{н.в.п.} = \varphi \frac{p_{н.в.п.}}{R_{в.п.} T} \quad (14)$$

**Плотность сухого воздуха:**

$$\rho_{с.в.} \left[ \frac{кг}{м^3} \right] = \frac{p_0 - \varphi p_{н.в.п.}}{TR_{с.в.}} \quad (15)$$

**Парциальное давление водяного пара:**

$$p_{в.п.} [Па] = \varphi p_{н.в.п.} \quad (16)$$

**Парциальное давление сухого воздуха:**

$$p_{с.в.} [Па] = p_0 - \varphi p_{н.в.п.} \quad (17)$$

**Влагосодержание:**

$$d = \frac{D}{\rho_{с.в.}} = \frac{R_{с.в.}}{R_{в.п.}} \frac{p_{в.п.}}{p_{с.в.}} = \frac{M_{в.п.}}{M_{с.в.}} \frac{p_{в.п.}}{p_{с.в.}} = \frac{18}{29} \frac{p_{в.п.}}{p_{с.в.}} = 0.620 \frac{p_{в.п.}}{p_{с.в.}} = 0.620 \frac{p_{в.п.}}{p_0 - p_{в.п.}} \quad (18)$$

$$d = 0.620 \frac{\varphi p_{н.в.п.}}{p_0 - \varphi p_{н.в.п.}}$$

**Абсолютная влажность:**

$$D \left[ \frac{\text{кг}}{\text{м}^3} \right] = \varphi \rho_{\text{н.в.п.}} \quad (19)$$

**Массовая концентрация водяных паров:**

$$K_{\text{в.п.}} = \frac{\rho_{\text{в.п.}}}{\rho} = \frac{\rho_{\text{в.п.}}}{\rho_{\text{в.п.}} + \rho_{\text{с.в.}}} = \frac{1}{1 + \frac{\rho_{\text{с.в.}}}{\rho_{\text{в.п.}}}} = \frac{d}{d+1} \quad (20)$$

**Массовая концентрация сухого воздуха:**

$$K_{\text{с.в.}} = 1 - K_{\text{в.п.}} = \frac{1}{d+1} \quad (21)$$

**Газовая постоянная влажного воздуха:**

$$R \left[ \frac{\text{Дж}}{\text{кг} \cdot \text{град}} \right] = K_{\text{в.п.}} R_{\text{в.п.}} + K_{\text{с.в.}} R_{\text{с.в.}} = \frac{d}{d+1} \frac{\mathfrak{R}}{18} + \frac{1}{d+1} \frac{\mathfrak{R}}{29} = \frac{\mathfrak{R}}{d+1} (0.055d + 0.034) \quad (22)$$

**Теплоёмкость влажного воздуха:**

$$c_p \left[ \frac{\text{Дж}}{\text{кг} \cdot \text{град}} \right] = K_{\text{в.п.}} c_{p\text{в.п.}} + K_{\text{с.в.}} c_{p\text{с.в.}} = \frac{dc_{p\text{в.п.}} + c_{p\text{с.в.}}}{d+1} \quad (23)$$

$$c_{\text{пр.у.}} \left[ \frac{\text{кДж}}{\text{кг} \cdot \text{град}} \right] = \frac{2d+1}{d+1}$$

**Энтальпия влажного воздуха:**

В технической литературе часто встречается обозначение полной энтальпии влажного воздуха буквой  $I$ , а удельной буквой  $i$ . В частности за используемой в технических расчётах диаграммой состояния влажного воздуха (психрометрической диаграммой или диаграммой Рамзина) закрепилось название  $i-d$  диаграмма. Далее по тексту примем за обозначение удельной энтальпии букву  $i$ .

$$i \left[ \frac{\text{Дж}}{\text{кг}} \right] = K_{\text{в.п.}} i_{\text{в.п.}} + K_{\text{с.в.}} i_{\text{с.в.}} = \frac{di_{\text{в.п.}} + i_{\text{с.в.}}}{d+1} \quad (24)$$

При расчёте энтальпии влажного воздуха температуру принято записывать в градусах Цельсия, принимая за начало отсчёта энтальпии 0 градусов Цельсия. При этом энтальпия воздуха рассчитывается по формуле:

$$i_{\text{с.в.}} = c_{p\text{с.в.}} t; \quad t \left[ ^\circ\text{C} \right], \quad (25)$$

а энтальпия водяного пара по формуле:

$$i_{\text{в.п.}} = c_p \text{ж} t_{\text{нас}} + r + c_{p\text{в.п.}} (t - t_{\text{нас}}); \quad t \left[ ^\circ\text{C} \right] \quad (26)$$

Связь энтальпии с температурой выражается соотношением:

$$i \left[ \frac{\text{Дж}}{\text{кг}} \right] = \frac{d}{d+1} (c_p \text{ж} t_{\text{нас}} + r + c_{p\text{в.п.}} (t - t_{\text{нас}})) + \frac{1}{d+1} c_{p\text{с.в.}} t \quad (27)$$

Полагая что  $d \ll 1$ , часто принимают упрощённую зависимость для расчёта энтальпии влажного воздуха в виде:

$$i \left[ \frac{\text{Дж}}{\text{кг}} \right] = c_{p \text{ с.в.}} t + (c_{p \text{ ж}} t_{\text{нас}} + r + c_{p \text{ в.л.}} (t - t_{\text{нас}})) d, \quad (28)$$

При нормальных условиях  $c_{p \text{ ж}}, c_{p \text{ в.л.}}, c_{p \text{ с.в.}}$  можно принять равными 4,2, 2,1  $\text{кДж/кг} \cdot \text{град}$  и  $r = 2250 \text{ кДж/кг}$ , тогда:

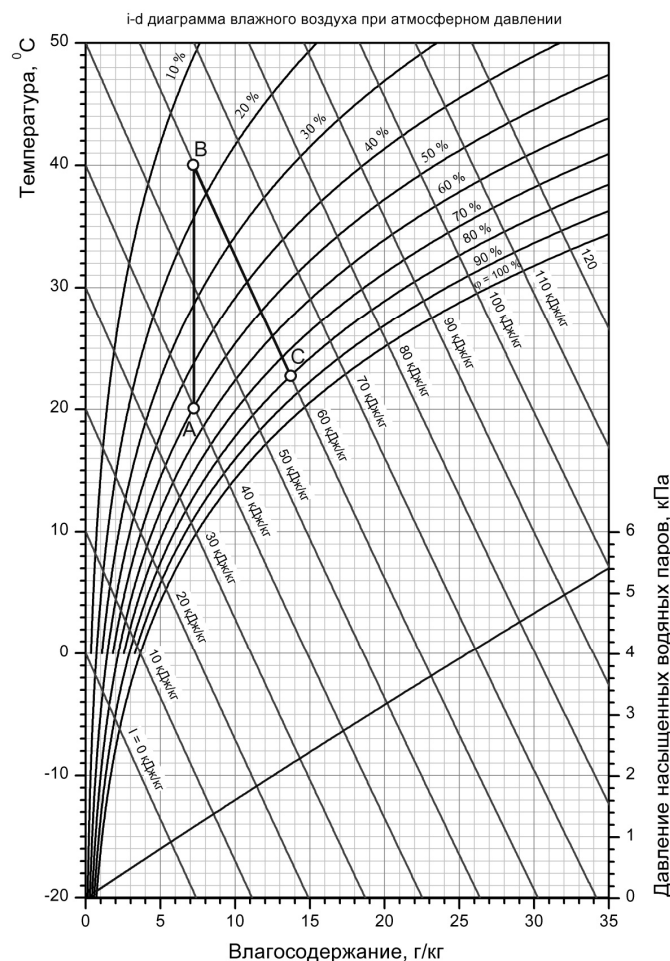
$$i \left[ \frac{\text{кДж}}{\text{кг}} \right] = t + (2470 + 2t) d. \quad (29)$$

Энтальпией называют одну из энергетических характеристик термодинамической системы. Энтальпия является функцией состояния аналогично внутренней энергии.

Удельная энтальпия равна сумме удельной внутренней энергии газа  $u$  и работы, которую необходимо совершить, чтобы тело удельным объемом  $v$  ввести в среду с давлением  $p$ :

$$i = u + pv \quad (30)$$

Исследование термодинамических процессов и определение параметров влажного воздуха значительно упрощается при использовании  $i-d$  диаграммы влажного воздуха, представленной на рисунке ниже.



По оси ординат диаграммы отложены значения энтальпии влажного воздуха  $i$ . Ось абсцисс со значениями влагосодержания  $d$  для лучшего использования площади диаграммы проведена под углом 135 градусов и на диаграмме не показана. Вместо нее из начала координат проведена горизонтальная прямая линия, на которую спроектированы значения влагосодержания.

На диаграмме нанесены линии постоянной энтальпии, идущие под углом 135 градусов к оси ординат, вертикальные линии постоянного влагосодержания, изотермы влажного воздуха и линии постоянной относительной влажности воздуха.

Кривая ( $\varphi = 100\%$ ) характеризует состояние влажного насыщенного воздуха и делит диаграмму на две части; верхнюю - область ненасыщенного влажного воздуха (рабочая область диаграммы) и нижнюю - область тумана (практического значения не имеет).

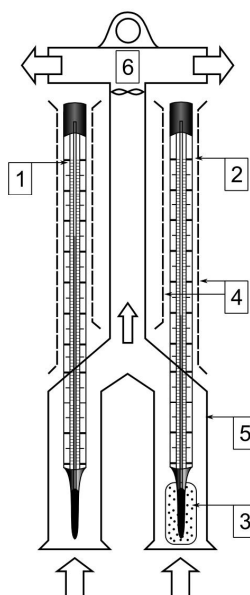
В нижней части диаграммы построена линия парциального давления пара  $p_{н.в.п.} = f(d)$ . Ось ординат для этого графика расположена на диаграмме справа.

Точка на  $i-d$  - диаграмме соответствует определенному состоянию влажного воздуха, поэтому диаграмма позволяет по двум его известным параметрам найти значения остальных. Процесс, совершаемый влажным воздухом, изображается на диаграмме линией.

**Например,** в процессе сушки воздух с относительной влажностью  $\varphi_A$  и температурой  $t_A$  (точка А) поступает в калорифер, где нагревается до температуры  $t_B$  (точка В), вследствие чего относительная влажность воздуха уменьшается до  $\varphi_B$ . Процесс в калорифере протекает при  $d = const$  (линия А-В). Расход теплоты в калорифере на подогрев 1 кг воздуха равен разности энтальпии точек А и В ( $\Delta i = i_B - i_A$ ). Нагретый воздух направляется в сушильную камеру, где за счёт отдаваемой им теплоты происходит высушивание материала испарение из него влаги (линия В-С). Процесс сушки протекает при  $i = const$ , т.к. пары испарившейся влаги поступают обратно во влажный воздух и возвращают теплоту, затраченную воздухом на испарение влаги. Разность влагосодержания  $\Delta d = d_C - d_A$  равна количеству влаги, испарившейся в сушильной камере.

#### 4. ИЗМЕРЕНИЕ ОТНОСИТЕЛЬНОЙ ВЛАЖНОСТИ ВОЗДУХА

В лабораторной работе для определения относительной влажности воздуха используется аспирационный психрометр Ассмана, представленный на рисунке ниже.



Он состоит из двух ртутных термометров: сухого 1 и мокрого 2. Ртутный шарик мокрого термометра обернут тканью 3, непрерывно смачиваемой водой. Для устранения возможного влияния движения воздуха и теплового излучения термометры защищены

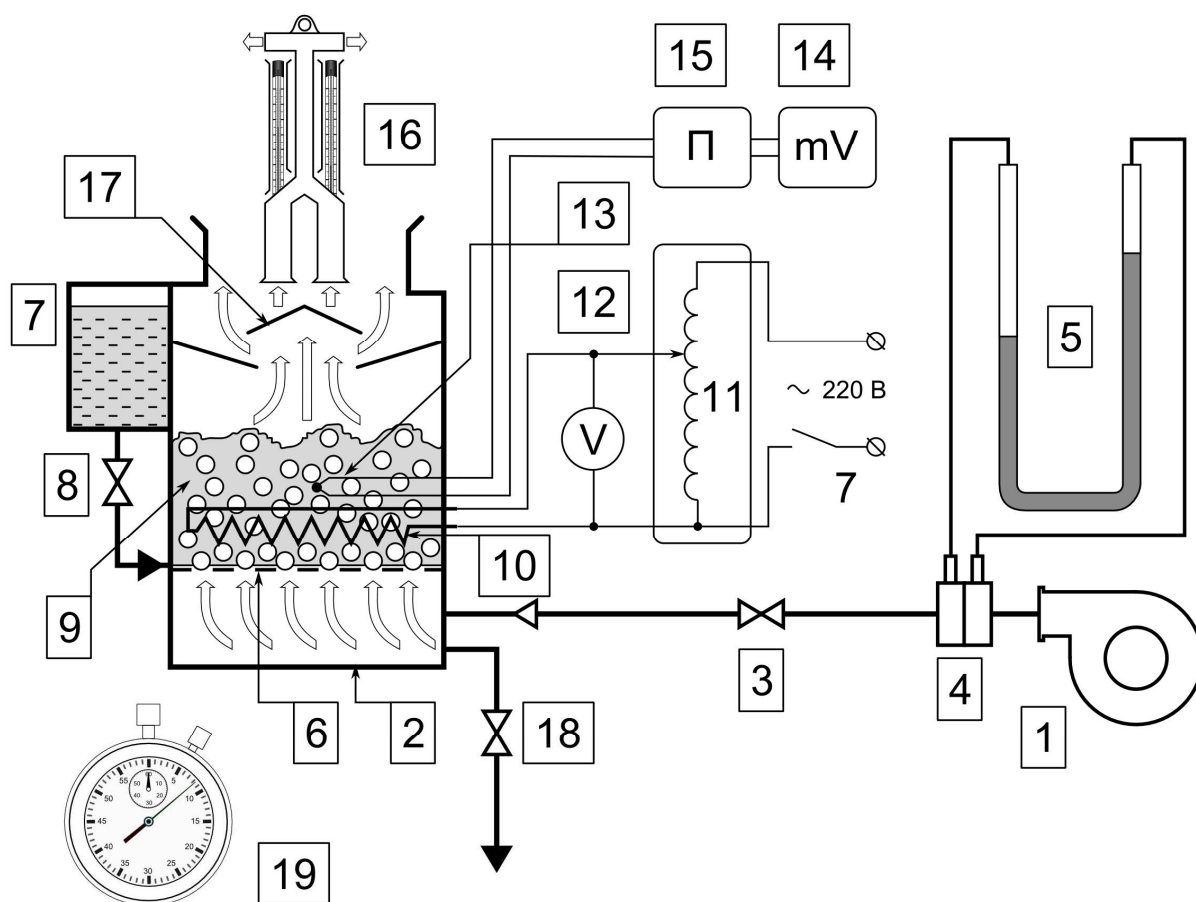


экранами 4, а ртутные шарики заключены в гильзы 5, через которые влажный воздух со скоростью 2,5...5 м/с продувается вентилятором 6 с механическим или электрическим приводом.

При обдувании ртутных шариков термометров влажным воздухом сухой термометр показывает действительную температуру воздуха  $t_c$ , а мокрый - температуру воды, испаряющейся с поверхности ткани  $t_m$ . Чем суше воздух, тем интенсивнее испаряется вода, больше снижается температура мокрого термометра и увеличивается разность температур  $t_c - t_m$ . Относительную влажность воздуха по измеренным значениям температур определяют с помощью специальных психрометрических таблиц.

При измерениях психрометром Ассмана ткань на ртутном шарике мокрого термометра смачивается водой из специальной резиновой груши за 4...5 мин до отсчета. Заводится пружина, и вентилятор начинает вращаться, создавая постоянный поток воздуха. Отсчет показаний по сухому и мокрому термометрам производится в момент, когда температура мокрого термометра достигнет минимума.

## 5. ОПИСАНИЕ ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНОЙ УСТАНОВКИ



Принципиальная схема установки показана на рисунке. Вентилятор 1 нагнетает воздух в увлажнительную камеру 2. Расход воздуха регулируется вентилем 3 и измеряется расходомером-диафрагмой 4 с дифференциальным манометром 5. Увлажнительная камера имеет квадратное сечение с внутренней стороной 120 мм и в нижней части снабжена газораспределительной решеткой 6. Воздух продувается через решетку и барботирует подаваемую на нее воду из напорного резервуара 7 через вентиль 8. В результате над

решеткой образуется **динамический пенный слой 9**. Изменение температуры пенного слоя производится электронагревателем 10, напряжение на котором регулируется автотрансформатором 11 и контролируется вольтметром 12. Температура пенного слоя измеряется термоэлектрическим термометром (термопарой) 13, подключаемым к милливольтметру 14 переключателем термопар 15. В лабораторной работе относительная влажность воздуха на входе в увлажнительную камеру принимается равной относительной влажности атмосферного воздуха и измеряется психрометром Ассмана в помещении лаборатории. Относительная влажность воздуха, выходящего из увлажнительной камеры, измеряется психрометром 16. Для защиты ртутных шариков термометров психрометра 16 от попадания капель жидкости, уносимых потоком воздуха из пенного слоя, в верхней части увлажнительной камеры установлен каплеулавливатель 17. Высота пенного слоя контролируется по шкале нанесённой на корпусе увлажнительной камеры, время измерения влажности воздуха на выходе увлажнительной камеры составляет 3-5 минут и фиксируется секундомером 19. Слив жидкости, стекающей с газораспределительной решетки после выключения вентилятора, производится с помощью вентиля 18.

## **6. ПОРЯДОК ПРОВЕДЕНИЯ ЭКСПЕРИМЕНТА**

**ВНИМАНИЕ! Включение и выключение лабораторной установки производится только лаборантом или преподавателем !**

Экспериментальное исследование изменения состояния влажного воздуха в процессах, протекающих в пенном слое, состоит из двух частей.

**Часть 1.** Определить влияние высоты пенного слоя на влажностные характеристики воздуха, при постоянных скорости воздуха в увлажнительной камере и температуре пенного слоя. Эксперименты выполнить при трех значениях высоты пенного слоя в следующем порядке.

1. Измерить относительную влажность атмосферного воздуха в помещении лаборатории.

2. Включить вентилятор и вентилем 3 задать расход воздуха, соответствующий перепаду давления **120 мм. вод. ст.** по шкале дифманометра 5.

3. Подать воду на газораспределительную решетку вентилем 8 и установить высоту пенного слоя **30 мм.**

4. Ожидать установления стационарного режима увлажнения воздуха, который характеризуется постоянством относительной влажности воздуха за увлажнительной камерой, в течение 3...5 мин. Определить температуру мокрого и сухого термометров психрометра и температуру пенного слоя. Занести данные в п. 3-4 таблицы №1.

5. Вентилем 8 установить высоту пенного слоя **60 мм** и повторить пункт 4.

8. Вентилем 8 установить высоту пенного слоя **90 мм** и повторить пункт 4.

**Часть 2.** Определить влияние температуры пенного слоя на влажностные характеристики воздуха, продуваемого через слой, при постоянных скорости воздуха и высоте пенного слоя. Эксперименты выполнить при двух значениях температуры пенного слоя в следующем порядке.

1. При расходе воздуха, соответствующем **120 мм.вод.ст.** по дифманометру 5 и высоте пенного слоя 90 мм, включить электронагреватель пенного слоя 10, установить на нем автотрансформатором 11 напряжение, равное 100 В, и повторить пункт 4 части 1.

2. Повторить пункт 1 при напряжении на электронагревателе пенного слоя, равном 150 В.

## 7. МЕТОДИКА ОБРАБОТКИ ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНЫХ ДАННЫХ

Экспериментальные данные, полученные в результате выполнения лабораторной работы, обрабатываются по методике, приведенной в таблице №1. Влажосодержание и энтальпию влажного воздуха на входе и на выходе из увлажнительной камеры находят по  $i-d$  диаграмме влажного воздуха. Расход воздуха определяют по тарировочному графику расходомерной диафрагмы. Относительную влажность воздуха находят по показаниям психрометра с помощью психрометрической таблицы и  $i-d$  диаграммы<sup>1</sup>. По найденным значениям относительной влажности  $\varphi$ , влажосодержания  $d$  и энтальпии  $i$  воздуха на входе и на выходе из увлажнительной камеры построить графические зависимости изменения относительной влажности  $\Delta\varphi$ , влажосодержания  $\Delta d$  и энтальпии  $i$  воздуха от высоты пенного слоя  $H$  и температуры пенного слоя  $t_{nc}$ .

Таблица №1

Перепад давления в расходомерном устройстве  $\Delta p = 120$  мм. вод. ст.

№ п./п.	Наименование величины, размерность	Способ определения	Часть 1.			Часть 2.	
			Режимы				
			1	2	3	4	5
1	Температура термометров в помещении, °C : сухого $t_c$	Измеряется психрометром					
	мокрого $t_m$						
2	Высота пенного слоя $H$ , мм	Измеряется по шкале, установленной на увлажнительной камере	30	60	90	90	90
3	Температура пенного слоя $t_{nc}$ , °C	Измеряется термопарой					
4	Температура термометров на выходе из увлажнительной камеры, °C : сухого $t_c$	Измеряется психрометром					
	мокрого $t_m$						
5	Относительная влажность воздуха в помещении лаборатории $\varphi_1$ , %	По психрометрическо й таблице и данным п. 4					
6	Относительная влажность воздуха на выходе из увлажнительной камеры $\varphi_2$ , %	По психрометрическо й таблице и данным п. 5					

<sup>1</sup> Психрометрическая таблица выдаётся преподавателем

7	Изменение относительной влажности воздуха в увлажнительной камере $\Delta\varphi, \%$	$\Delta\varphi = \varphi_2 - \varphi_1$					
8	Влагосодержание воздуха в помещении лаборатории $d_1, \text{кг} / \text{кг}$	Определяется по $i-d$ диаграмме влажного воздуха					
9	Влагосодержание воздуха на выходе из увлажнительной камеры $d_2, \text{кг} / \text{кг}$	Определяется по $i-d$ диаграмме влажного воздуха					
10	Изменение влагосодержания воздуха в увлажнительной камере $\Delta d, \text{кг} / \text{кг}$	$\Delta d = d_2 - d_1$					
11	Энтальпия воздуха в помещении лаборатории $i_1, \text{кДж} / \text{кг}$	Определяется по $i-d$ диаграмме влажного воздуха					
12	Энтальпия воздуха на выходе из увлажнительной камеры $i_2, \text{кДж} / \text{кг}$	Определяется по $i-d$ диаграмме влажного воздуха					
13	Изменение энтальпии воздуха в увлажнительной камере $\Delta i, \text{кДж} / \text{кг}$	$\Delta i = i_2 - i_1$					

**Примечание:** жирной рамкой выделены величины, которые необходимо измерить в ходе эксперимента.

## 8. СОДЕРЖАНИЕ ОТЧЁТА

1. Титульный лист.
2. Цель работы.
3. Принципиальная схема экспериментального стенда.
4. Таблица измерений и расчетов с результатами замеров опытных данных и расчетом необходимых величин.
5. Графики зависимостей  $\Delta\varphi = f(H)$ ,  $\Delta i = f(H)$ ,  $\Delta d = f(H)$ ,  $\Delta\varphi = f(t_{n.c.})$ ,  $\Delta i = f(t_{n.c.})$ ,  $\Delta d = f(t_{n.c.})$ . При построении зависимостей от высоты пенного слоя берутся данные экспериментов из столбцов 1 - 3. При построении зависимостей от температуры пенного слоя берутся данные экспериментов из столбцов 3 - 5.
6. Выводы по работе.

## 9. КОНТРОЛЬНЫЕ ВОПРОСЫ

1. Что такое влажный воздух? Закон Дальтона.
2. Дайте определение насыщенного и ненасыщенного влажного воздуха.
3. Что называется температурой точки росы и как она определяется с помощью  $i-d$  диаграммы?
4. Что такое абсолютная и относительная влажность воздуха?
5. Что такое энтальпия влажного воздуха?
6. Принцип действия аспирационного психрометра Ассмана.
7. При какой относительной влажности воздуха температура сухого термометра равна температуре мокрого термометра?
8. Объясните структуру  $i-d$  диаграммы.
9. Принцип увлажнения воздуха в пенном динамическом слое.
10. Устройство экспериментального стенда.