



ИССЛЕДОВАНИЕ ПРОЦЕССОВ ВО ВЛАЖНОМ ВОЗДУХЕ

◆ ИЗДАТЕЛЬСТВО ТГТУ ◆

УДК 621.1.016(076)
ББК Φ 311я73-5
И889

Рекомендовано Редакционно-издательским советом университета

Рецензент
Заведующий кафедрой физики ТГТУ,
доктор технических наук, профессор
О.С. Дмитриев

Составители:
В.И. Ляшков, В.А. Русин

И889 Исследование процессов во влажном воздухе : лабораторная работа / сост. : В.И. Ляшков, В.А. Русин. – Тамбов : Изд-во Тамб. гос. техн. ун-та, 2008. – 28 с. – 200 экз.

Даны основные теоретические положения, необходимые для определения термодинамических свойств и процессов с влажным атмосферным воздухом, описание лабораторной установки и методики проведения экспериментов, методика обработки первичных опытных данных, список рекомендуемой литературы.

Предназначена для студентов 2–3 курсов 140106, 240801, 260601 специальностей.

УДК 621.1.016(076)

ББК Ҫ311я73-5

© ГОУ ВПО "Тамбовский государственный
технический университет" (ТГТУ), 2008
Министерство образования и науки Российской Федерации
ГОУ ВПО "Тамбовский государственный технический университет"

ИССЛЕДОВАНИЕ ПРОЦЕССОВ ВО ВЛАЖНОМ ВОЗДУХЕ

*Лабораторная работа для студентов 2–3 курсов
машиностроительных и энергетических специальностей
140106, 240801, 260601*



Тамбов
Издательство ТГТУ
2008

Учебное издание

ИССЛЕДОВАНИЕ ПРОЦЕССОВ ВО ВЛАЖНОМ ВОЗДУХЕ

Лабораторная работа

С о с т а в и т е л и:

ЛЯШКОВ Василий Игнатьевич
РУСИН Владимир Александрович

Редактор З.Г. Чернова

Инженер по компьютерному макетированию М.Н. Рыжкова

Подписано к печати 09.06.2008

Формат 60 × 84/16. 1,63 усл. печ. л. Тираж 200 экз. Заказ № 285

Издательско-полиграфический центр
Тамбовского государственного технического университета
392000, Тамбов, Советская, 106, к. 14

1. ЦЕЛЬ И ЗАДАЧИ ЛАБОРАТОРНОЙ РАБОТЫ

Цель работы – углубить практические сведения о термодинамических свойствах влажного атмосферного воздуха, экспериментально исследовать основные процессы в нем, для чего:

- 1) опытным путем определить температуры мокрого и сухого термометров в сушильной камере экспериментальной установки и по полученным результатам найти термодинамические параметры влажного воздуха в процессах его нагрева и сушки материала в характерных точках типовых процессов;
- 2) построить эти процессы на $H-d$ -диаграмме влажного воздуха;
- 3) опытным путем определить расход влажного воздуха через установку;
- 4) определить количество сухого воздуха, необходимого для испарения 1 кг влаги для двух различных режимов сушки;
- 5) определить количество теплоты, затраченной в калорифере, требуемое для испарения 1 кг влаги;
- 6) определить потери теплоты в окружающую среду в калорифере и сушильной камере в расчете на 1 кг испаренной влаги;
- 7) провести анализ процессов, проходящих в установке, с точки зрения их термодинамической эффективности.

2. ОСНОВНЫЕ ТЕОРЕТИЧЕСКИЕ ПОЛОЖЕНИЯ

Влажный воздух – это смесь сухого воздуха и водяного пара. При определенных условиях кроме водяного пара в воздухе может находиться жидкая или твердая фазы (вода или лед, снег). В естественных условиях воздух всегда содержит водяной пар, образующийся в результате испарения с открытых водных поверхностей. В соответствии с законом Дальтона [1] давление влажного воздуха равно сумме парциальных давлений сухого воздуха $P_{\text{в}}$ и водяного пара $P_{\text{п}}$:

$$P = P_{\text{в}} + P_{\text{п}}.$$

Для наглядности представления и понимания основных характеристик влажного воздуха изобразим на $P-v$ -диаграмме (рис. 1) состояния водяного пара, находящегося во влажном воздухе. Термодинамические свойства пара здесь определяются температурой влажного воздуха t и парциальным давлением водяного пара $P_{\text{п}}$ [2].

Водяной пар во влажном воздухе может находиться в трех состояниях: точка 1 – перегретый пар, точка 2 – сухой насыщенный пар, точка 3 – влажный насыщенный пар. Высшим пределом парциального давления водяных паров при данной температуре влажного воздуха t является давление насыщения пара $P_{\text{п max}} = P_{\text{п}}$.

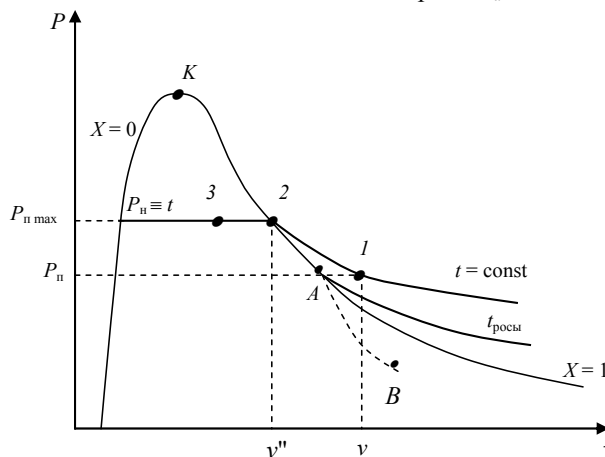


Рис. 1. Основные состояния и характеристики водяного пара во влажном воздухе

Рассмотрим теперь основные термодинамические характеристики влажного воздуха, учитывая, что при температурах атмосферного воздуха $0 \dots 50$ °С парциальное давление водяного пара очень низкое ($0,006 \dots 0,07$ бар, [3]), и это позволяет применить к перегретому и сухому насыщенному водяному пару уравнение идеального газа:

$$P_{\text{п}} v = R_{\text{H}_2\text{O}} T_{\text{п}}, \quad P_{\text{п}} v'' = R_{\text{H}_2\text{O}} T_{\text{п}}.$$

Основными характеристиками влажного воздуха являются:

1. Абсолютная влажность – это массовое количество водяных паров в одном кубическом метре влажного воздуха. Численно это плотность пара во влажном воздухе $\rho_{\text{п}}$. Для ее определения используется величина, обратная удельному объему $v_{\text{п}}$ водяного пара при $P_{\text{п}}$ и t , $\rho_{\text{п}} = 1/v_{\text{п}}$ (кг/м³). Действительно, по закону Дальтона водяной пар занимает весь объем смеси, а его плотность соответствует массе водяного пара в одном кубическом метре влажного воздуха. Отметим, что абсолютная влажность характеризует содержание во влажном воздухе только одной – паровой фазы воды.

2. Относительная влажность φ – это отношение абсолютной влажности к максимально возможной влажности при данной температуре:

$$\varphi = \frac{\rho}{\rho''} = \frac{v''}{v_{\text{п}}} = \frac{P_{\text{п}}}{P_{\text{п max}}},$$

где ρ'' и ν'' – максимальная абсолютная влажность воздуха и удельный объем сухого насыщенного водяного пара при заданной температуре t ; $P_{\text{п}}$ и $P_{\text{н}}$ – парциальное давление пара в смеси и давление насыщения при данной температуре.

Относительная влажность воздуха φ характеризует потенциальную возможность воздуха испарять влагу и забирать в себя пар из окружающей среды при данной температуре. Максимальное содержание пара в воздухе соответствует точке 2 на P - ν -диаграмме, где пар сухой насыщенный. При переходе в область влажного пара при данной t (точка 3) в воздухе количество сухого насыщенного пара остается постоянным и соответствует точке 2. Для паровой фазы воды в этом случае удельный объем остается неизменным $\nu'' = \text{const}$ и минимально возможным при данной температуре воздуха, только к нему добавляются капельки воды в состоянии насыщения.

Различают три состояния влажного воздуха:

- ненасыщенный влажный воздух (точка 1, $\varphi < 100\%$, $P_{\text{п}} < P_{\text{н}}$, $\rho < \rho''$). Водяной пар в таком воздухе находится в перегретом состоянии;
- насыщенный влажный воздух (точка 2, $\varphi = 100\%$, $P_{\text{п}} = P_{\text{н}}$, $\rho = \rho''$). Водяной пар в насыщенном влажном воздухе находится в виде сухого насыщенного;
- перенасыщенный влажный воздух (точка 3, $\varphi = 100\%$, $P_{\text{п}} = P_{\text{н}}$, $\rho = \rho''$). Кроме сухого насыщенного пара в воздухе находятся капельки воды в состоянии насыщения (в специфических случаях могут присутствовать еще и кристаллы льда, снега).

3. В технике используется такая характеристика влажного воздуха, как температура точки росы t_p . Это такая температура, начиная с которой при охлаждении влажного воздуха при постоянном давлении из него начинается выпадение капелек влаги (рис. 1, точка A процесса $I-A$). При снижении температуры ниже точки росы при постоянном давлении всей смеси и постоянном содержании в ней H_2O (процесс $A-B$) парциальное давление водяного пара уменьшается ($P_{\text{вп}} < P_{\text{п}}$), количество сухого насыщенного пара уменьшается, а количество капелек воды увеличивается. В этом случае в P - ν -диаграмме процесс $A-B$ пойдет в области влажного пара с уменьшением степени сухости по мере снижения температуры.

4. Молекулярная масса атмосферного влажного воздуха определяется по известному уравнению для смеси газов:

$$\mu = r_{\text{в}} \mu_{\text{в}} + r_{\text{п}} \mu_{\text{п}}, \quad (1)$$

где $r_{\text{в}}$, $r_{\text{п}}$ – объемные доли сухого воздуха и водяного пара, $r_{\text{в}} = P_{\text{в}} / P = (P - P_{\text{п}}) / P$; $r_{\text{п}} = P_{\text{п}} / P$; P , $P_{\text{в}}$ и $P_{\text{п}}$ – атмосферное и парциальные давления сухого воздуха и водяного пара; $\mu_{\text{в}}$, $\mu_{\text{п}}$ – молекулярные массы сухого воздуха и водяного пара, $\mu_{\text{в}} = 28,96$ кг/кмоль, $\mu_{\text{п}} = 18,016$ кг/кмоль.

В результате подстановки численных значений молекулярных масс сухого воздуха и водяного пара в выражение (1) получаем расчетное выражение молекулярной массы влажного воздуха в виде

$$\mu = 28,96 - 10,944 \frac{P_{\text{п}}}{P}.$$

Из формулы видно, что молекулярная масса влажного воздуха меньше молекулярной массы сухого воздуха, поскольку отношение давлений всегда положительно.

5. Газовая постоянная влажного воздуха определяется выражением

$$R = \frac{8314}{\mu} = \frac{8314}{28,96 - 10,944 \frac{P_{\text{п}}}{P}}, \quad (2)$$

и она тоже больше, чем газовая постоянная сухого воздуха.

6. Плотность влажного воздуха с учетом (2) определяется выражением

$$\rho = \frac{P}{RT} = \frac{P(28,96 - 10,944 \frac{P_{\text{п}}}{P})}{8314 \cdot T}, \quad (3)$$

откуда видно, что влажный воздух легче сухого.

7. Влагосодержание d – это масса водяного пара (обычно в граммах), приходящаяся на 1 кг сухого воздуха. В общем случае понятие "влагосодержание" относится не только к паровой фазе воды, но и к жидкой, и к твердой ее фазам. Расчетное выражение для влагосодержания паровой фазы воды в воздухе в г / (кг с.в.) получается из соотношения

$$d_{\text{п}} = \frac{m_{\text{п}}}{m_{\text{в}}} 1000$$

путем замены отношений масс на массовые доли и выражения последних через объемные доли, которые представляют отношения соответствующих парциальных давлений к давлению всей смеси:

$$d_{\text{п}} = \frac{g_{\text{п}}}{g_{\text{в}}} 1000 = \frac{r_{\text{п}} \mu_{\text{п}}}{r_{\text{в}} \mu_{\text{в}}} 1000 = \frac{P_{\text{п}}}{P_{\text{в}}} \frac{18,016}{28,96} 1000 = 622 \frac{P_{\text{п}}}{P - P_{\text{п}}} = 622 \frac{\varphi P_{\text{п}}}{P - \varphi P_{\text{п}}}, \quad (4)$$

где $g_{\text{п}}$, $g_{\text{в}}$ – массовые доли пара и сухого воздуха; $r_{\text{п}}$, $r_{\text{в}}$ – объемные доли пара и сухого воздуха.

8. Энтальпия влажного воздуха H рассчитывается на 1 кг сухого воздуха в кДж / (кг с.в.) и определяется как сумма энтальпий компонентов, находящихся в 1 кг сухого воздуха:

$$H = h_{\text{в}} + \frac{d_{\text{п}}}{1000} h_{\text{п}} + \frac{d_{\text{ж}}}{1000} h_{\text{ж}} + \frac{d_{\text{т}}}{1000} h_{\text{т}}, \quad (5)$$

где $d_{\text{п}}, d_{\text{ж}}, d_{\text{т}}$ – количество пара, жидкости и твердой фазы H_2O (лед, снег) в граммах на килограмм сухого воздуха (влажность); $h_{\text{в}}, h_{\text{п}}, h_{\text{ж}}, h_{\text{т}}$ – удельные энтальпии сухого воздуха, пара, жидкости и твердой фазы H_2O , кДж/кг.

В выражении (5) энтальпии всех компонентов влажного воздуха необходимо подставлять при одинаковых давлениях и температурах начала их отсчета.

Для атмосферного влажного воздуха удельные энтальпии всех компонентов можно рассчитать, приняв ряд допущений, которые не приведут к заметным погрешностям (более чем на 0,5 %) инженерных расчетов в диапазоне обычных изменений атмосферного давления и температуры от -40 до 150 °С.

Эти допущения сводятся к следующему. Начало отсчета удельной энтальпии сухого воздуха принимают при $t_0 = 0$ °С и считают, что энтальпия сухого воздуха зависит только от температуры (как для идеального газа), а его изобарная теплоемкость – величина постоянная. Расчетное выражение удельной энтальпии сухого воздуха в этом случае будет соответствовать соотношению

$$h_{\text{в}} = h_{\text{в}} - h_{\text{в}0} = c_{\text{рв}} (t - 0) = c_{\text{рв}} t,$$

где $h_{\text{в}0} = 0$ – начало отсчета энтальпии сухого воздуха при 0 °С; $c_{\text{рв}} = 1$ кДж / (кг·К) – изобарная теплоемкость идеального сухого воздуха, принята постоянной. При таких допущениях удельная энтальпия сухого воздуха в кДж/кг численно равна его температуре в градусах Цельсия.

Для определения энтальпии воды и водяного пара начало отсчета внутренней энергии ($u_0 = 0$) принято при параметрах тройной точки воды $t_0 = 0,01$ °С и $P_0 = 611,2$ Па на линии насыщения ($x = 0$). При этих параметрах численное значение энтальпии $h_0' = P_0 v_0' = 0,000611$ кДж/кг представляет очень малую величину, которую для наших расчетов можно принять равной нулю. Таким образом, можно считать, что начало отсчета энтальпии H_2O , как и сухого воздуха, ведется от 0 °С и ее численное значение при этой температуре равно нулю ($h_{\text{п}0} \approx 0$).

Для определения энтальпии водяного пара используется теплота изобарного процесса ($P_0 = \text{const}$) от t_0 до t , состоящая из теплоты парообразования и теплоты перегрева пара, которая рассчитывается как разность двух энтальпий:

$$h_{\text{п}} - h_{\text{п}0} = r_0 + q_{\text{п}}.$$

Поскольку энтальпию в тройной точке воды приняли за нуль, то абсолютное значение удельной энтальпии пара определяется выражением

$$h_{\text{п}} = r_0 + q_{\text{п}} = 2501 + 1,93t,$$

где $r_0 = 2501$ кДж/кг – теплота парообразования воды при 0 °С; $q_{\text{п}} = 1,93t$ – теплота перегрева пара от t_0 до t , при изобарной теплоемкости перегретого пара (принята постоянной, $c_{\text{рп}} = 1,93$ кДж / (кг·К), что допустимо для интервала температур атмосферного воздуха).

Приведенной формулой можно пользоваться и для расчета энтальпий пара при давлениях, отличных от давления тройной точки воды. Это объясняется тем, что при атмосферных условиях парциальные давления пара малы и близки к давлению тройной точки воды.

Для определения энтальпии жидкой фазы воды принимают постоянной ее изобарную теплоемкость, что допустимо при параметрах атмосферного воздуха. Исходя из этого допущения, расчетное выражение энтальпии жидкой фазы воды будет представлено в виде уравнения

$$h_{\text{ж}} = h_{\text{ж}} - h_{\text{п}0} = c_{\text{рж}} (t - 0) = 4,1877 t,$$

где $c_{\text{рж}} = 4,187$ кДж / (кг·К) – изобарная теплоемкость воды.

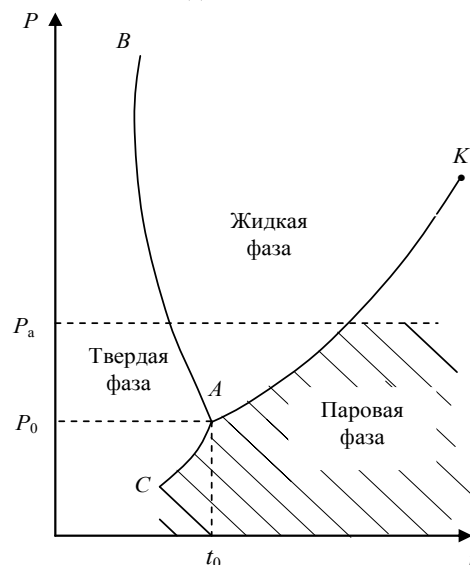


Рис. 2. Область возможных фазовых состояний воды в атмосферном влажном воздухе на $P-t$ -диаграмме воды

Для определения энтальпии твердой фазы воды (лед, снег) принимаются постоянными удельная теплота плавления льда и его изобарная теплоемкость. Эти величины берутся при параметрах тройной точки воды. Такие допущения возможны, поскольку в соответствии с $P-t$ -диаграммой для воды (рис. 2) имеют место следующие факты:

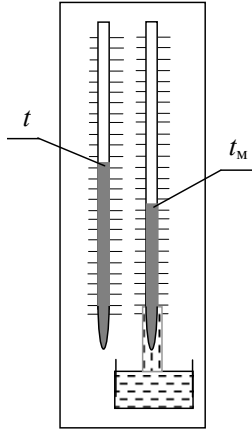


Рис. 3. Психрометр

- в атмосферном воздухе твердая фазы воды (т. ф.) может присутствовать только при температурах и парциальных давлениях пара, меньших (или равных) температуре и давлению тройной точки воды, так как только на линии сублимации AC возможно одновременное существование паровой и твердой фаз воды;

- плавление льда в атмосферном воздухе возможно только при температуре $0\text{ }^{\circ}\text{C}$;
- переход льда в паровую фазу при температурах меньше $0\text{ }^{\circ}\text{C}$ происходит, минуя жидкую фазу воды, по линии сублимации (AC);

- парциальное давление водяного пара при отрицательных температурах атмосферного воздуха не намного меньше давления тройной точки воды P_0 , следовательно, теплота изобарного охлаждения твердой фазы воды от $0\text{ }^{\circ}\text{C}$ может быть рассчитана по изобаре P_0 .

Энтальпия льда будет величиной отрицательной, поскольку начало отсчета ее идет от температуры $0\text{ }^{\circ}\text{C}$ жидкой фазы воды, а температура льда всегда меньше или равна $0\text{ }^{\circ}\text{C}$.

Расчетное выражение энтальпии твердой фазы воды (льда, снега) в атмосферном воздухе представляет собой сумму удельной теплоты плавления льда, взятой с отрицательным знаком, и удельной теплоты охлаждения льда от $t = 0\text{ }^{\circ}\text{C}$ до отрицательной температуры t :

$$h_{\tau} = -\lambda + c_{\text{пр}}(t - 0) = -335 + 2,17t,$$

где $\lambda = 335\text{ кДж/кг}$ – удельная теплота плавления льда при $t = 0\text{ }^{\circ}\text{C}$; $c_{\text{пр}} = 2,1\text{ кДж / (кг}\cdot\text{К)}$ – изобарная теплоемкость льда; взята при давлении тройной точки воды и принята величиной постоянной.

В результате всех вышеприведенных упрощений окончательное расчетное выражение энтальпии влажного атмосферного воздуха в кДж / (кг с.в.) примет вид

$$H = t + \frac{d_{\text{п}}}{1000}(2501 + 1,93t) + \frac{d_{\text{ж}}}{1000}4,187t + \frac{d_{\tau}}{1000}(-335 + 2,1t).$$

Экспериментально параметры влажного воздуха измеряют с помощью различных психрометров или гигрометров. Психрометр – это прибор, состоящий из двух термометров: сухого и мокрого (рис. 3). Мокрый термометр обернут тканью, смачиваемой водой. Сухой термометр показывает температуру t атмосферного влажного воздуха. Мокрый термометр показывает температуру $t_{\text{м}}$, которая в большинстве случаев меньше температуры сухого термометра. Понижение температуры $t_{\text{м}}$ по отношению к температуре t вызвано испарением воды из ткани. Однако $t_{\text{м}}$ будет больше температуры точки росы вследствие наличия теплообмена влажной ткани с окружающей средой, имеющей температуру $t > t_{\text{м}}$.

При насыщенном влажном воздухе вода не может испаряться из ткани и $t = t_{\text{м}}$. При ненасыщенном влажном воздухе $t > t_{\text{м}}$. Чем суше воздух, тем больше разница температур $t - t_{\text{м}}$ и тем меньше его влагосодержание. Зависимость влагосодержания $d_{\text{п}}$ для атмосферного воздуха от t и $t_{\text{м}}$ устанавливается экспериментально. Результаты этих испытаний сводятся в психрометрические таблицы, которыми пользуются для определения относительной влажности и влагосодержания воздуха по показаниям термометров психрометра.

С помощью гигрометров обычно определяют температуру точки росы, и это позволяет затем определить все остальные параметры влажного воздуха.

Для упрощения определения параметров атмосферного влажного воздуха используют $H-d$ -диаграмму влажного воздуха. Она строится для постоянного давления воздуха (обычно $P = 745\text{ мм рт. ст.}$), но поскольку парциальное давление водяного пара на несколько порядков меньше давления влажного воздуха, а атмосферное давление изменяется в небольших пределах, то, с достаточной для инженерных расчетов точностью, ими можно пользоваться и при других атмосферных давлениях воздуха.

Построение $H-d$ -диаграммы влажного воздуха основано на расчетном выражении (6) для энтальпии атмосферного влажного воздуха. $H-d$ -диаграмму строят в косоугольной системе координат, как правило, с углом между осями H и d в 135° . Это позволяет увеличить, по сравнению с прямоугольной системой координат, расстояние между изотермами и линиями других характеристик ненасыщенного влажного воздуха.

Рассмотрим принцип построения линий, изображенных на $H-d$ -диаграмме влажного воздуха (рис. 4). Ось абсцисс – это ось влагосодержаний d , имеет нулевое начало. Вертикальные линии в $H-d$ -диаграмме представляют линии постоянных влагосодержаний $d = \text{const}$. Линии постоянных энтальпий $H = \text{const}$ не параллельны оси d и идут под углом 135° к оси H . Для ненасыщенного влажного воздуха в $H-d$ -диаграмме (область выше линии $\varphi = 100\%$) изображение изотерм $t = \text{const}$ ведется в соответствии с уравнением энтальпии для этой области, когда в воздухе может присутствовать только паровая фаза воды:

$$H = t + \frac{d_{\text{п}}}{1000}(2501 + 1,93t).$$

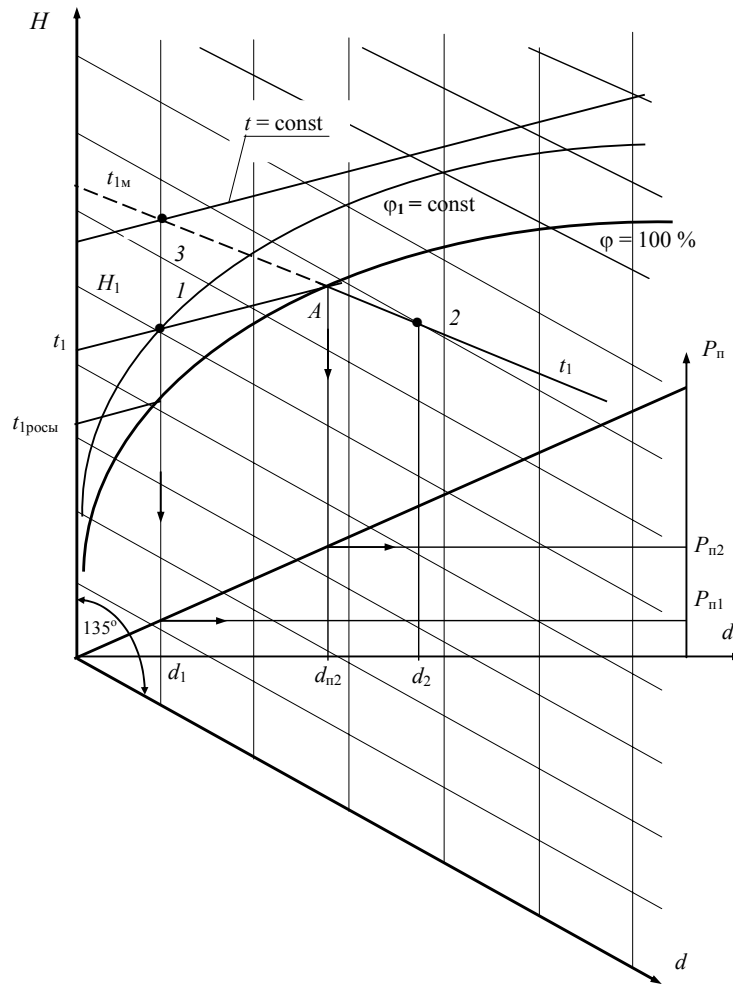


Рис. 4. Основные характеристики влажного атмосферного воздуха на H - d -диаграмме

Изотермы в этой области представляют собой близкие к параллельным прямые линии с угловым коэффициентом $(\partial H / \partial d) t = (2501 + 1,937t) / 1000$. Незначительное веерное расхождение изотерм вызвано произведением $1,937t$.

При $d = 0$ получается равенство $H = t$, т.е. численные значения энтальпий и температур на оси H одинаковы. Поэтому ось энтальпий одновременно выполняет и роль оси температур.

Каждой точке изотермы соответствует определенное значение относительной влажности воздуха φ . Это объясняется тем, что при $P = \text{const}$ и $t = \text{const}$ парциальное давление насыщения водяного пара постоянно $P_n = f(t) = \text{const}$.

Следовательно, на изотерме H - d -диаграммы влагосодержание пара

$$d = 622 \frac{\varphi P_n}{P - \varphi P_n}$$

однозначно определяет относительную влажность

$$\varphi = \frac{dP}{(d + 622)P_n}.$$

Соединив на изотермах точки с одинаковыми φ , получают линии постоянных относительных влажностей воздуха $\varphi = \text{const}$. Например, точке 1 на изотерме t_1 влагосодержанию пара d_1 соответствует относительная влажность φ_1 . При этом $\varphi = 0$ соответствует $d = 0$, т.е. линия $\varphi = 0$ совпадает с осью энтальпий H . Таким образом, ось энтальпий H на диаграмме выполняет три функции: является осью энтальпий, осью температур и линией постоянной относительной влажности воздуха при $\varphi = 0$. Линия постоянной максимальной относительной влажности $\varphi = 100\%$, соответствующая влажному насыщенному воздуху, в H - d -диаграмме при $d \rightarrow \infty$ стремится к изотерме 100°C , так как в этом случае P_n стремится к атмосферному давлению P , а $\varphi = \frac{dP}{(d + 622)P} = 1$.

При $\varphi < 100\%$ линии $\varphi = \text{const}$, достигая изотермы 100°C , превращаются в вертикальные прямые. В этом случае давление насыщения водяного пара становится равным атмосферному давлению (около 1 бар) и при дальнейшем увеличении температуры больше изменяться не может ($P_n = P = \text{const}$). Соответственно не меняется при $\varphi = \text{const}$ в этой области и влагосодержание воздуха

$$d = 622 \frac{\varphi P_n}{P - \varphi P_n} = 622 \frac{\varphi}{1 - \varphi} = \text{const},$$

т.е. линии $\varphi = \text{const}$, идущие выше изотермы $t = 100^\circ\text{C}$, в H - d -диаграмме представляют вертикальные прямые (см. рис. 5).

Поскольку давление насыщения водяного пара с уменьшением температуры уменьшается, то и влагосодержание пара для ненасыщенного влажного воздуха $d = 622\varphi P_n / (P - \varphi P_n)$ на линии $\varphi = \text{const}$ в области низких температур будет меньше, чем влагосодержание пара на этих же линиях в области высоких температур. Поэтому линии $\varphi = \text{const}$ с уменьшением влагосодержания воздуха перемещаются в область более низких температур и приближаются к оси H . В области отрицательных температур линии $\varphi = \text{const}$ на H - d -диаграмме расположены очень близко друг к другу и приближаются к оси H почти вплотную.

Для полноты информации о влажном воздухе на H - d -диаграмму накладывается прямоугольная диаграмма $P_n = f(d)$, отражающая зависимость парциального давления водяного пара от влагосодержания водяного пара в воздухе. Из формулы (3) найдем $d_n = 622P_n / (P - P_n)$. Поскольку полное давление воздуха P намного больше парциального давления пара P_n , то зависимость $P_n = f(d)$ представляет собой практически прямую линию:

$$P_n = \frac{622}{P} d_n.$$

В области перенасыщенного влажного воздуха (ее называют областью тумана, она расположена на H - d -диаграмме ниже линии $\varphi = 100\%$) кроме паровой фазы в воздухе может присутствовать жидкая или твердая фаза воды. При атмосферном давлении воздуха и температуре выше 0°C могут одновременно существовать только паровая и жидкая фазы воды, а при температурах ниже 0°C – только паровая и твердая (лед, снег) фазы воды, и только при 0°C могут одновременно существовать все три фазы воды. Такое поведение воды в атмосферном воздухе объясняется тем, что жидкая фаза воды при отрицательных температурах может существовать только при давлениях выше давления тройной точки воды P_0 , а максимальное парциальное давление водяного пара в атмосферном воздухе при этих температурах не может быть больше этого давления.

Наглядно показать области возможного фазового существования воды в атмосферном воздухе можно в фазовой диаграмме P - t для воды (см. рис. 2). Заштрихованная площадь соответствует возможному состоянию воды в атмосферном воздухе. Сверху эта область ограничена максимальным парциальным давлением насыщения водяного пара, соответствующим температуре 100°C . Более высокого парциального давления водяного пара в атмосферном воздухе быть не может, поскольку парциальное давление водяного пара при температуре воздуха 100°C равно полному давлению воздуха $P_{n\text{max}} = P$. Слева ограничение этой области идет по линиям фазовых переходов: по линии насыщения AK – где может находиться одновременно жидкая и паровая фазы воды, и по линии сублимации AC – где возможно одновременное существование твердой и паровой фазы воды.

Характер изотерм в области перенасыщенного влажного воздуха (область тумана) H - d -диаграммы при температурах больше 0°C определяет уравнение энтальпии влажного воздуха в виде

$$H = t + \frac{d}{1000} (2501 + 1,93t) + \frac{d_{\text{ж}}}{1000} 4,187t.$$

Количество водяного пара в области тумана влажного воздуха при постоянной температуре не меняется. Оно соответствует максимально возможному влагосодержанию пара в воздухе при данной температуре и определяется в H - d -диаграмме на линии $\varphi = 100\%$, как влагосодержание насыщенного воздуха. Например, для температуры t_1 максимальное влагосодержание пара $d_{n2} = d_{n1}$ (рис. 4, точка A). Увеличение влагосодержания воздуха на изотерме в области тумана обусловлено увеличением жидкой фазы воды в воздухе. Парциальное давление водяных паров на изотерме в области тумана при этом остается постоянным и равным давлению насыщения (для точки 2 на изотерме t_1 $P_{n2} = P_{n1}$). Таким образом, в выражении энтальпии перенасыщенного влажного воздуха при $t = \text{const}$ переменной будет только третье слагаемое, определяющее угол наклона изотермы в области тумана H - d -диаграммы выражением $(\partial H / \partial d) t = 4,1877t / 1000$. Оно намного меньше соответствующего выражения для изотермы ненасыщенного влажного воздуха, равного $(\partial H / \partial d) t = (2501 + 1,937t) / 1000$, т.е. на линии $\varphi = 100\%$ прямая изотермы претерпевает излом, уменьшая угол наклона к оси d в области тумана.

Меньший угол наклона изотерм в области тумана будет соответствовать меньшему значению температуры, а изотерма 0°C в этой области при наличии в воздухе только паровой и жидкой фазы воды совпадает с линией постоянных энтальпий – параллельна оси d . Совпадение изотермы 0°C с $H = \text{const}$ в этом случае объясняет ее угловой коэффициент $(\partial H / \partial d)_{t=0} = 0$.

Определение влагосодержания жидкой фазы воды в воздухе в области тумана выполняется нахождением разницы общего влагосодержания и влагосодержания паровой фазы воды. Например, для точки 2 влагосодержание жидкой фазы равно $d_{\text{ж}2} = d_2 - d_{n2}$.

Поскольку в практике определения параметров влажного воздуха используется психрометр, изотермы перенасыщенного влажного воздуха в H - d -диаграмме продолжают из области тумана в область ненасыщенного влажного воздуха (выше линии $\varphi = 100\%$) в виде прямых пунктирных (условных) линий, что позволяет показать изотермы мокрого термометра психрометра на H - d -диаграмме. Показания мокрого термометра психрометра соответствуют температурам насыщенного (перенасыщенного) влажного воздуха, что позволяет по H - d -диаграмме по показаниям сухого и мокрого термометров определить все остальные характеристики ненасыщенного влажного воздуха (по t и $t_{1\text{м}}$ определяется точка 3). Для нахождения места расположения точки в области тумана на H - d -диаграмме показаний психрометра недостаточно, так как

температуры сухого и мокрого термометров одинаковы. В этом случае необходимо опытным путем определить полное влагосодержание воздуха.

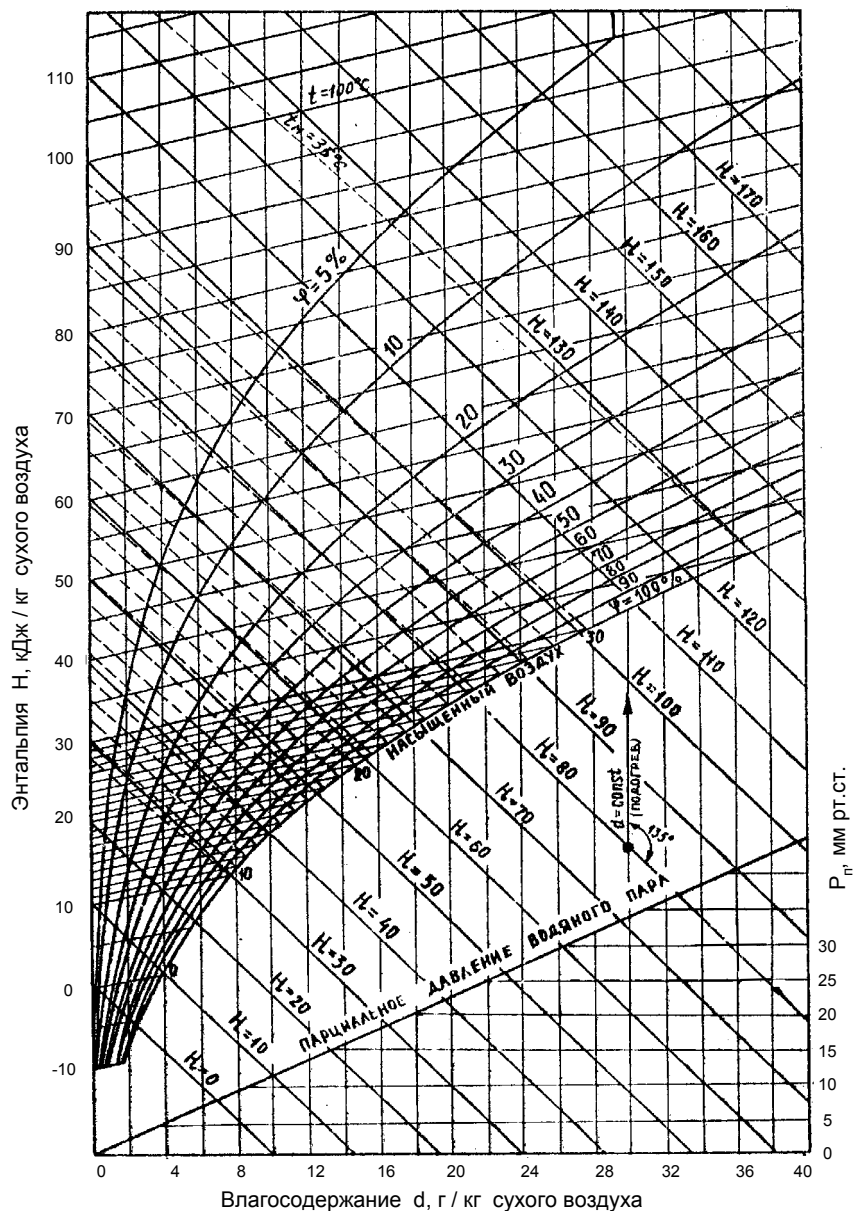


Рис. 5. $H-d$ -диаграмма влажного атмосферного воздуха при $P = 745$ мм рт. ст.

На рис. 5 показана $H-d$ -диаграмма, используемая для практической деятельности. В этой диаграмме в области ниже $\phi = 100\%$ не показаны изотермы, но их можно получить, продлив изотермы мокрого термометра в эту область.

3. ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНАЯ УСТАНОВКА

Схемы экспериментальной установки и ее рабочего участка представлены на рис. 6 и 7. Рисунок 6 иллюстрирует общее устройство установки, расположение на ней основных приборов и устройств управления. Подробная расшифровка названия каждого из элемента общей схемы дает хорошее представление об их назначении и выполняемых функциях.

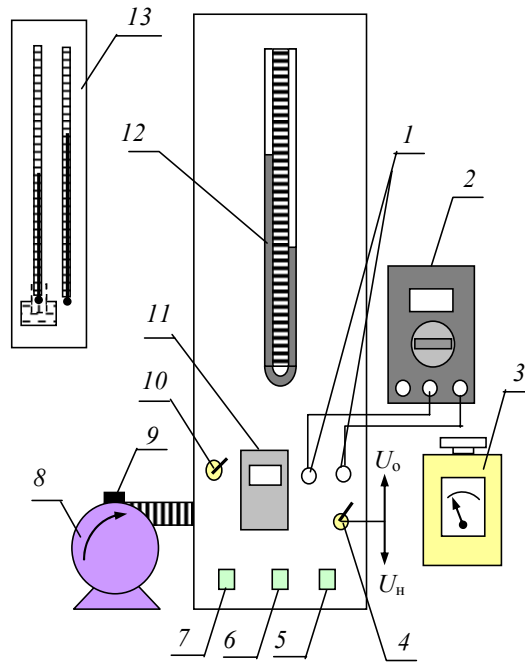


Рис. 6. Схема экспериментальной установки:

- 1 – разъемы для подключения вольтметра; 2 – вольтметр;
- 3 – регулятор напряжения на нагревателе калорифера;
- 4 – тумблер переключения измерения напряжения U_n на нагревателе и U_o на образцовом сопротивлении; 5 – кнопка включения нагревателя;
- 6 – кнопка включения вентилятора; 7 – кнопка включения установки "сеть";
- 8 – вентилятор; 9 – регулятор расхода вентилятора; 10 – тумблер включения прибора измерения температуры; 11 – восьмиканальный измеритель температуры;
- 12 – U-образный манометр; 13 – лабораторный психрометр

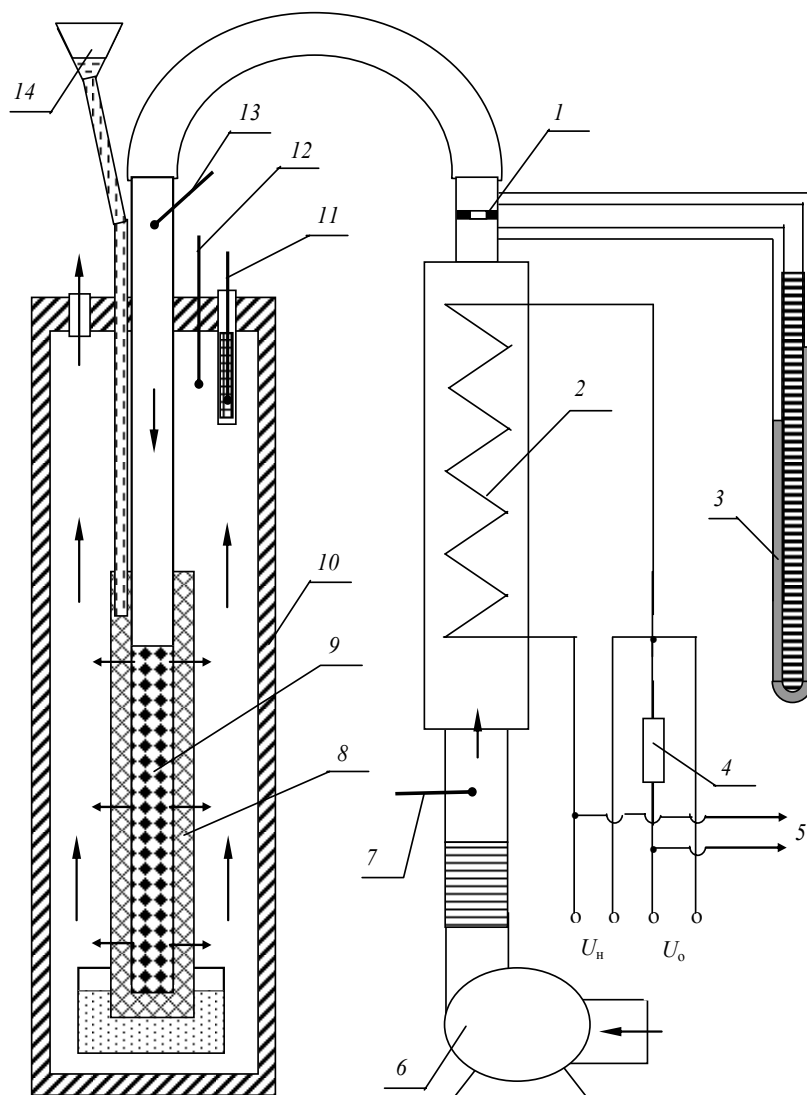


Рис. 7. Схема рабочего участка установки:

1 – измерительная диафрагма; 2 – калорифер; 3 – U-образный манометр;
 4 – образцовое сопротивление; 5 – подключение к регулятору напряжения;
 6 – вентилятор; 7 – термопара на входе в калорифер; 8 – смоченная водой
 х/б ткань; 9 – трубка с отверстиями; 10 – сушильная камера;
 термопары на выходе из сушильной камеры: 11 – мокрая, 12 – сухая;
 13 – термопары на выходе из калорифера; 14 – капельница воды

Работу установки легко понять по рис. 7. Из помещения лаборатории воздух, состояние которого определяется барометром и психрометром, вентилятором 6 подается в калорифер 2, где он нагревается с помощью электронагревателя. Температура на входе и выходе калорифера измеряется термопарами 7 и 3, расход воздуха определяется с помощью измерительной диафрагмы 1 (диаметр $D = 9$ мм) по перепаду давления на ней, измеряемому U-образным водяным манометром 3.

Далее нагретый воздух по трубке 9 поступает в сушильную камеру 10, где он, проходя через отверстия трубки 9, испаряет влагу из материи 8, обернутой снаружи трубки. Вода подается на материю 8 через капельницу 14. Забрав в себя испаренную из материи влагу, воздух при температуре, фиксируемой сухой 12 и мокрой 11 термопарами, выходит из сушильной камеры в помещение лаборатории.

ПОРЯДОК ПРОВЕДЕНИЯ ОПЫТА

1. Записать в журнал наблюдений показания лабораторного барометра и психрометра (поз. 13, рис. 6).
2. Подключить стенд к розетке электросети. **Внимание!** Студенты выполняют только пункты 1, 9 и 10. Пункты 2 – 8 и 11 выполняются обслуживающим персоналом лаборатории или преподавателем, с остальными пунктами студенты знакомятся и наблюдают их выполнение преподавателем или лаборантом.
3. Соединить проводами гнезда мультиметра 2 с гнездами 1 (рис. 6) на передней панели установки для измерения напряжения U_0 на образцовом сопротивлении и U_n на нагревателе калорифера. Включить мультиметр в режим измерения напряжения переменного тока.

4. Смочить ткань 8 (рис. 7) в сушильной камере дистиллированной водой, залив ее в количестве 30 мл в капельницу 14. Смачивания производить через 10 минут.

5. Вынуть термопару 11 из гильзы и смочить ткань на ней дистиллированной водой. Установить термопару в гильзу. Смачивания производить через каждые 10 минут.

6. Включить кнопку 7 "сеть" (здесь и далее по рис. 6) и тумблер включения прибора измерения температур 10. Проверить с помощью кнопок $\uparrow \downarrow$ на приборе 1 работу первых четырех термопар.

7. Включить кнопку 6 "вентилятор" и установить регулятором мощности вентилятора 9 требуемый расход воздуха, ориентируясь на показания манометра 12 (в пределах 20...40 мм вод. ст.).

8. Включить кнопку 5 "нагрев" и установить требуемое напряжение на нагревателе калорифера с помощью регулятора напряжения 3, ориентируясь на показания мультиметра 2 при положении тумблера 4 вниз на измерение U_n (в диапазоне 80...120 В). При этом температура по показаниям второй термопары прибора 1 должна находиться на уровне 50...70 °С.

9. Записать в журнал наблюдений показания приборов стенда:

– мультиметра 2 – напряжение U_o (положение переключателя 4 вверх) и напряжение U_n (положение переключателя 4 вниз);

– манометра 12, измеряющего перепад давлений на измерительной диафрагме, величину Δh ;

– прибора 11, измеряющего температуры t_1, t_2, t_3, t_4 , соответствующие каналам прибора с первого по четвертый.

10. Повторить все измерения через 5 минут, данные измерений занести в журнал наблюдений.

11. Изменить напряжение питания нагревателя регулятором 3 (увеличив или уменьшив его на 10...15 В. Через 5 минут повторить измерения по пункту 9.

12. Отключение установки происходит в обратном порядке по отношению к включению:

– регулятором напряжения 3 устанавливается $U_n = 0$ и отключается нагреватель калорифера кнопкой 5;

– регулятором расхода воздуха 9 устанавливается минимальный расход и кнопкой 6 отключается вентилятор;

– тумблером 10 отключается прибор измерения температур;

– кнопкой 7 "сеть" отключается напряжение от установки и вынимается электрическая вилка из розетки электропитания.

4. ЖУРНАЛ НАБЛЮДЕНИЙ

Дата "___" _____ 200__ г.

Подпись студента

Подпись преподавателя

Атмосферное давление $B =$ ___ мм рт. ст.,

Показания психрометра в лаборатории:

Температура сухого термометра $t_0 =$ ___ °С,

Температура мокрого термометра $t_{0м} =$ ___ °С

1. Исходные опытные данные

№ п/п	U_n , В	U_o , В	Δh , мм	t_1 , °С	t_2 , °С	t_3 , °С	t_4 , °С	Примечание
1								
2								
3								

В таблице обозначено: U_n – напряжение на нагревателе; U_o – падение напряжения на образцовом сопротивлении; Δh – перепад давлений на измерительной диафрагме в мм вод. ст.; t_1, t_2 – температуры на входе и выходе из калорифера; t_3 – температура сухого термометра на выходе из сушильной камеры; t_4 – температура мокрого термометра на выходе из сушильной камеры.

5. МЕТОДИКА ОБРАБОТКИ РЕЗУЛЬТАТОВ ЭКСПЕРИМЕНТА

Определение массового расхода влажного воздуха через установку $G_{вв}$ в кг/с выполняется по формуле (7) для расходомерной диафрагмы:

$$G_{вв} = \phi f \sqrt{2\rho_2 \Delta p}, \quad (7)$$

где ϕ – коэффициент расхода диафрагмы, который определяется при ее тарировке; f – площадь минимального сечения отверстия диафрагмы, м²; ρ_2 – плотность воздуха на входе в диафрагму, кг/м³; Δp – перепад давлений на диафрагме, Па.

Для упрощения расчетов выражение (7) будет использовано в виде формулы (8), где произведение первых трех множителей для измерительной диафрагмы данной установки представлено одним числом:

$$G_{вв} = 71 \cdot 10^{-6} \sqrt{\rho_2 \Delta p}. \quad (8)$$

Определение плотности влажного воздуха выполняется по уравнению состояния идеального газа

$$\rho_2 = \frac{1}{v_2} = \frac{p_2}{R_{\text{вв}} T_2},$$

где p_2 – давление воздуха перед диафрагмой, принимается равным давлению атмосферного воздуха B , определенному по лабораторному барометру и выраженному в Па; T_2 – температура воздуха перед диафрагмой, К; $R_{\text{вв}}$ – газовая постоянная влажного воздуха определяемая по формуле (2) при $P_{\text{п}} = P_{\text{п2}}$, т.е. при парциальном давлении водяного пара в воздухе за калорифером (определяется по H - d -диаграмме).

Расчет перепада давления на диафрагме определяется по показаниям U -образного манометра при плотности воды в нем $\rho_{\text{H}_2\text{O}} = 1000 \text{ кг/м}^3$:

$$\Delta p = \rho_{\text{H}_2\text{O}} g \Delta h,$$

где ρ – плотность влажного воздуха, определяемая по формуле (3); Δh – разница уровней воды в манометре, м; g – ускорение свободного падения, $g = 9,81 \text{ м/с}^2$.

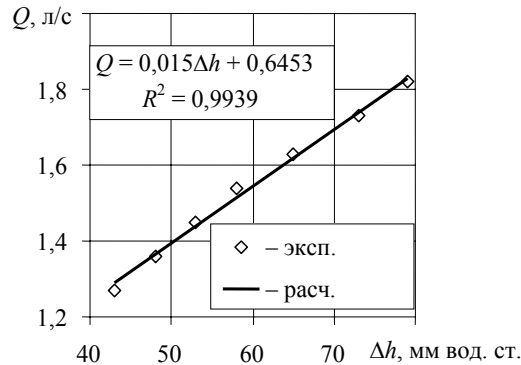


Рис. 8. Калибровочный график мерительной диафрагмы

Для определения расхода влажного воздуха можно пользоваться и полученным в результате предварительной калибровки с помощью ротаметра графиком зависимости объемного расхода Q от перепада давлений Δh на ней. Такой калибровочный график приведен на рис. 8. Там же приведена аппроксимирующая опытные точки расчетная формула, с погрешностью не более $\pm 1,5 \%$ описывающая выявленную зависимость.

Расход сухого воздуха, проходящего через установку, определяется вычитанием из расхода влажного воздуха содержания водяного пара в нем, что соответствует выражению

$$G = \frac{G_{\text{вв}}}{1 + \frac{d_1}{1000}},$$

где d_1 – влагосодержание водяных паров в воздухе за калорифером в г / (кг с. в.) определяется по H - d -диаграмме.

Процесс 1–2 нагрева воздуха в калорифере установки (см. рис. 9) строится по показаниям психрометра (температуры t_0 и $t_{0\text{м}}$) и показаниям термопар на входе t_1 и выходе t_2 из калорифера.

По показаниям лабораторного психрометра t_0 и $t_{0\text{м}}$ по диаграмме H - d определяется влагосодержание воздуха на входе в установку d_1 . По этому влагосодержанию и показаниям термопар на входе t_1 и выходе t_2 калорифера строится процесс нагрева воздуха в калорифере, где он идет при $d_1 = \text{const}$, так как в калорифере воздух не контактирует с содержащими воду объектами.

По показаниям термопар сухой t_3 и мокрой t_4 определяется точка 3 на H - d -диаграмме, соответствующая состоянию воздуха на выходе из сушильной камеры. Для всех трех точек процесса 1–2–3 по H - d -диаграмме определяются следующие величины: d – влагосодержание; $p_{\text{п}}$ – парциальное давление водяного пара в воздухе; $t_{\text{р}}$ – температура точки росы; φ – относительная влажность; H – энтальпия влажного воздуха.

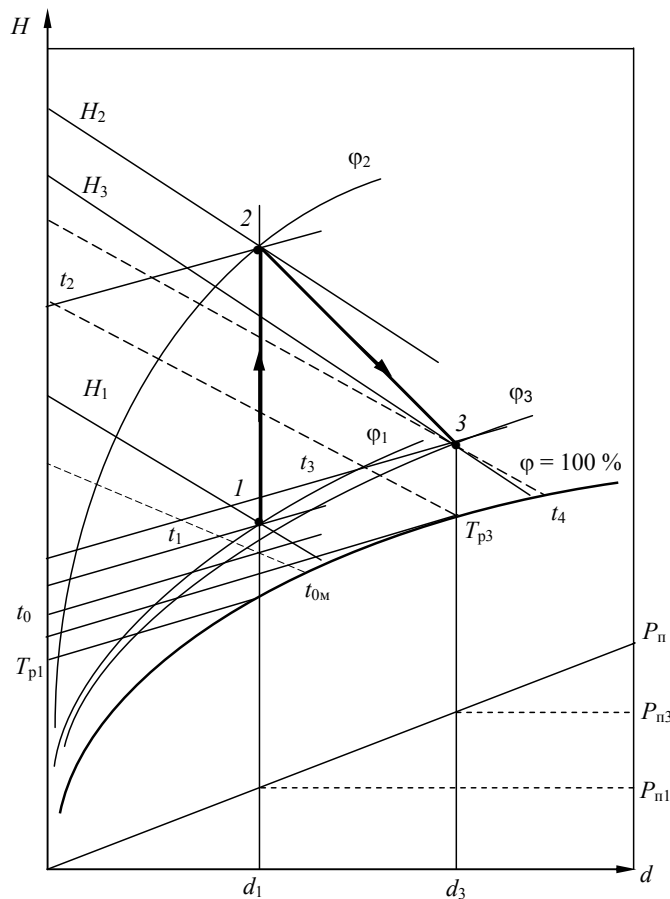


Рис. 9. Построение процессов в калорифере и сушильной камере на $H-d$ -диаграмме

Величину абсолютной влажности воздуха $\rho_{\text{вв}}$ в этих точках по диаграмме $H-d$ определить нельзя, поэтому ее определяют по таблицам термодинамических свойств воды и водяного пара как функцию от температуры и парциального давления водяного пара. Правильность определения абсолютной влажности воздуха проверяют, используя уравнение состояния идеального газа, применительно к водяному пару во влажном воздухе

$$\rho_{\text{вв}} = \frac{1}{v_{\text{H}_2\text{O}}} = \frac{p_{\text{п}}}{R_{\text{H}_2\text{O}}T}$$

Результаты определения основных характеристик точек процесса $1-2-3$ записывают в сводную таблицу результатов (табл. 2).

2. Таблица результатов обработки

Точка	$t, ^\circ\text{C}$	$d, \text{г/кг с. в.}$	$t_{\text{р}}, ^\circ\text{C}$	$p_{\text{п}}, \text{Па}$	$\varphi, \%$	$H, \text{кДж/кг с. в.}$	$\rho_{\text{вв}}, \text{кг/м}^3$
1							
2							
3							

Определение потерь теплоты в калорифере ведется сравнением теплоты, выделенной электрическим нагревателем калорифера, и теплоты воспринятой воздухом в калорифере. Теплота, выделенная электрическим нагревателем калорифера, рассчитывается по формуле

$$Q_{\text{к}} = U_{\text{н}} I, \text{Вт},$$

где $U_{\text{н}}$ – напряжение на электрическом нагревателе, В; I – ток на электрическом нагревателе, А, который определяется по образцовому сопротивлению $R_0 = 0,1 \text{ Ом}$ (рис. 7, поз. 4), последовательно включенному в цепь с нагревателем. Измерив U_0 , находим

$$I = U_0 / R_0.$$

Теплота, воспринятая воздухом в калорифере, рассчитывается по выражению

$$Q_v = G (H_2 - H_1), \text{ кВт},$$

где H_2 и H_1 – энтальпии влажного воздуха на выходе и входе в калорифер в кДж / (кг с. в.).

Потери теплоты в калорифере во внешнюю среду определяются как разность

$$Q_{\text{пот}}^{\text{к}} = Q_{\text{к}} - Q_v, \text{ кВт}.$$

Потери теплоты в сушильной камере определяются путем сопоставления реального процесса сушки 2–3 с идеальным процессом сушки (без потерь теплоты во внешнюю среду), который идет при постоянной энтальпии $H_2 = \text{const}$.

Расчетное выражение потерь теплоты в сушильной камере во внешнюю среду выполняется по формуле

$$Q_{\text{пот}}^{\text{ск}} = G (H_2 - H_3), \text{ кВт},$$

где H_2 и H_3 – энтальпии влажного воздуха на входе и выходе из сушильной камеры соответственно в кДж / (кг с. в.).

Общие потери теплоты в установке соответствуют сумме

$$Q_{\text{пот}}^{\text{общее}} = Q_{\text{пот}}^{\text{к}} + Q_{\text{пот}}^{\text{ск}}, \text{ кВт}.$$

Для определения количества теплоты, необходимого для испарения 1 кг влаги в данной установке, сначала рассчитывается количество сухого воздуха, необходимого для испарения 1 кг воды, по формуле

$$G_{\text{св}} = \frac{1000}{d_3 - d_1}, \text{ (кг с. в.) / (кг исп. вл.)},$$

где $(d_3 - d_1)$ – количество водяного пара испаренное 1 кг сухого воздуха в г.

Количество теплоты, затраченной в калорифере на нагрев воздуха, для испарения 1 кг воды будет соответствовать выражению

$$Q = G_{\text{св}} (H_2 - H_1), \text{ кДж / (кг исп. вл.)}.$$

Действительное количество теплоты, затраченное в установке для испарения 1 кг воды, будет соответствовать выражению

$$Q_{\text{д}} = \frac{Q_{\text{к}}}{G (d_3 - d_1)}, \text{ кДж / (кг исп. вл.)},$$

где $Q_{\text{к}}$ в Вт, G в кг/с, d_3 и d_1 в г / (кг с. в.).

Результаты расчета сводятся в табл. 3.

3. Результаты расчетов процессов в сушильной установке

Q , кВт	Q_v , кВт	$Q_{\text{пот}}^{\text{к}}$, кВт	$Q_{\text{пот}}^{\text{ск}}$, кВт	$Q_{\text{пот}}^{\text{общее}}$, кВт	$G_{\text{св}}$, кг / (кг исп. вл.)	Q , кДж / (кг исп. вл.)	$Q_{\text{д}}$, кДж / (кг исп. вл.)

Результаты расчета процессов в сушильной установке анализируются на основании данных таблиц 2 и 3. По результатам этого анализа делаются краткие выводы об эффективности работы данной установки и ее недостатках.

6. ТРЕБОВАНИЯ К ОФОРМЛЕНИЮ ОТЧЕТА

Отчет составляется каждым студентом и включает следующие разделы:

1. Название работы и ее цель.
2. Схематичное изображение рабочего участка лабораторного стенда с указанием его элементов.
3. Журнал наблюдений.
4. Схематичное изображение процессов, проходящих в установке, в $H-d$ -диаграмме влажного воздуха.
5. Обработка опытных данных и расчет процессов в установке.
6. Результаты расчета и их анализ (по данным таблиц 2 и 3).

7. КОНТРОЛЬНЫЕ ВОПРОСЫ ДЛЯ ЗАЩИТЫ РАБОТЫ

1. Дайте характеристику термическим параметрам атмосферного влажного воздуха.
2. Дайте понятия и расчетные выражения абсолютной и относительной влажности воздуха, поясните какие допущения делаются для атмосферного влажного воздуха и какие формулы при этом используются для расчета абсолютной и относительной влажности.
3. Назовите основные состояния влажного воздуха и соответствующие этим состояниям параметры и характеристики влажного воздуха. Покажите состояния водяного пара в этом воздухе на $P-v$ -диаграмме.
4. Дайте понятие температуры точки росы и покажите эту изотерму на $P-v$ -диаграмме для водяного пара. Поясните практическое значение температуры точки росы.
5. Дайте понятие влагосодержания воздуха и выведите расчетное выражение влагосодержания пара для атмосферного влажного воздуха.
6. Напишите расчетное выражение энтальпии влажного воздуха при наличии в нем паровой, жидкой и твердой фаз воды. Поясните, какие требования предъявляются к удельным энтальпиям, входящим в это уравнение.
7. Поясните принцип работы психрометра и его практическое предназначение.
8. Поясните принцип построения изотерм в области ненасыщенного влажного воздуха на $H-d$ -диаграмме.
9. Поясните принцип построения линий постоянных относительных влажностей для влажного атмосферного воздуха на $H-d$ -диаграмме.
10. Поясните принцип построения изотерм в области перенасыщенного влажного воздуха на $H-d$ -диаграмме и изотерм влажного термометра психрометра в области ненасыщенного воздуха.
11. Поясните особенность линий постоянных относительных влажностей атмосферного воздуха при температурах больше $100\text{ }^{\circ}\text{C}$.
12. На основании какого выражения строится зависимость парциального давления пара от влагосодержания на $H-d$ -диаграмме?
13. Поясните назначение калорифера в сушильной установке.
14. Рассчитайте, какое теоретически минимальное количество сухого воздуха необходимо пропустить через установку для испарения 1 кг вода при выключенном нагревателе калорифера.
15. Рассчитайте, какое количество сухого воздуха необходимо пропустить через установку для испарения 1 кг вода при отсутствии потерь теплоты в сушильной камере.
16. Поясните, почему процесс идеальной сушки идет при постоянной энтальпии.
17. Поясните, как определяется парциальное давление пара в области перенасыщенного влажного воздуха на $H-d$ -диаграмме.
18. Поясните, как определяется температура точки росы в области перенасыщенного влажного воздуха на $H-d$ -диаграмме.
19. Поясните, как определяются влагосодержания паровой и жидкой фаз воды в области перенасыщенного влажного воздуха на $H-d$ -диаграмме.
20. Определите по $H-d$ -диаграмме, какое количество жидкости выпадет из 1 кг влажного воздуха в состоянии точки I , если его охладить до температуры 10 (или 15) $^{\circ}\text{C}$.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Кириллин, В.А. Техническая термодинамика : учебник / В.А. Кириллин, В.В. Сычев, А.Е. Шейдлин. – М., 1983. – 416 с.
2. Ляшков, В.И. Теоретические основы теплотехники : учебное пособие / В.И. Ляшков. – М., 2005. – 260 с.
3. Александров, А.А. Таблицы теплофизических свойств воды и водяного пара : справочник / А.А. Александров, Б.А. Григорьев. – М., 1999. – 168 с.

ОГЛАВЛЕНИЕ

1. ЦЕЛЬ И ЗАДАЧИ ЛАБОРАТОРНОЙ РАБОТЫ	3
2. ОСНОВНЫЕ ТЕОРЕТИЧЕСКИЕ ПОЛОЖЕНИЯ	3
3. ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНАЯ УСТАНОВКА	16
4. ЖУРНАЛ НАБЛЮДЕНИЙ	19
5. МЕТОДИКА ОБРАБОТКИ РЕЗУЛЬТАТОВ ЭКСПЕРИМЕНТА	20
6. ТРЕБОВАНИЯ К ОФОРМЛЕНИЮ ОТЧЕТА	25
7. КОНТРОЛЬНЫЕ ВОПРОСЫ ДЛЯ ЗАЩИТЫ РАБОТЫ	25
СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ	26