

**МИНИСТЕРСТВА СЕЛЬСКОГО И ВОДНОГО ХОЗЯЙСТВА
РЕСПУБЛИКИ УЗБЕКИСТАН**

ТАШКЕНТСКИЙ ИНСТИТУТ ИРРИГАЦИИ И МЕЛИОРАЦИИ

Кафедра: “Механизация гидромелиоративных работ”

«ИЗУЧЕНИЕ СВОЙСТВА ВЛАЖНОГО ВОЗДУХА»

Методическое пособие

Ташкент - 2007

Данное методическое пособие утверждено и рекомендовано к опубликованию решением Научно-методического Совета ТИИМ, Протокол заседания под №7 от 26 апреля 2007 года.

Данное Методическое пособие выполнено на кафедре «Механизация гидромелиоративных работ» факультета «Автоматизация и механизация водного хозяйства», в ней приводятся необходимые сведения по свойствам влажного воздуха и методы определения его параметров, знание которых необходимы во многих технологических процессах сельского и водного хозяйства. Подробно рассматривается H-d диаграмма влажного воздуха и методика пользования ею. Оно рассчитано для студентов направления образования «Механизация водохозяйственных и мелиоративных работ», «Электроэнергетика», «Автоматизация и управления», «Механизация сельского хозяйства», «Электрификация и автоматизация сельского хозяйства», «Безопасность жизнедеятельности».

Составитель:

Б.П.Шаймарданов

Рецензенты:

Э.Т.Фармонов – доцент Ташкентского
Государственного Аграрного Университета;

М.Т.Халилов-доцент Ташкентского
Государственного Технического
Университета.

© Ташкентский институт ирригации и мелиорации, 2007 г.

Общие положения.

В воздухе всегда содержится то или иное количество водяного пара.

Такую смесь сухого воздуха с водяным паром называют **влажным воздухом**.

Знание свойства влажного воздуха имеет большое практическое значение, так как, например, известно, что во многих технологических процессах сельского и водного хозяйства, особенно в процессах хранения и сушки сельхозпродуктов, на животноводческих и птицеводческих фермах для систем вентиляции, отопления и кондиционирования в культивационных сооружениях, в расчетах испарения воды от свободной поверхности водохранилищах, ирригационных сооружениях, качество продукции, производительность оборудования и труда, нормальное физиологическое развитие животных, птиц и растений, а также их продуктивность в значительной степени зависит от состояния воздуха (влажности и температуры его) в конкретном помещении.

Изучение работы вентиляционно-увлажнительных, сушильных, систем кондиционирования, и других установок, в расчетах испарения воды от свободной поверхности невозможно без знания основных свойств влажного воздуха.

Для практики представляет интерес влажный воздух при атмосфере (или близком к атмосферному) давлении и при не слишком низких температурах (0-10⁰С). Парциальное давление водяного пара в воздухе невелико – всего несколько десятков мм. рт. столба. Поэтому с достаточной для технических расчетов точностью можно применять к влажному воздуху и водяному пару в нем соотношения, полученные для идеального газа, в частности уравнения состояния

$$pV=MRT, \quad \text{а также закон Дальтона: } P = \sum_1^n P_i .$$

По закону Дальтона каждый компонент смеси ведет себя так, как будто он один и при температуре смеси занимает весь предоставленный этой смеси объем, т.е.

$$V_{\text{св}} = V_{\text{п}} = V \quad , \quad (1)$$

$$T_{\text{св}} = T_{\text{п}} = T \quad , \quad (2)$$

V, T -объем и температура смеси, т.е. влажного воздуха;

$V_{св}, V_{п}, T_{св}, T_{п}$ -объемы, температуры сухого воздуха (св) и водяного пара (п).

Каждый компонент находится под своим, так называемым, парциальным давлением и сумма этих давлений равна давлению смеси, т.е. в данном случае давлению влажного воздуха – B (будем рассматривать его при барометрическом давлении)

$$B = P_{св} + P_{п}, \quad (3)$$

$P_{св}, P_{п}$ - парциальные давления сухого воздуха и водяного пара.

Чем больше водяного пара находится в воздухе, тем больше его парциальное давление в смеси.

Парциальное давление водяного пара во влажном воздухе не может быть выше давления насыщения $P_{н}$ при данной температуре воздуха (и пара в нем), т.е.

$$P_{п} \leq P_{н}, \quad (4)$$

Это видно при рассмотрении состояния водяного пара в PV -диаграмме (рис.1).

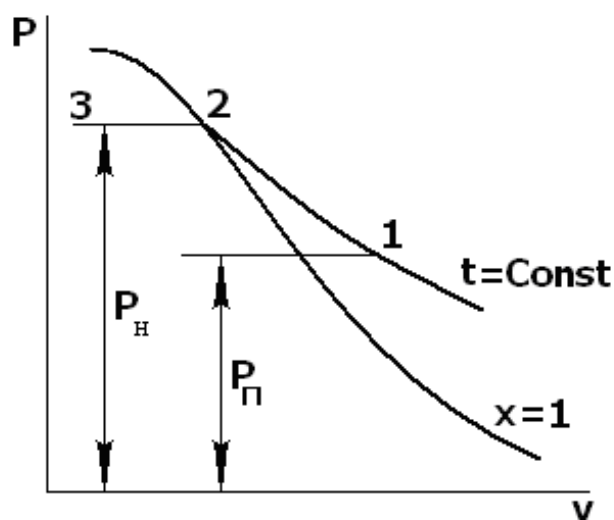


Рис.1. Состояние водяного пара в PV -диаграмме

Влажный воздух, в котором $P_{п} < P_{н}$ называется **насыщенным**. Он состоит из смеси сухого воздуха и перегретого пара (точка 1 на рис.1) и может содержать большее количество пара, т.е. парциальное давление $P_{п}$ может быть выше (легко убедиться, перемещая точку 1 по изотерме вверх).

Влажный воздух, у которого $P_{\text{п}} = P_{\text{н}}$ называется **насыщенным** влажным воздухом, потому что он содержит максимально возможное при данной температуре количество пара.

Насыщенный влажный воздух - это смесь сухого воздуха и сухого насыщенного водяного пара (точка 2 лежит на линии насыщения $x = 1$).

Воздух может быть и перенасыщенным, т.е. содержать влажный насыщенный пар (точка 3 на рис.1). Это состояние (тумана) технического интереса не представляет.

Следует усвоить принципиальное разное значение термина «влажный» применительно к пару и воздуха.

Пар называется влажным только в том случае, если он содержит мелкодисперсную жидкость, воздух же называется влажным всегда, когда он содержит водяной пар в любом (даже перегретом) состоянии.

Абсолютная и относительная влажность воздуха

Абсолютной влажностью воздуха называется массовое или весовое количество водяного пара, содержащееся в одном кубометре влажного воздуха (при $P_{\text{п}}$ и температуре воздуха).

Учитывая, что в кубометре влажного воздуха пар занимает при парциальном давлении объем тоже один кубометр (1), абсолютная влажность численно равна плотности или удельному весу пара при его парциальном давлении и температуре воздуха.

Поэтому абсолютную влажность принято обозначать так же, как и плотность $\rho_{\text{п}}$ (или удельную вес $\gamma_{\text{п}}$), т.е.

$$\rho_{\text{п}} = M_{\text{п}} / V, \text{ кг/м}^3; \quad \gamma_{\text{п}} = G/V, \text{ кгс/м}^3, \quad (5)$$

В точке 1 (рис.2) при температуре t и парциальном давлении $P_{\text{п}}$ (полное давление влажного воздуха - B) пар перегретый. Его удельный объем v_1 и плотность (или абсолютная влажность)

$$\rho_{\text{п}} = 1 / v_1$$

В данном состоянии воздух ненасыщенный. Перемещая точку 1 по изотерме вверх видим, что при данной температуре количество пара увеличивается,

парциальное давление растет, удельный объем уменьшается, а плотность увеличивается.

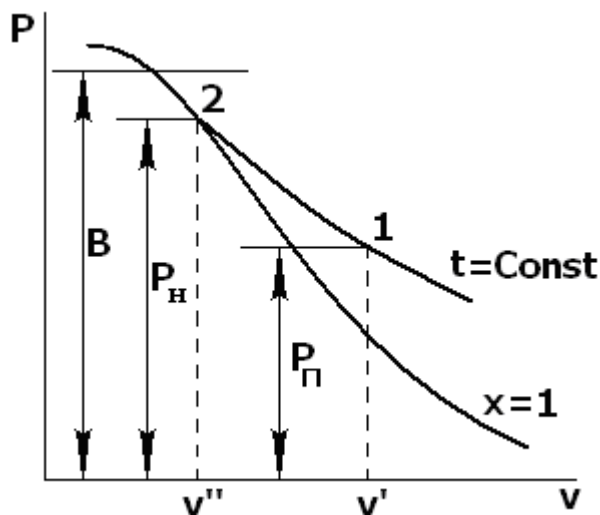


Рис.2. Состояние влажного воздуха в PV–диаграмме

Максимально возможное содержание водяного пара в воздухе при температуре t будет иметь место тогда, когда парциальное давление станет равным P_n , т.е. давлению насыщения, соответствующему данной температуре.

Воздух будет насыщенным, плотность пара ρ_n и абсолютная влажность максимальные (при данной температуре).

Относительной влажностью называется отношение данной абсолютной влажности воздуха ρ_n к его максимально возможной абсолютной влажности ρ_{max} при той же температуре.

Относительную влажность обозначают φ . Следовательно,

$$\varphi = \rho_n / \rho_{max} \quad , \quad (6)$$

Часто относительную влажность выражают в процентах, тогда

$$\varphi = (\rho_n / \rho_{max}) 100, \% \quad , \quad (6 а)$$

Если температура влажного воздуха меньше или равна температуре насыщения t_n водяного пара при давлении смеси B , то ρ_{max} будет равна плотности сухого насыщенного пара при данной температуре, т.е. ρ'' (линии 1-2 и 3-4 на рис.3) и

$$\varphi = \rho_n / \rho'' \quad (6 б)$$

Значение ρ'' определяется по таблицам насыщенного водяного пара.

Поэтому к водяному пару, находящемуся в воздухе можно без существенных погрешностей применять формулы для идеальных газов, в частности закон Бойля-Мариотта, согласно которому при постоянной температуре плотность газа изменяется прямо пропорционально его давлению.

Поскольку $\rho_{\text{п}}$ и $\rho_{\text{мах}}$ в выражении (6) относятся к пару одной и той же температуры, то можно записать

$$\varphi = \rho_{\text{п}} / \rho_{\text{мах}} = P_{\text{п}} / P_{\text{мах}} \quad (7)$$

При температуре воздуха меньше температуры насыщения при давлении В т.е. при $t_1 \leq t_{\text{н}}$ (линии 1-2 на рис.3) $P_{\text{мах}} = P_{\text{н}}$ выражению (6 б) может быть записано

$$\varphi = \rho_{\text{п}} / \rho_{\text{н}} \quad (7 \text{ а})$$

При $t_1 > t_{\text{н}}$ (линия 5-6 на рис.3)

$$\varphi = P_{\text{п}} / В \quad (7 \text{ б})$$

Если ненасыщенный влажный воздух, состояние пара в котором определяется точкой 1 (рис.3) нагревать при постоянном давлении, то давление насыщения $P_{\text{н}}$ будет увеличиваться, а поскольку парциальное давление пара остается неизменным, относительная влажность $\varphi = \rho_{\text{п}} / В$ будет уменьшаться до тех пор, пока температура воздуха не достигнет $t_{\text{н}}$, а давление насыщения не станет равным В (линии 3-4 на рис.3). При дальнейшем нагревании (отрезок 3-5) и числитель и знаменатель формулы (7 б) будут оставаться неизменными, а поэтому будет оставаться постоянной и относительная влажность φ , т.е. при $t_1 > t_{\text{н}}$

$$\varphi = P_{\text{п}} / В = \text{const} \quad (7 \text{ в}).$$

Понятие о точке росы

Если понижать температуру насыщенного влажного воздуха, сохраняя его давление постоянным (естественно и парциальное давление пара при этом сохраняется постоянным, например, по линии 1-7 на рис.3) то можно достигнуть состояния насыщения (точка 7). При дальнейшем охлаждении из воздуха будет выпадать влага в виде росы и будет уменьшаться парциальное давление пара. Температура насыщения, соответствующая данному парциальному давлению пара $P_{\text{п}}$ называется точкой росы и обозначается $t_{\text{р}}$ (рис.3). Температура точки росы может быть определена с помощью гигрометра, представляющего собой металлический тонкостенный цилиндр, внешняя поверхность которого

отполирована. Внутри цилиндра испаряется эфир и температура понижается до тех пор, пока на полированной поверхности цилиндра не появляется роса. Температура эфира (фиксируется при этом) будет соответствовать температуре точки росы.

Пользуясь таблицами насыщенного пара можно определить соответствующее ей давление насыщения, которое и будет равно парциальному давлению пара во влажном воздухе – $P_{\text{п}}$.

По этой же таблице определяется и давление насыщения, соответствующее температуре воздуха $P_{\text{п}}$.

По (7 а) определяется φ , т.е. относительная влажность воздуха.

Гигрометр другого типа основан на свойстве некоторых веществ изменять свой линейный размер при изменении относительной влажности воздуха. В частности этим свойством обладает обезжиренный человеческий волос (волосяной гигрометр).

Плотность влажного воздуха

Плотность влажного воздуха ρ , кг/м³ равна сумме плотностей сухого воздуха $\rho_{\text{св}}$ и водяного пара $\rho_{\text{п}}$ при их парциальных давлениях $P_{\text{св}}$ и $P_{\text{п}}$ и температуре воздуха, т.е.

$$\rho = \rho_{\text{св}} + \rho_{\text{п}} \quad (8).$$

Из уравнения состояния идеального газа $PV = MRT$, $P/\rho = RT$ откуда

$$\rho = P / RT$$

Для сухого воздуха $\rho_{\text{св}} = P_{\text{св}} / R_{\text{св}} T \quad (9)$

И для водяного пара $\rho_{\text{п}} = P_{\text{п}} / R_{\text{п}} T \quad (10)$

Подставляя (9) и (10) в выражение (8) имеем

$$\rho = (P_{\text{св}} / R_{\text{св}} T) + (P_{\text{п}} / R_{\text{п}} T) \quad (11)$$

Чтобы ввести в выражение (11) давление (полное) влажного воздуха P прибавляем и отнимаем от правой части (11) величину $P_{\text{п}} / R_{\text{п}} T$.

$$\begin{aligned} \rho &= (P_{\text{св}} / R_{\text{св}} T) + (P_{\text{п}} / R_{\text{п}} T) + (P_{\text{п}} / R_{\text{п}} T) - (P_{\text{п}} / R_{\text{п}} T) = \\ &= ((P_{\text{св}} + P_{\text{п}}) / R_{\text{св}} T) - P_{\text{п}} / T ((1/R_{\text{св}}) - (1/R_{\text{п}})) \end{aligned} \quad (11 \text{ а})$$

Принимаем во внимание, что $P_{\text{св}} + P_{\text{п}} = P$ (3) и что газовые постоянные сухого воздуха и водяного пара равны: $R_{\text{св}} = 287 \text{ Ж/кг К}$ и $R_{\text{п}} = 462 \text{ Ж/кг К}$, при постановке в (11 а) получаем:

$$\rho = (B / 287T) - (P_{\text{п}} / T) ((1/287) - (1/462))$$

после вычисления:

$$\rho = (B / 287T) - 0,00132 (P_{\text{п}} / T), \text{ кг/м}^3.$$

Здесь давления B и $P_{\text{п}}$ в Па ($\text{Н} / \text{м}^2$).

Поскольку первое слагаемое представляет собой плотность сухого воздуха при барометрическом давлении, а второе слагаемое отрицательное, можно сделать вывод, что влажный воздух имеет меньшую плотность, чем сухой (если сравнение производится при одинаковых давлениях и температурах).

Практически давление B и $P_{\text{п}}$ принято измерять в мм рт. ст.

Преобразуем (12), принимая во внимание, что 1 мм рт ст.= 133,322 Н / м² (Па).

$$\rho = (B / 2,15T) - 0,176 (P_{\text{п}} / T), \text{ кг/м}^3, \text{ или окончательно:}$$

$$\rho = (B - 0,378 P_{\text{п}}) / T, \text{ кг/м}^3,$$

Здесь давления B и $P_{\text{п}}$ представляются в мм ртутного столба .

Влагосодержание воздуха

При изменениях состояния влажного воздуха масса сухого воздуха в нем не меняется, количество же пара уменьшается (при конденсации) или увеличивается (при испарении влаги, например, из высушиваемого материала). Поэтому расчеты (при сушке, увлажнении и т .д.) удобно относит к одному килограмму сухого воздуха.

Влагосодержанием воздуха – d называется отношение массы пара ($M_{\text{п}}$) во влажном воздухе к массе сухого воздуха ($M_{\text{св}}$) в нем; или, иначе говоря, влагосодержание – это масса пара, приходящаяся на 1 кг сухого воздуха, находящегося во влажном

$$d = M_{\text{п}} / M_{\text{св}}, \text{ кг пара / кг св} \quad (14)$$

Чаще измеряется в граммах на килограмм сухого воздуха.. Так как

$$V_{\text{п}} = V_{\text{св}} (1), \text{ то} \quad d = \rho_{\text{п}} / \rho_{\text{св}} \quad (15)$$

Из уравнения состояния $\rho = P / RT$,

$$\rho_{\text{п}} = P / R_{\text{п}} T \quad \rho_{\text{св}} = P / R_{\text{св}} T$$

Деля $\rho_{\text{п}}$ на $\rho_{\text{св}}$ получим (T сократится)

$$d = P_{\text{п}} R_{\text{св}} / P_{\text{св}} R_{\text{п}}$$

подставляя из (3) $P_{\text{св}} = B - P_{\text{п}}$ и значения газовых постоянных:

$$d = P_{\text{п}} 287 / (B - P_{\text{п}}) 462 \quad \text{получаем окончательно:}$$

$$d = 0,62 (P_{\text{п}} / (B - P_{\text{п}})), \text{ кг п / кг св или}$$

$$d = 622 (P_{\text{п}} / (B - P_{\text{п}})), \text{ г п / кг св .}$$

Отсюда видно, что при одном и том же атмосферном давлении «В» влагосодержание воздуха зависит только от парциального давления пара $P_{\text{п}}$, увеличиваясь с увеличением $P_{\text{п}}$.

Если в каком-либо процессе $d = \text{const}$, то в этом процессе и $P_{\text{п}} = \text{const}$.

Энтальпия влажного воздуха

Энтальпия также относится к 1 кг сухого воздуха, т.е. к $\left(1 + \frac{d}{1000}\right)$

килограмм влажного воздуха.

Здесь в скобках единица означает один килограмм сухого воздуха плюс количество водяного пара на 1 кг с.в., т.е. d влагосодержание в $\frac{\text{гп} \cdot \text{буг}}{\text{кг} \cdot \text{к.х.}}$, поэтому

энтальпия обозначается: H ; $\frac{\text{кЖ}}{\text{кг} \cdot \text{к.х.}}$

Энтальпия H суммируется их энтальпии 1 кг сухого воздуха и энтальпии $\left(\frac{d}{1000}\right)$ кг пара, т.е.

$$H = h_{\text{к.х.}} + 0,001d \cdot h_{\text{б.}} \quad (17)$$

где $h_{\text{к.х.}}$ – энтальпия 1 кг сухого воздуха;

$h_{\text{б.}}$ – энтальпия 1 кг водяного пара.

Для сухого пара $h = c_p \cdot t \quad (18)$

где c_p – массовая изобарная теплоемкость, которая может быть принятой:

$$c \approx 1 \frac{\text{кЖ}}{\text{кг} \cdot \text{К}} = 0,24 \frac{\text{ккал}}{\text{кгк} \cdot \text{град}}.$$

Энтальпия пара (на 1 кг) может быть принятой по эмпирическим формулам:

$$h_{\text{в.}} = 2490 + 1,97 \frac{\text{кЖ}}{\text{кг}} \quad (\text{в системе СИ}) \quad (19)$$

$$h_{\text{в.}} = 595 + 0,46 \frac{\text{ккал}}{\text{кг}} \quad (\text{в системе МКГСС}) \quad (20)$$

Подставляя в (17) и (18) значения теплоемкостей и выражения (19) и (20) получаем:

$$H = t + 0,001d \cdot (2490 + 1,97) \frac{\text{кЖ}}{\text{кг} \cdot \text{к.х.}} \quad (21)$$

$$H = t + 0,001d \cdot (595 + 0,46) \frac{\text{ккал}}{\text{кг} \cdot \text{к.х.}} \quad (22)$$

Н-d диаграмма влажного воздуха

Определить параметры влажного воздуха и решать практические задачи, связанные с изменением состояния его при сушке, увлажнении, нагревании, охлаждении и т.д. наиболее просто графически с помощью диаграммы Н-d, предложенной проф. Л.К.Рамзиным.

В этой диаграмме по оси абсцисс отложены влагосодержание d , г/кг св, по оси ординат - энталпии влажного воздуха H (В кЖ или ккал на 1 кг сухого воздуха, находящегося во влажном).

Для более удобного расположения отдельных линии на диаграмме оси координат проведены в ней под углом 135° (рис-4).

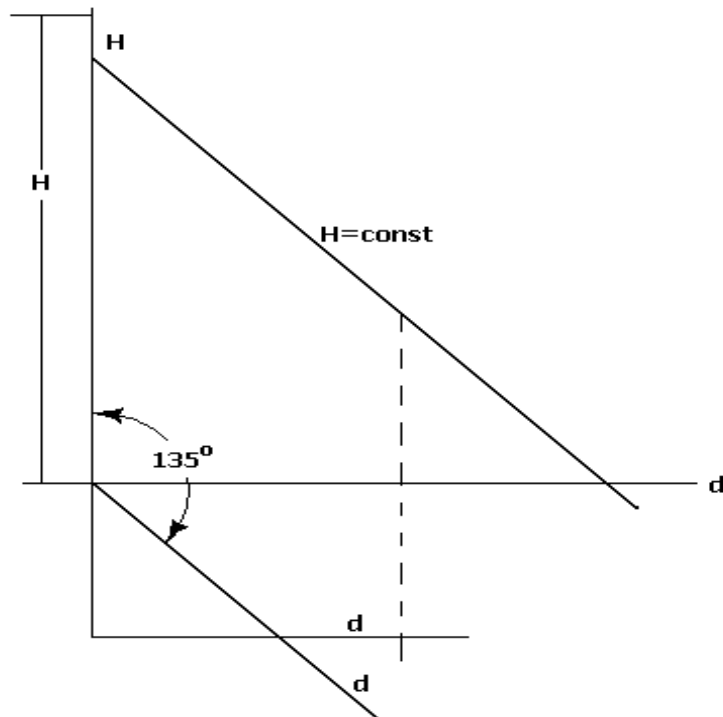


Рис 4. Координатная сетка Н-d - диаграммы

Но поскольку часть диаграммы, расположенная под угоризонталью, проведенной через начало координат, практического интереса не представляет, шкала абсцисс (d) переносится на эту горизонталь и наклонная ось абсцисс не вычерчивается. Поэтому линии $H=const$ идут наклонно под углом 45^0 , линии же $d=const$ –вертикально.

Н-d диаграмма строится для барометрического давления $B = 745$ мм рт. ст, но с достаточной точностью она может быть использована и при некотором отклонении барометрического давления от принятого значения..

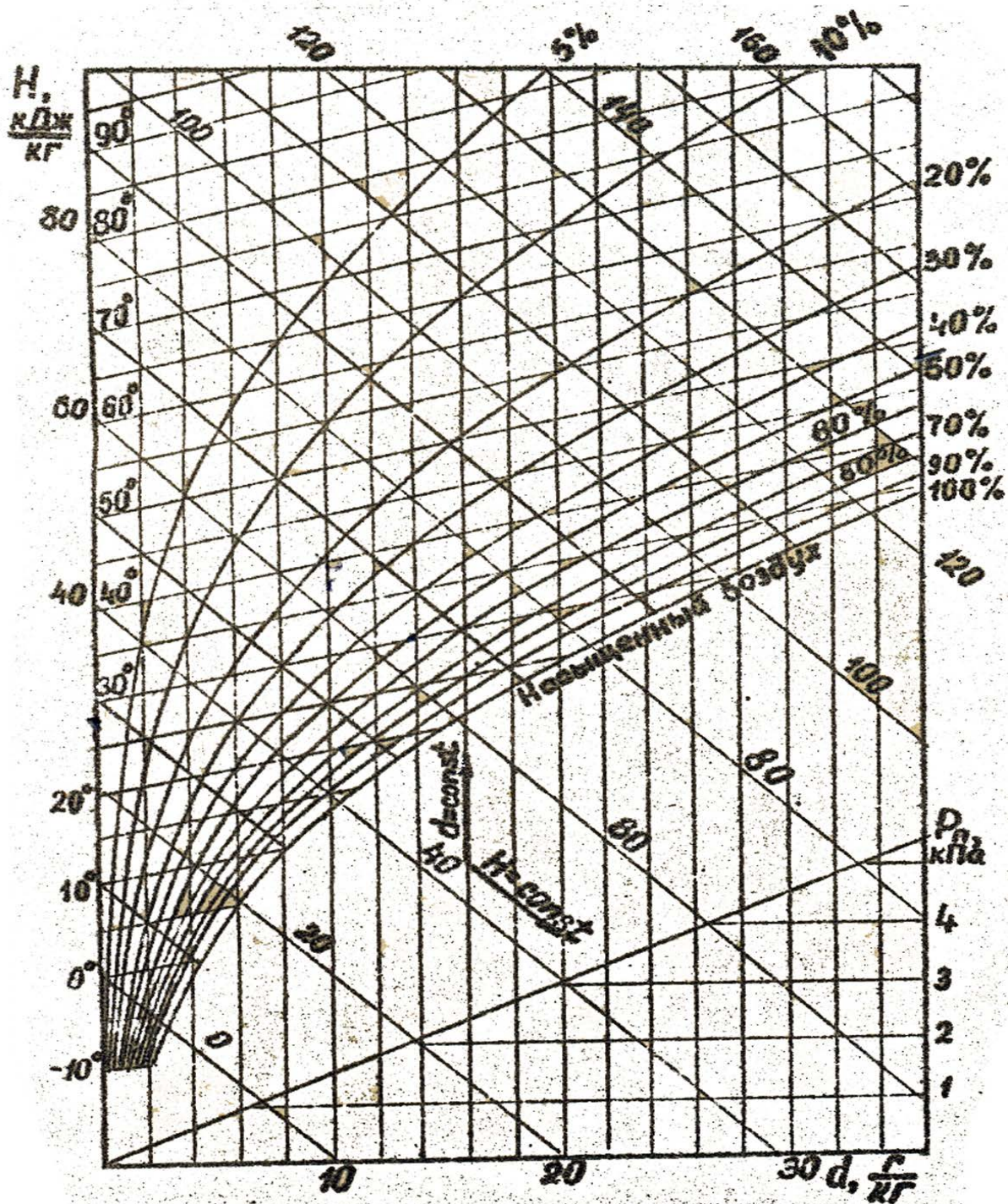


Рис. 5. H-d диаграмма влажного воздуха

В диаграмме построены изотермы, близкие к прямым по зависимости (21) лии (22). На каждой изотерме находят точки с одним и тем же значением. Для этого из (7 а) находят значение $P_{п}$, соответствующее заданному ϕ , а затем из (16) находят соответствующее влагосодержание d .

Точка с одинаковым значением φ дают систему кривых $\varphi = \text{const}$ (рис.5). Кривые $\varphi = 100\%$ является пограничной кривой, характеризующей насыщение. Вся область над линией $\varphi = 100\%$ соответствует влажному насыщенному воздуху при различных значениях φ от $\varphi = 0$ – сухой воздух на оси ординат до $\varphi = 100\%$ – насыщенный воздух. Область, лежащая под этой линией, характеризует состояние перенасыщенного воздуха (область тумана).

Внизу диаграммы построена кривая (близкая к прямой) $P_{\text{п}} = f(d)$ по (16). По оси ординат справа отложены парциальные давления пара $P_{\text{п}}$ в мм.рт.ст..

На изотерме $100\text{ }^{\circ}\text{C}$ (точнее $99,4\text{ }^{\circ}\text{C}$) кривые $\varphi = \text{const}$ имеют излом и далее идут вертикально, т.к. при температуре выше температуры насыщения, соответствующей давлению воздуха B (при $B = 745\text{ мм.рт.ст.}$, $t = 99,4\text{ }^{\circ}\text{C}$).

$$\varphi = P_{\text{п}} / B = \text{const} \quad (7\text{ в})$$

При более высоких температурах линии $\varphi = \text{const}$ идут параллельно $d = \text{const}$ и следовательно $P_{\text{п}} = \text{const}$ (16), например, от точки A на рис.5.

По каким-либо двум характеристикам влажного воздуха (замеренным приборами) можно найти точку в H - d -диаграмме, а затем по ней найти остальные характеристики. Например: 1. Определив по термометру температуру воздуха t и с помощью гигрометра температуру точки росы t_p (и помня, что точка росы получается при охлаждении воздуха до насыщения при постоянном давлении) находим в H - d -диаграмме точку A , характеризующую состояние воздуха (рис.6). При пересечении изотермы, соответствующей t_p с кривой $\varphi = 100\%$ находим точку, от которой поднимаемся вверх при $d = \text{const}$ (следовательно, при $P_{\text{п}} = \text{const}$) до пересечения с изотермой t . Точка A дает возможность определить H , d , $P_{\text{п}}$, φ .

Значение H читаем по оси ординат, d – по оси абсцисс. Парциальное давление пара определяем, опускаясь по вертикали (т.е. $d = \text{const}$ и $P_{\text{п}} = \text{const}$) по линии $P_{\text{п}} = f(d)$ и читаем справа значение $P_{\text{п}}$. Определение понятно из рис.6.

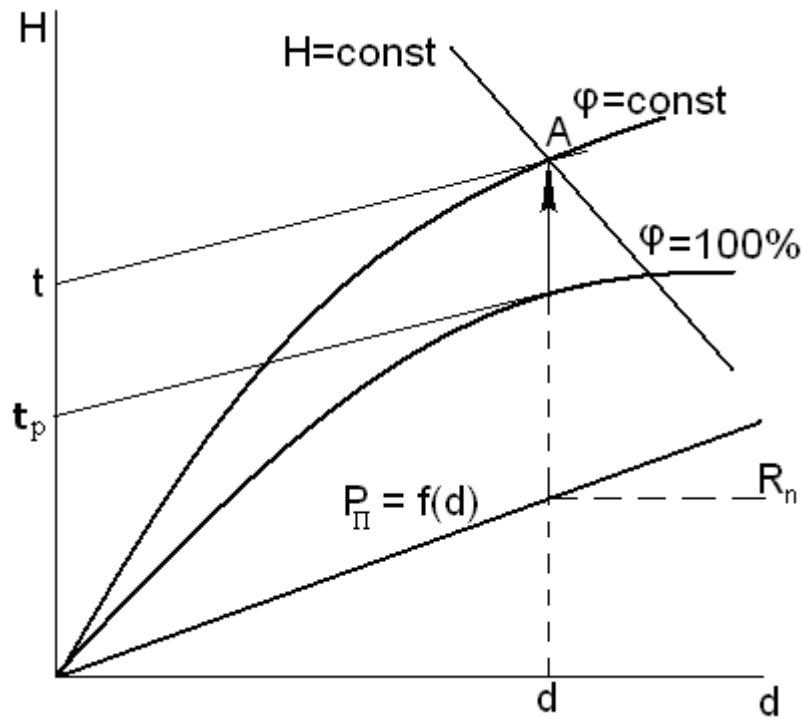


Рис.6. Пример определения параметров влажного воздуха в H-d-диаграмме

2. Определив по волосяному гигрометру относительную влажность и по термометру температуру воздуха, легко находим на пересечении линии $\varphi = \text{const}$ и $t = \text{const}$ точку A, рис.7. Затем по диаграмме находим H, d, P_{II} , (рис.6), а также температуру точки росы, опускаясь из точки A по вертикали по линии $\varphi = 100\%$ (рис.7). На диаграмме наносятся иногда линии постоянной температуры мокрого термометра.

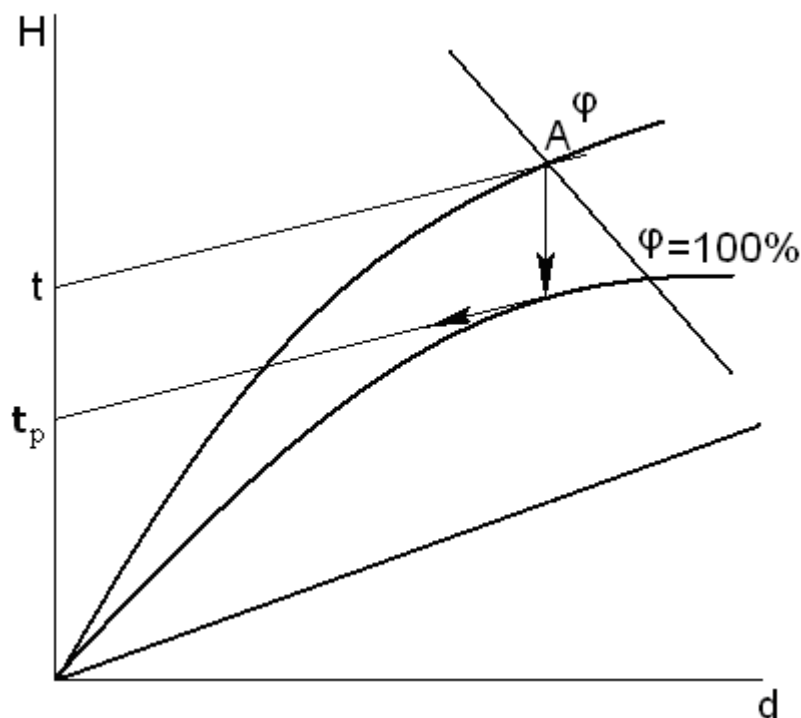


Рис.7. Пример определения параметров влажного воздуха в H-d-диаграмме

Температура мокрого термометра

Большой интерес в технике представляет взаимодействие между водой и воздухом, при их контакте.

В этом случае между жидкостью и воздухом происходит тепло и массообмен. Теплообмен за счет разности температур воды и воздуха. Массообмен – за счет разности парциальных давлений пара в воздухе в общем его потоке и в слое воздуха, непосредственно у поверхности воды. Непосредственно у поверхности воды воздух всегда насыщен; поэтому влагосодержание воздуха у поверхности воды определяется парциальным давлением насыщенного водяного пара, соответствующим температуре воды $t_{ж}$ (обозначим это парциальное давление $P_{нп}$). Парциальное давление пара в воздухе $P_{п}$ (рис.8).

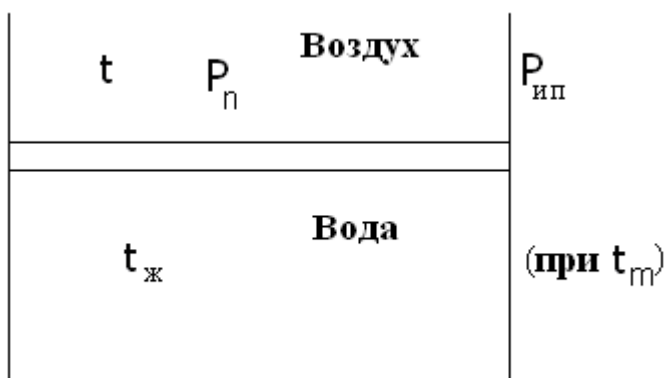


Рис.8. Схема пограничного слоя на границе раздела вода-воздух

Значения $P_{нп}$ и $P_{п}$ определяют каков будет массообмен – будет ли испарение воды (при $P_{нп} > P_{п}$), или конденсация пара из воздуха (при $P_{п} > P_{нп}$). H-d-диаграмма позволяет легко определить происходит ли испарение или конденсация. Для этого на линии $\phi = 100\%$ находим точку, соответствующую $t_{ж}$ (точка А на рис.9) и проводим вертикаль АВ. Точки, лежащие на ней, характеризуют такие состояния воздуха, при которых нет испарения, ни конденсации $P_{п} = P_{нп}$. Точки, лежащие правее этой линии (например, С) характеризуют состояния, при которых происходит конденсация $P_{п} > P_{нп}$. Точки, лежащие левее АВ (например, точка Д), характеризуют состояния воздуха, при которых происходит испарение $P_{нп} > P_{п}$.

Допустим, что обдувающий поверхность воды воздух имеет то же влагосодержание, что и слой воздуха у поверхности (точка В на рис.9). Равенства

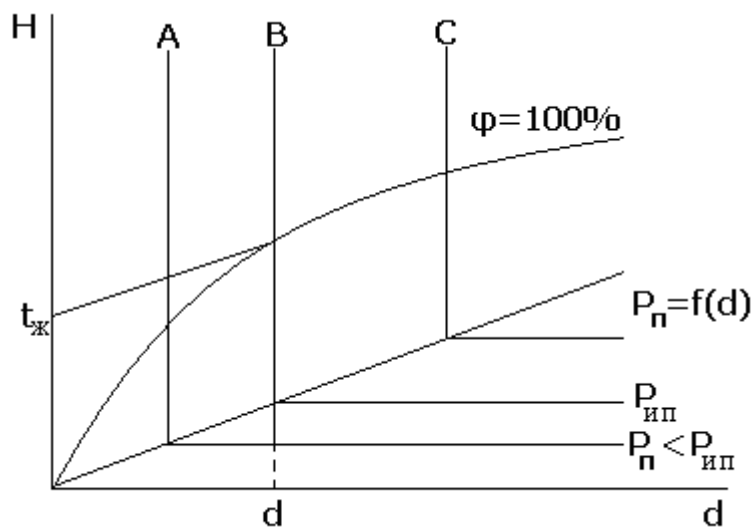


Рис.9. Изображение процессов испарения и конденсации влаги в H-d-диаграмме влагосодержаний означает, что испарения, ни конденсации в начальный момент происходить не будет $P_n = P_{ип}$. Но температура воздуха t в точке В выше $t_{ж}$, поэтому к воде будет подводиться тепло от воздуха и температура ее начнет повышаться, в результате чего повысится влагосодержание и $P_{ип}$ ($t_{ж2}$, d_2 , $P_{ип2}$ на рис.10), следовательно, начнется испарение с поверхности воды (точка Е лежит правее АВ $P_{ип2} > P_{ип1}$). По мере подогрева воды разность температур воздуха и воды убывает и поэтому уменьшается приток тепла в воде. С другой стороны увеличивается разность влагосодержаний d_1 и d_2 , т.е. увеличивается интенсивность испарения, Оба эти фактора действуют в одном направлении, ограничивая возрастание температуры воды. Температура воды перестанет повышаться тогда, когда все тепла, подводимое от воздуха, будет целиком затрачиваться на испарение, Установившаяся при этом температура воды называется температурой мокрого термометра и обозначается t_m . Следовательно, при обдувании поверхности воды, находящейся в ограниченном количестве, неограниченном потоком воздуха воды в конце-концов примет некоторую постоянную температуру, называемую температурой мокрого термометра для данного состояния воздуха.

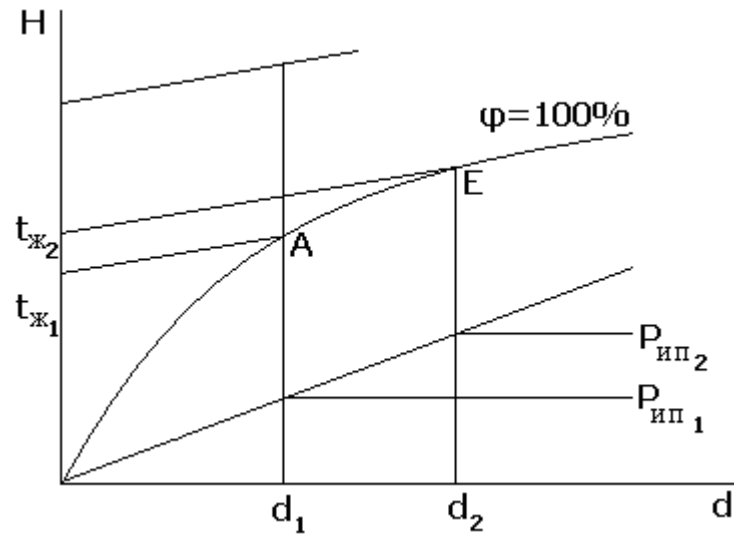


Рис.10. Пример изображения процесса испарения влаги в H-d-диаграмме

Если в ограниченный объем воздуха внести достаточно большое количество воды, то через некоторое время воздух насытится водяным паром, поскольку теплообмен происходит только между водой и воздухом, а отвод тепла отсутствует, то процесс насыщения воздуха является адиабатическим.

В результате насыщения температура воздуха станет равной температуре воды, (т.е. температуре мокрого термометра t_m).

Установившуюся температуру, которая примет воздух в конце процесса насыщения называют температурой адиабатического насыщения воздуха.

Линии постоянной температуры мокрого термометра наносятся пунктиром на H-d-диаграмме несколько положений линии $H = \text{const}$.

Психрометр

Чаще всего на практике определяют состояние воздуха с помощью психрометров.

Психрометр состоит из 2-х термометров, шарик одного из которых обернуть тканью, постоянно смачиваемой водой. При этой смачиваемый термометр называется мокрым термометром, а несмачиваемый – сухим. Сухой термометр будет показать действительную температуру влажного воздуха t_c .

При обтекании воздухом шарика мокрого термометра происходит испарение воды с поверхности ткани и термометр покажет с большим или меньшим приближением t_m (т.е. температуру мокрого термометра).

Температура, показываемая мокрым термометром психрометра, несколько выше истинной температуры мокрого термометра. Объясняется это притоком тепла к термометру посредством излучения окружающими предметами и теплопроводностью через выступающий столбик ртути. Вводится поправка к показанию мокрого термометра. Отклонение показаний можно свести до минимума, если обдуть шарик потоком воздуха с большой скоростью, а также, если шарик и столбик термометра защитить от восприятия тепла, излучаемого окружающими предметами. Для определения по показаниям психрометра относительной влажности и влагосодержания составляют специальные психрометрические таблицы. Однако эти величины, а также другие характеристики можно определить с помощью Н-d-диаграммы.

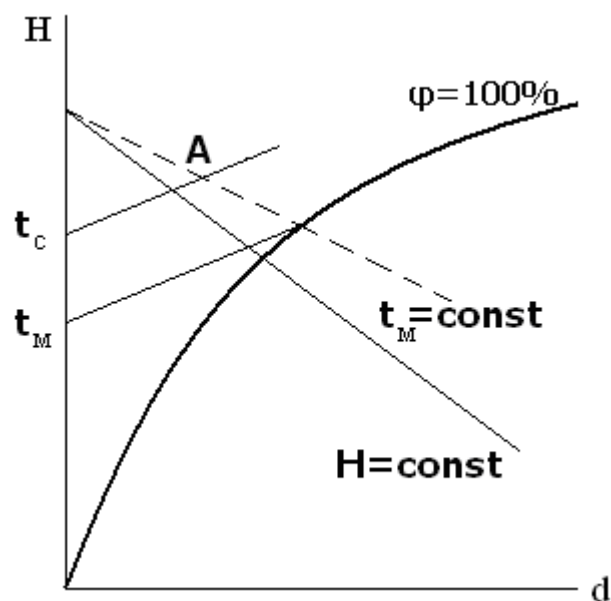


Рис.11. Определение состояния влажного воздуха по значениям температур сухого и мокрого термометров на Н-d-диаграмме

По показаниям сухого и мокрого термометров находят точку А (рис.11), характеризующую состояние влажного воздуха на пересечении изотерм t_c с линией постоянной температуры мокрого термометра t_m (пунктирная линия).

Изображение процессов нагрева и охлаждения

влажного воздуха в Н-d-диаграммы

Увлажнение воздуха при сушке материалов

Влажный воздух, используемый в качестве сушильного агента перед процессом сушки нагревается в калорифере (рис.12). Процесс нагрева

изображается на Н-d-диаграмме вертикальной прямой (0-1 на рис.13), так как в этом случае влагосодержание не меняется.

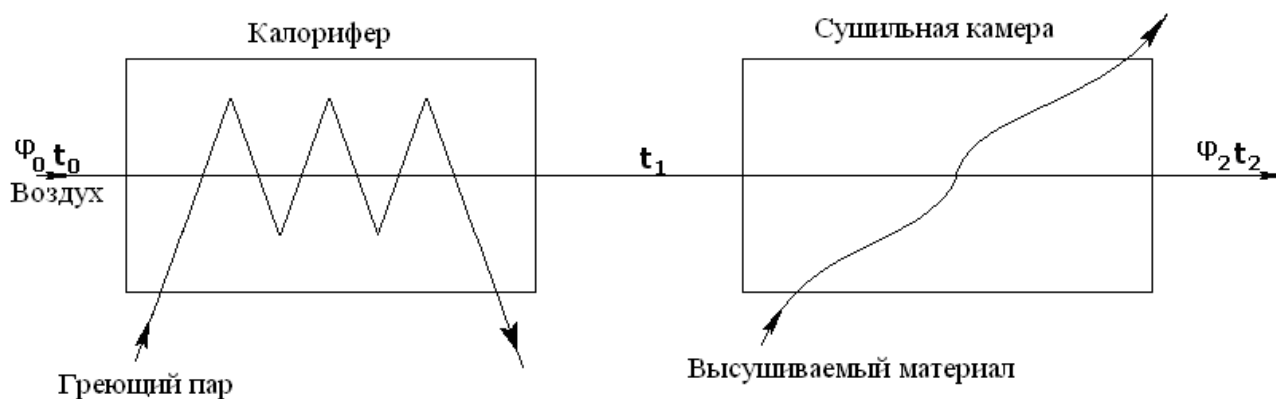


Рис. 12. Принципиальная схема процесса сушки

Разность ординат $H_1 - H_0$ дает расход тепла в калорифере на подогрев 1 кг сухого воздуха. Затем нагретый (до t_1) воздух поступает в сушильную камеру, где происходит процесс испарения воды из высушиваемого материала за счет теплоты, отдаваемой воздухом и, в связи с этим, увлажнение воздуха.

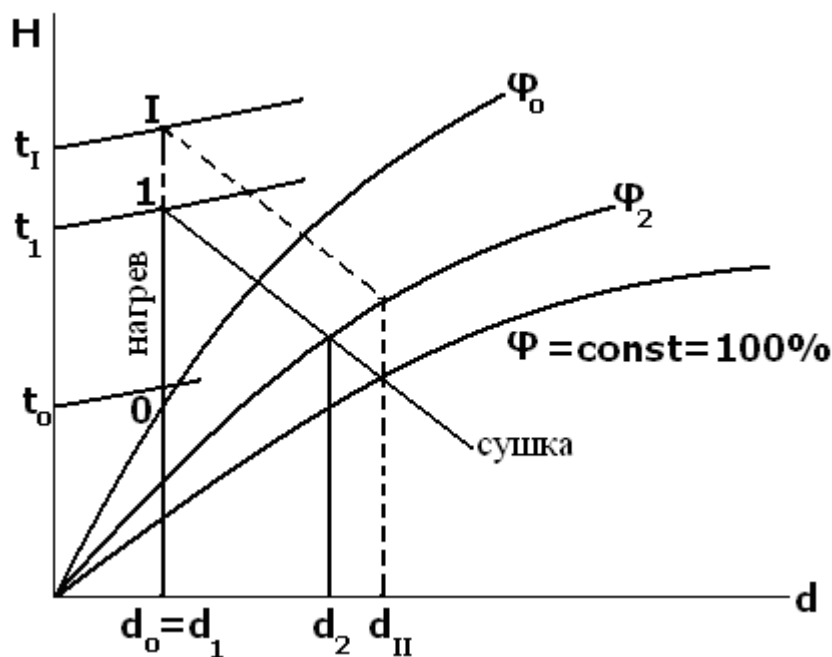


Рис. 13. Изображение процесса сушки в Н-d-диаграмме

Если принять, что энтальпия воды, содержащейся в материале, равна нулю, то процесс испарения воды можно принять проходящим при постоянном значении энтальпии $H = \text{const}$ (1-2 на рис.13). В самом деле, если с водой не вносится дополнительное тепло ($h_{ж} = 0$), то все тепло воздуха, затраченное на испарение воды, перейдет вместе с испаренной влагой обратно в воздух.. Разность $d_2 - d_1$

дает количество влаги, испаренной в сушильной камере каждым килограммом сухого воздуха (находящегося во влажном).

Чем выше температура воздуха, поступающего в сушильную камеру, тем больше влаги возьмет каждый килограмм воздуха из высушиваемого материала. Это видно на рис.13 при t_{II} , $d_{II} - d_0$ больше разности $d_2 - d_0$.

Для процесса сушки может быть использован только ненасыщенный воздух, причем желательно, чтобы его влагосодержание было возможно меньшим. Один из путей уменьшения влагосодержания воздуха (без применения поглотительной влаги) заключается в охлаждении насыщенного воздуха.

Допустим, что начальное состояние воздуха характеризуется в H-d-диаграмме точкой А (рис.14). Температура t_1 и влагосодержание d_1 . Отводя от влажного воздуха тепло, охладим его до температуры t_2 . При охлаждении до $\phi = 100\%$ (точка В) влагосодержание d_1 не меняется.

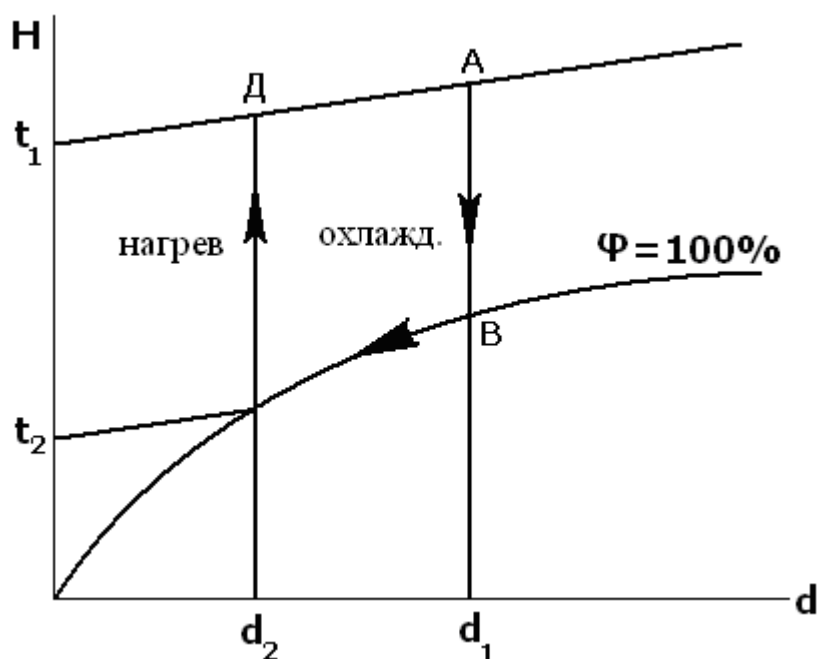


Рис.14. Изображение процессов нагревания и охлаждения в H-d-диаграмме

При охлаждении ниже температуры точки росы, соответствующей точке В, водяной пар, содержащейся в этом, уже насыщенном влажном воздухе будет конденсироваться и выпадать в виде капелек воды.

Условно процесс конденсации принимается проходящим при $\phi = 100\%$ (линия ВС).

Если удалить эту воду, то получим насыщенный воздух в состоянии, (точка С) соответствующем температуре t_2 и влагосодержанию d_2 .

Нагревая этот воздух, можно достигнуть состояния (точка Д), при котором воздух будет при начальной температуре t_1 , но с меньшим влагосодержанием $d_2 < d_1$.

Литература

1. В.А.Кириллин, В.В.Сычев, А.Е.Шейндлин. Техническая термодинамика, - М.: Энергия, 1974.
2. С.Л.Ривкин, А.А.Александров. Термодинамические свойства воды и водяного пара.-М.: Энергия, 1975.
2. Б.Х.Драганов, А.В.Кузнецов, С.П.Рудобашта. Теплотехника и применение теплоты в сельском хозяйстве,-М.: Агропромиздат,1990.
- 3.Цветков Ф.Ф., Григорьев Б.А. Тепломассаобмен. Учебное пособие для вузов. – М.: Издательство МЭИ, 2001. – 550 с., ил..
4. Солодов А.П. Принципы тепломассообмена – М.: Издательства МЭИ,2002.96 с.
- 5.Кузма – Кичта Ю.А. Методы интенсификации теплообмена. – М.: Издательства МЭИ, 2001 – 112 с.
5. Сборник задач по технической термодинамике: Учеб. пособие с 332/ Т.Н. Андрианова, Б.В.Дзамнов, В.Н. Зубарев, С.А.Ренмизов, Н.Я. Филатов. Ч-е изд., перераб. и доп. – Издательство МЭИ, 2000. -356 с.: ил.
6. Александров А.А., Григорьев Б.А. Таблицы теплофизических свойств воды и водяного пара: Справочник Рен. Гос. службой стандартных справочных данных. ГСССД Р-776-98. – М.: Издательство МЭИ, 1999. – 168 с; ил.

Шаймарданов Бахтиёр Пардаевич

«Изучение свойства влажного воздуха»

Методическое пособие

Редактор: У Менглиев

Подписано в печать _____ 2007 года.

Формат бумаги 60 x 86 1/6 объем 1,6 п.л. Тираж 100.

Заказ №

Отпечатано В типографии ТИИМ

Ташкент – 700000, ул. Кары-Ниязова 39