



Липецкий государственный технический университет

Кафедра химической технологии, экологии и литья

Лекция 4

по дисциплине

Техническая термодинамика

(для студентов специальности ХТ)

ТЕРМОДИНАМИЧЕСКИЕ СВОЙСТВА ВОДЫ И ВОДЯНОГО ПАРА

Составитель: к.т.н., доц. Андриянцева С.А.

Липецк 2014

Фазовые состояния и превращения воды

Вода в равновесном состоянии

(без энергетических взаимодействий с окружающей средой)

У поверхности льда или жидкости всегда присутствует пар. Соприкасающиеся фазы находятся в т/д равновесии: быстрые молекулы вылетают из жидкой фазы, преодолевая поверхностные силы, а из паровой фазы медленные молекулы переходят в жидкую фазу.

В состоянии равновесия каждой T соответствует определенное **давление пара – полное** (если над жидкостью присутствует только пар) или **парциальное** (если присутствует смесь пара с воздухом или другими газами).

Пар, находящийся в равновесном состоянии с ж. фазой, из которой он образовался - насыщенный, а соответствующая ему T - T насыщения, а давление – p насыщения.

Фазовые состояния и превращения воды

Вода в неравновесном состоянии

(с энергетическими взаимодействиями с окружающей средой)

*Процесс некомпенсированного перехода вещества из ЖФ в Г - **испарение**.*

*Процесс некомпенсированного перехода вещества из ТФ в Г - **сублимация (возгонка)**.*

*Процесс перехода вещества из жидкой фазы в паровую непосредственно внутри жидкости - **кипение**.*

*Любой процесс перехода вещества из жидкой фазы в паровую - **парообразование**.*

*Процесс, противоположный парообразованию, т.е. некомпенсированный переход вещества из паровой фазы в жидкую - **конденсация**.*

*Процесс, противоположный сублимации, т.е. переход вещества из паровой фазы непосредственно в твердую - **десублимация**.*

*Жидкая фаза воды при температуре кипения - **насыщенная жидкость**.*

*Пар при температуре кипения (насыщения) - **сухой насыщенный пар**.*

*Двухфазная смесь "ж+п" в состоянии насыщения - **влажный насыщенный пар**.*

Для характеристики влажного насыщенного пара используется *понятие степени сухости x* , представляющее собой отношение массы сухого насыщенного пара, $m_{\text{с.н.п}}$, к общей массе смеси, $m_{\text{см}} = m_{\text{с.н.п}} + m_{\text{ж.с.н}}$, его с жидкостью в состоянии насыщения:

$$x = \frac{m_{\text{с.н.п}}}{m_{\text{с.н.п}} + m_{\text{ж.с.н}}} = \frac{m_{\text{с.н.п}}}{m_{\text{см}}}$$

Отношение массы жидкой фазы воды в состоянии насыщения к массе смеси называется **степень влажности (1-x)**:

$$1 - x = \frac{m_{\text{ж.с.н}}}{m_{\text{с.н.п}} + m_{\text{ж.с.н}}} = \frac{m_{\text{ж.с.н}}}{m_{\text{см}}}$$

Пар с температурой выше температуры насыщения при данном давлении называется **перегретым паром**. Разность температур перегретого пара t и насыщенного пара того же давления $t_{\text{н}}$ называется **степенью перегрева пара** $\Delta t_{\text{п}} = t - t_{\text{н}}$.

Фазовые диаграммы P, t -, P, v - и T, s для H_2O

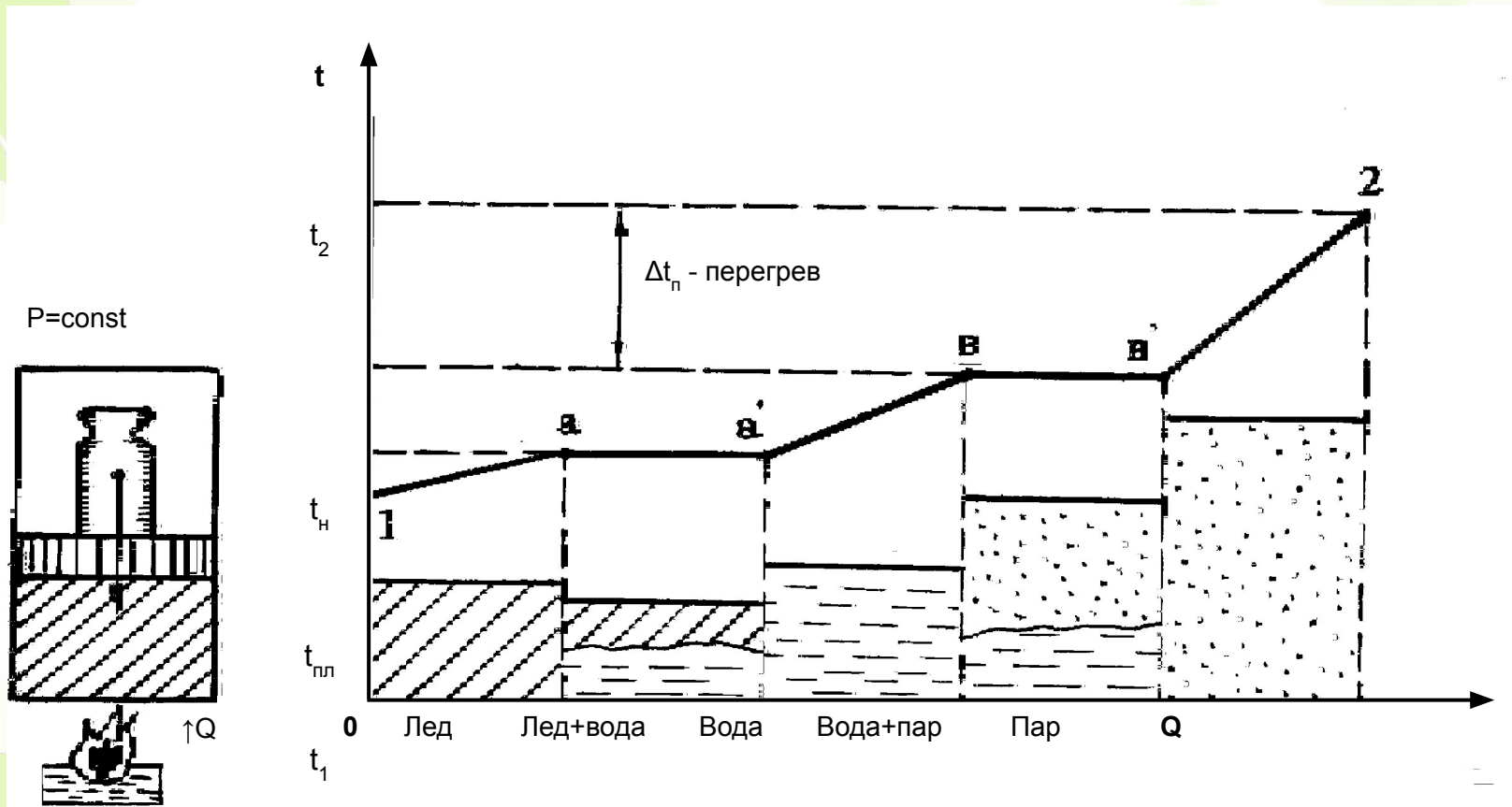


Рис. 1. Изменение температуры при изобарном подводе теплоты к H_2O

Фазовые диаграммы P, t -, P, v - и T, s для H_2O

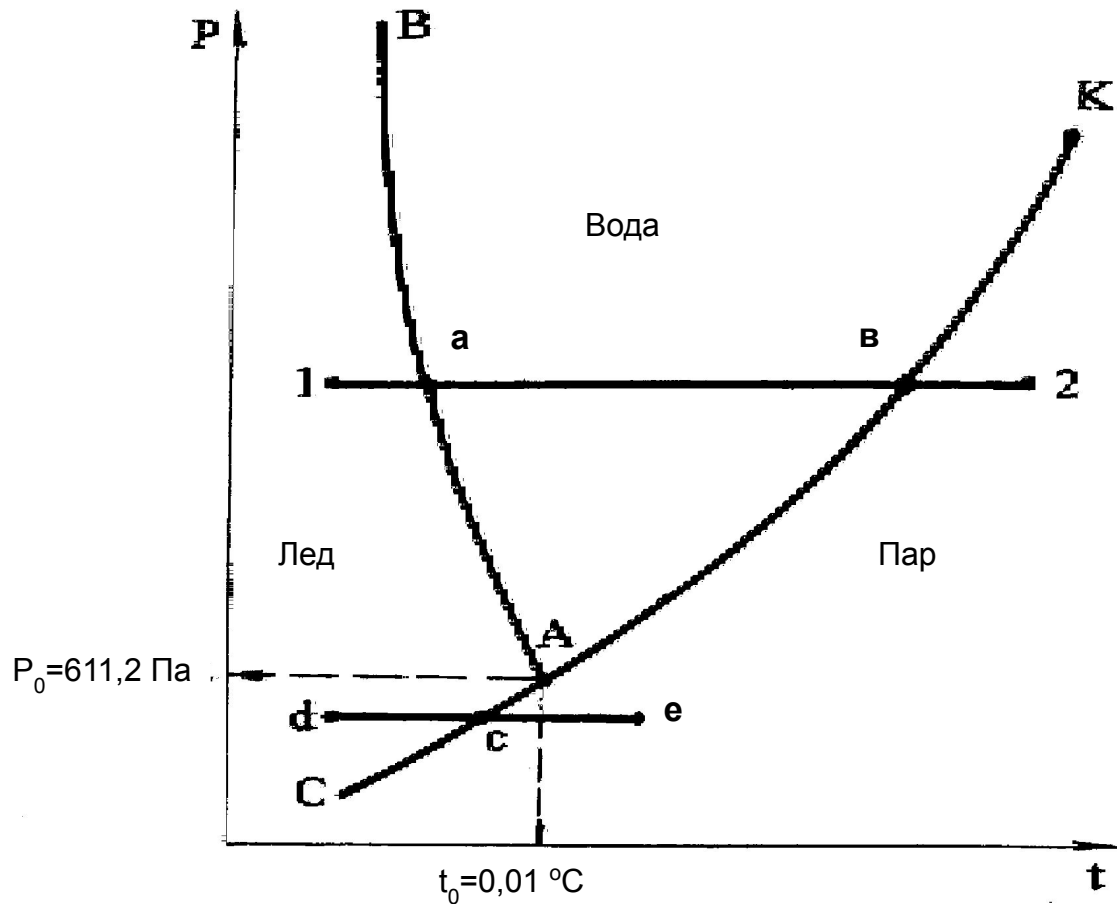


Рис. 2. Фазовая диаграмма P, t для воды

Фазовые диаграммы P, t -, P, v - и T, s для H_2O

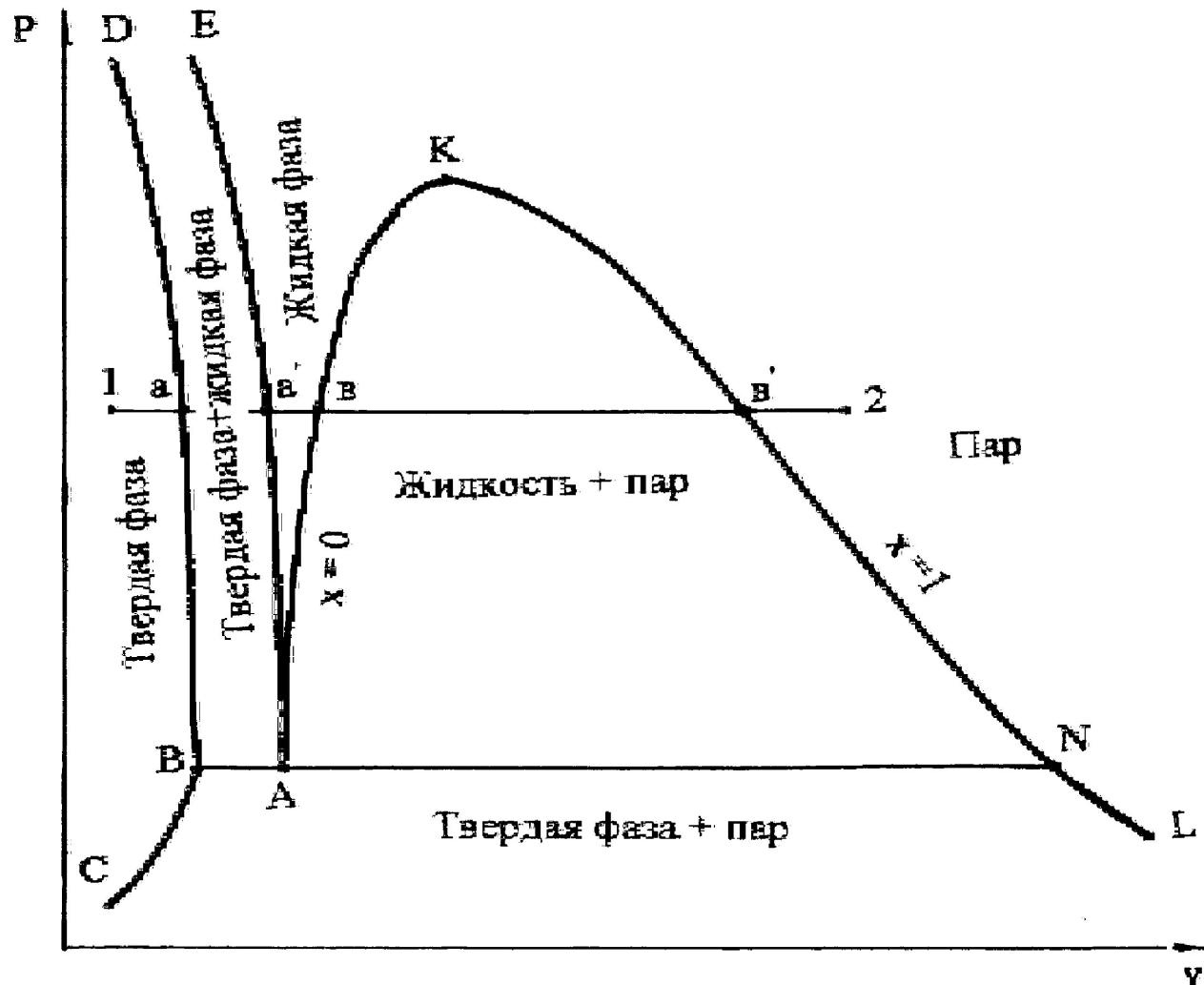


Рис. 3 Фазовая диаграмма P, v для нормального вещества

Фазовые диаграммы P,t -, P,v - и T,s для H_2O

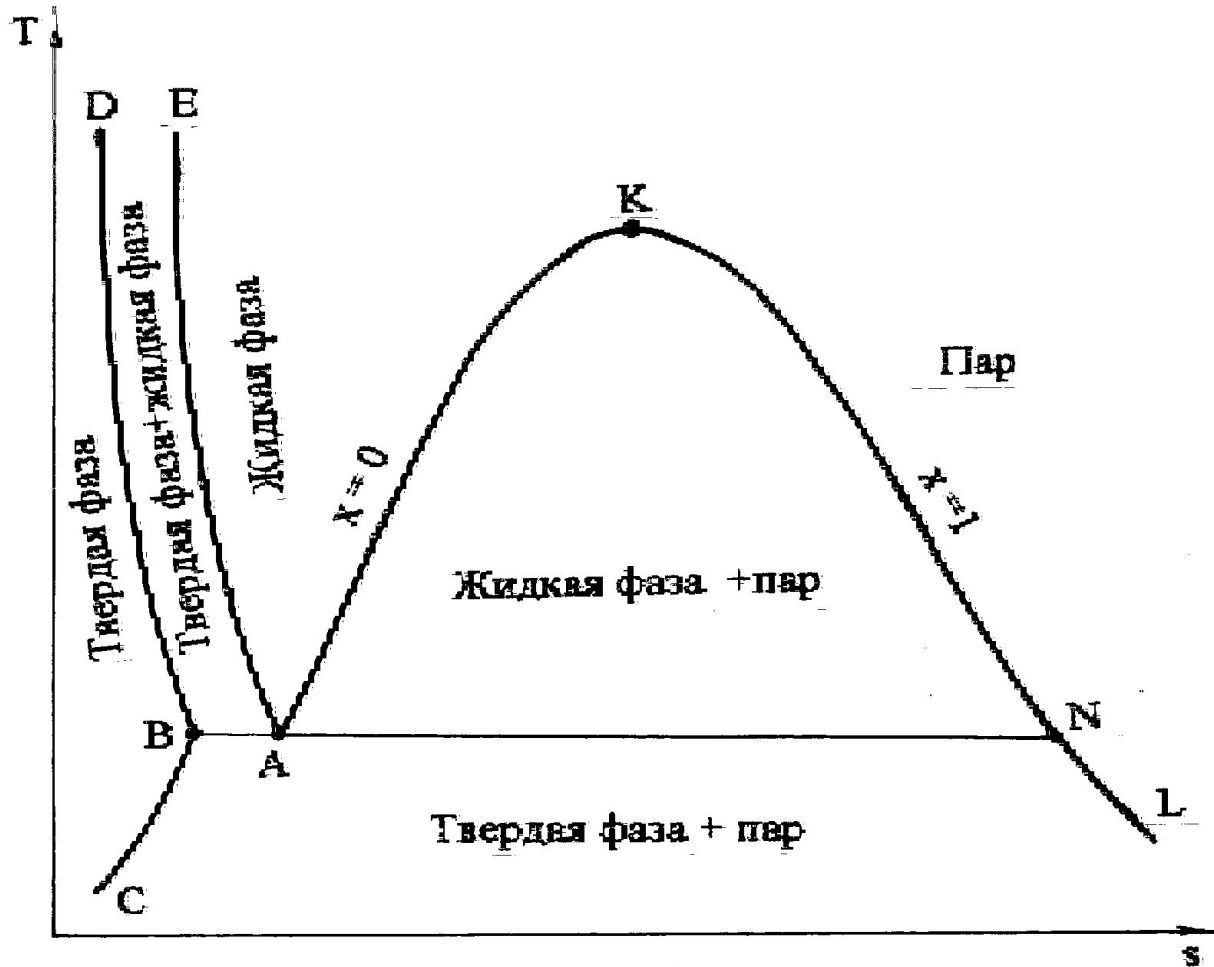


Рис. 4 Фазовая диаграмма T,s для нормального вещества

Фазовые диаграммы P, t -, P, v - и T, s для H_2O

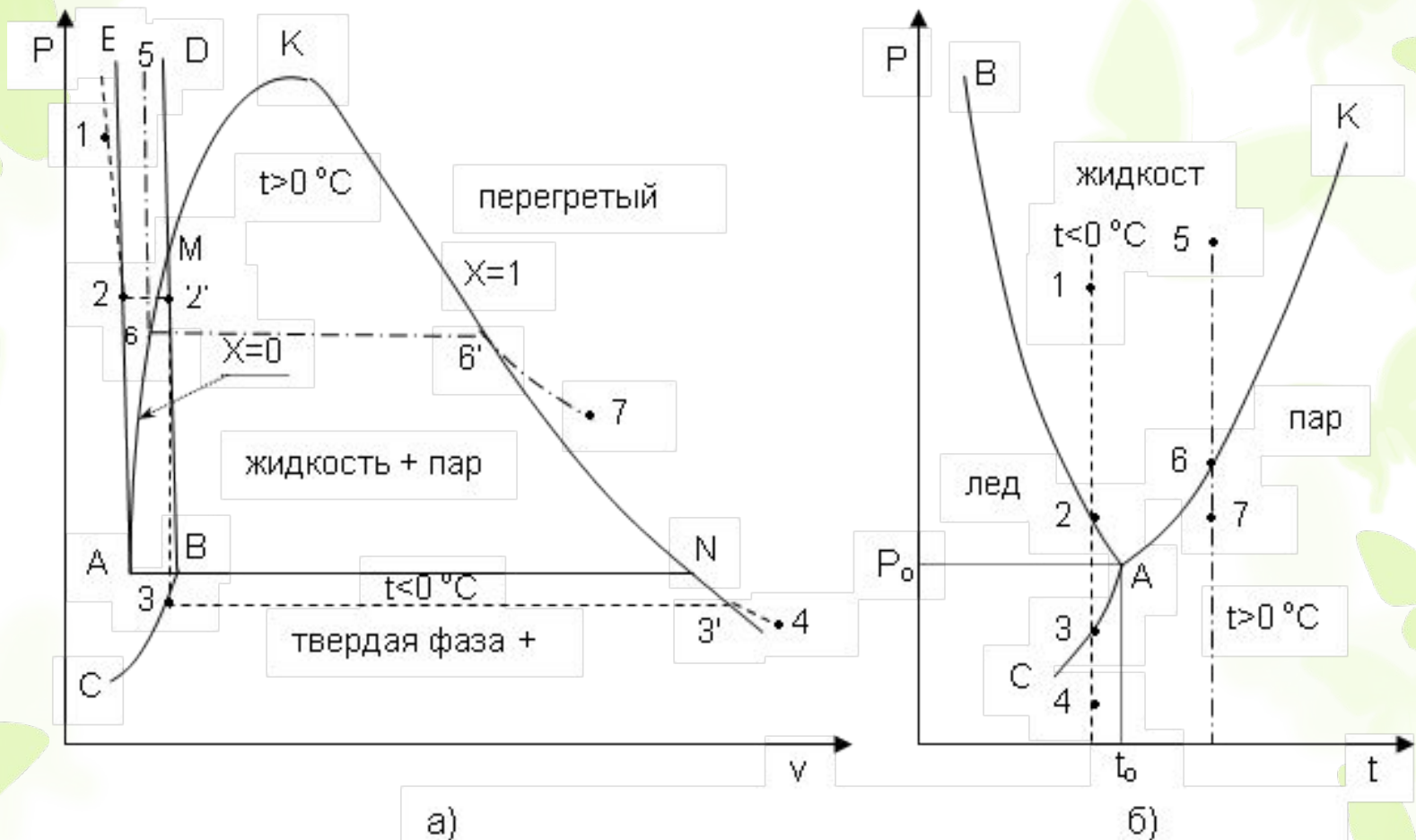


Рис. 5. Фазовые состояния для воды: а – в диаграмме P, v ,

Жидкость на линии фазового перехода

Энтропия жидкости на линии насыщения $x = 0$ определяется исходя из ее равенства нулю в тройной точке воды ($s_0' = 0$). С изменением давления энтропия Ж при T тройной точки (или $0\text{ }^\circ\text{C}$) s_0 изменяется незначительно. Поскольку энтропия, является функцией двух независимых параметров состояния, а при $t = 0\text{ }^\circ\text{C}$ для всех давлений жидкости внутренняя энергия $Ж = 0$, то и энтропия жидкости при $t = 0\text{ }^\circ\text{C}$ для всех давлений будет постоянной и равной энтропии жидкости в тройной точке воды, т.е. $s_0 = 0$.

Зная значение энтропии s_0 при $t = 0\text{ }^\circ\text{C}$ и заданном давлении, энтропию жидкости на линии насыщения при T_H можно определить как

$$s' = s_0 + \int_{T_0}^{T_H} \frac{c_p dT}{T} \approx c_p \ln \frac{T_H}{273,16}$$

где $s_0 = s_0' = 0$ – при давлениях, используемых в технике; $c_p \cong 4,187\text{ кДж}/(\text{кг}\cdot\text{К})$ – при умеренных давлениях.

Определение энтальпии, энтропии и внутренней энергии жидкости при температурах меньших, чем температура насыщения при заданном давлении, ¹⁰ведется аналогичным образом.

Сухой насыщенный пар

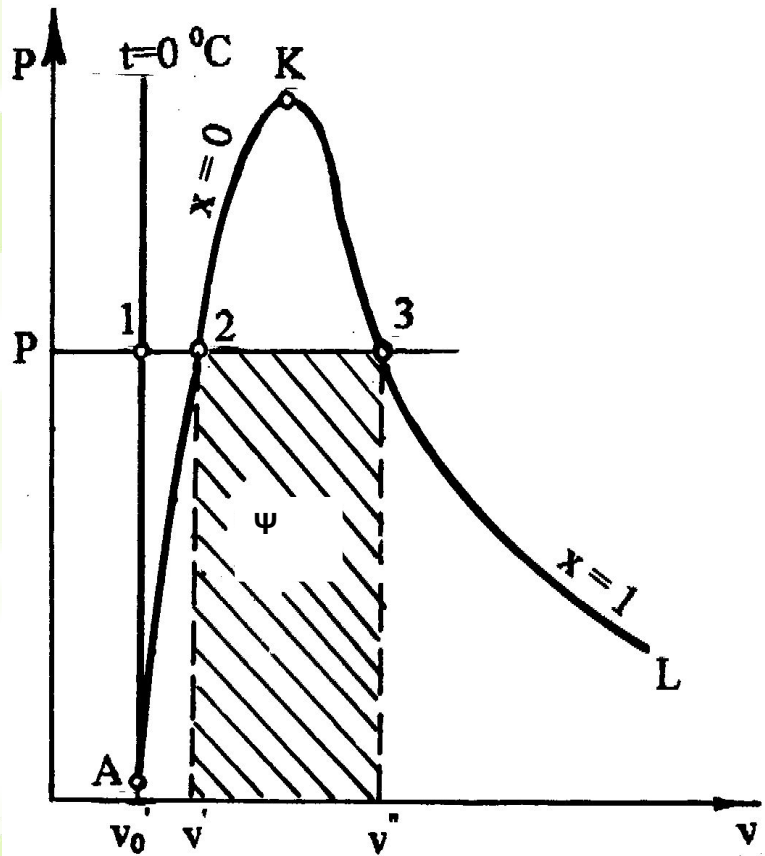


Рис. 6.12. Фазовый переход жидкости в пар в P,v -диаграмме для H_2O

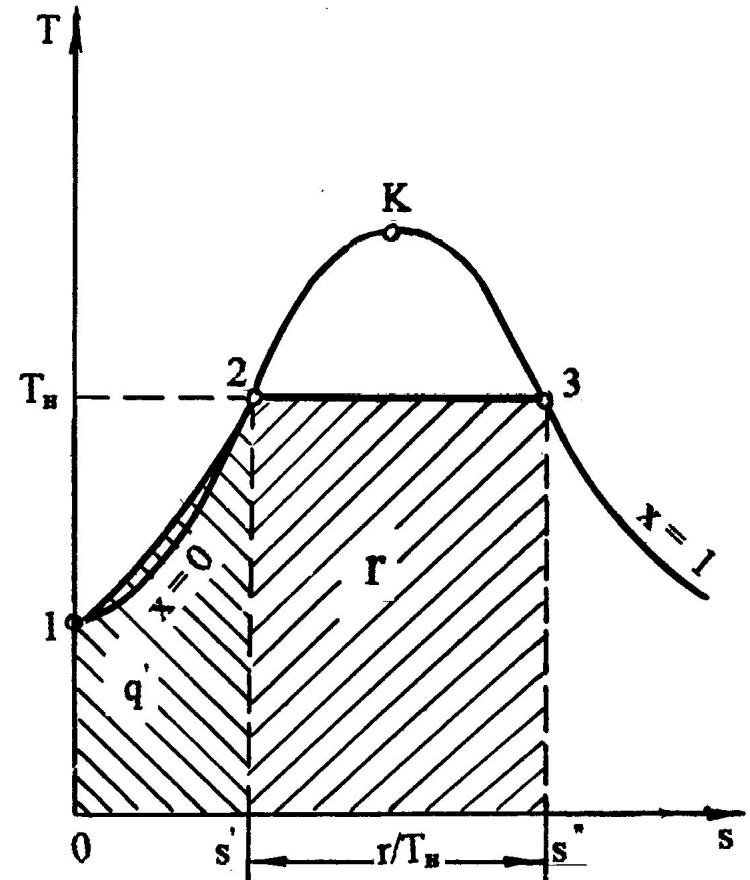


Рис. 6.24. Адиабатный процесс пара в P,v -диаграмме

Сухой насыщенный пар

Все параметры сухого насыщенного пара отмечаются двумя штрихами (v'' , h'' , s'' и т.д.).

$$r = u'' - u' + P(v'' - v') = h'' - h'. \quad (6.9)$$

В процессе парообразования T не изменяется, следовательно, разность внутренних энергий $u'' - u'$ соответствует только работе дисгрегации (разъединения молекул), т.е. работе перевода Ж в П. Она называется *внутренней теплотой парообразования* ρ : $\rho = u'' - u'$. (6.10)

Работа изменения объема при парообразовании - *внешняя теплота парообразования* Ψ : $\Psi = P(v'' - v')$. (6.11)

В диаграмме P, v она представлена площадью под горизонталью 23 (рис.6.12). Используя введенные обозначения, уравнение (6.9) можно представить в виде $r = \rho + \Psi$. (6.12)

При критическом давлении все члены равенства (6.12) равны нулю: $r = \rho = \Psi = 0$.

В изобарном процессе 123 (см. рис.6.13) затрачивается теплота для нагрева жидкости от $t=0$ °C до состояния сухого насыщенного пара, называемая *полной теплотой сухого насыщенного пара*:

$$\lambda'' = q' + r = q' + \rho + \Psi = h'' - Pv_0'. \quad (6.13)$$

Эта теплота и все ее слагаемые зависят от давления или от температуры насыщения. Зависимость этих величин от температуры насыщения представлена на рис. 6.14.

Энтальпию сухого насыщенного пара можно определить как $h'' = h' + r = q' + Pv_0' + r = \lambda'' + Pv_0'$. (6.14)

Из рис. 6.14 видно, что λ'' имеет максимум. Поскольку Pv_0' несоизмеримо мала по сравнению с λ'' , то и h'' имеет максимум. При этом важно отметить, что *максимум энтальпии сухого насыщенного пара h'' находится при температуре меньшей, чем у критической точки.*

Внутренняя энергия сухого насыщенного пара определяется из соотношения $u'' = h'' - Pv''$. (6.15)

Изменение энтропии при изобарно-изотермическом процессе парообразования 23

откуда получаем значение энтропии сухого насыщенного пара.

$$s'' = s' + \frac{r}{T_H}$$

$$s'' - s' = \frac{r}{T_H} \quad (6.16)$$

$$(6.17)$$

Влажный насыщенный пар

располагается между пограничными кривыми $x = 0$ и $x = 1$. (e) на изобаре P в области влажного насыщенного пара (6.15, 6.16). В области влажного насыщенного пара пар-ры состояния не м.б. определены только по p и T , поскольку p однозначно определяет T насыщения и изобара влажного Π одновременно является его изотермой, представляющей линию в P, v - и T, s - диаграммах. В качестве вспомогательного условного пар-ра для влажного Π применяется степень сухости x . Зная x и пар-ры состояний насыщения V на линии $x=0$ и Π на линии $x=1$, можно рассчитать все остальные параметры состояния влажного Π . Используя пар-ры влажного насыщенного Π , можно рассчитать его степень сухости:

$$x = \frac{v_x - v'}{v'' - v'} = \frac{h_x - h'}{r} = \frac{s_x - s'}{s'' - s'} = \frac{u_x - u'}{u'' - u'} = \frac{1 - e}{1 - 2}$$

Теплота, необходимая для получения влажного Π из V с $t=0$ °C при изобарном ее нагревании, называется полной теплотой влажного Π $\lambda_x = q' + xr = h_x - Pv_0'$.

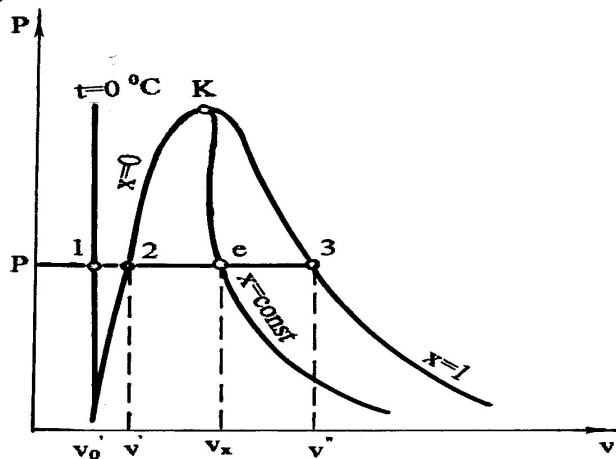


Рис. 6.15. К определению параметров влажного насыщенного пара в P, v - диаграмме

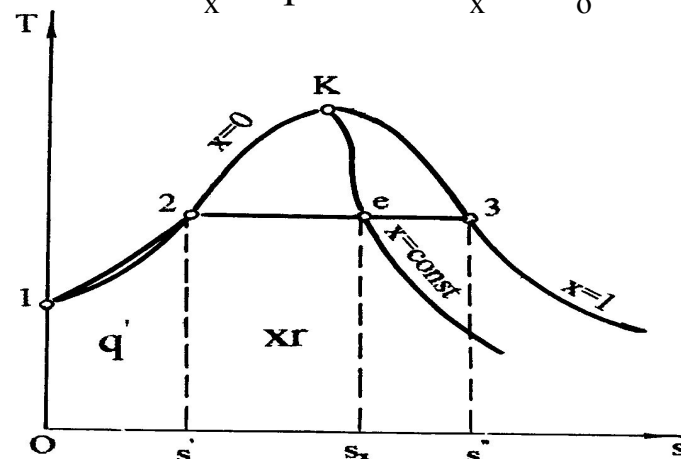


Рис. 6.16. К определению параметров влажного насыщенного пара в T, s - диаграмме

Перегретый пар

Изобарный подвод теплоты к сухому насыщенному пару приводит к повышению его T по отношению к T насыщения при данном p . Параметры состояния перегретого пара обозначаются соответствующими буквами без индексов (t , h , s , u и т.д.)

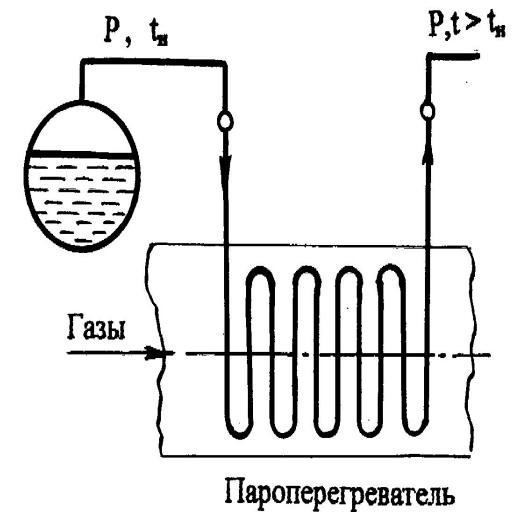


Рис. 6.17. Схема пароперегревателя

Теплота, необходимая для перевода 1 кг сухого насыщ. пара в перегретый пар с температурой t при изобарном ее нагревании, называется *теплотой перегрева*

$$q_{\text{п}} = \int_{t_n}^t c_p dt = h - h'' = u - u'' + P(v - v'')$$

где c_p — масс. изобарная тепло-ть перегретого пара

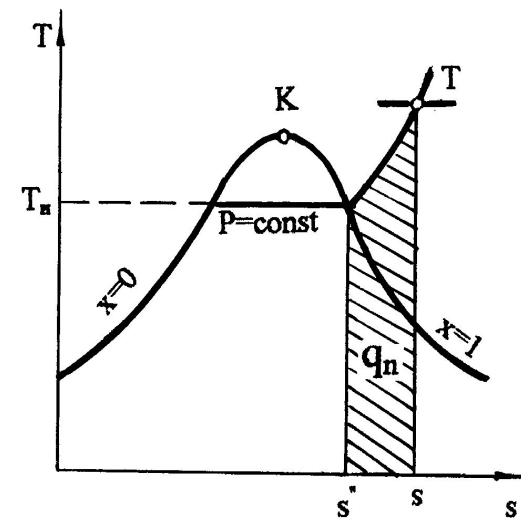


Рис. 6.18. К определению параметров перегретого пара

Перегретый пар

Анализ представленных на графике опытных данных при $P < P_{кр}$ приводит к выводу:

- 1) при постоянном P с повышением T от T насыщения изобарная теплоемкость сначала уменьшается, проходит через минимум, а затем медленно возрастает;
- 2) при одной и той же T c_p тем больше, чем выше P
- 3) с повышением T зависимость c_p от P уменьшается

Анализ изменения изобарной теплоемкости воды и пара при $P > P_{кр}$ показывает:

- 1) при $P_{кр}$ с повышением T жидкости ее изобарная теплоемкость растет и при критической T переходит в бесконечность, далее вблизи критической точки при $t > t_{кр}$ c_p пара резко понижается;
- 2) при сверхкритических давлениях повышение T в сопровождается повышением c_p в до макс, а затем понижением теплоемкости P ;
- 3) с повышением P уменьшается степень изменения c_p от T , значение максимума снижается, а максимум теплоемкости смещается в область более высоких температур.

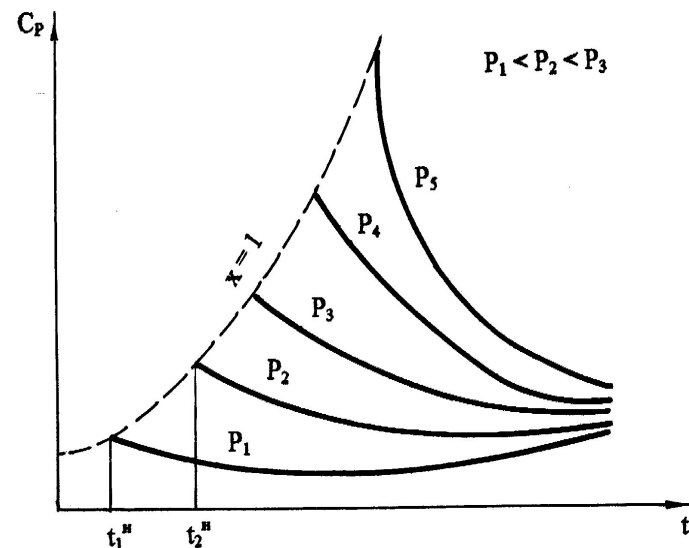


Рис. 6.19. Зависимость изобарной теплоемкости пара от температуры при докритических давлениях

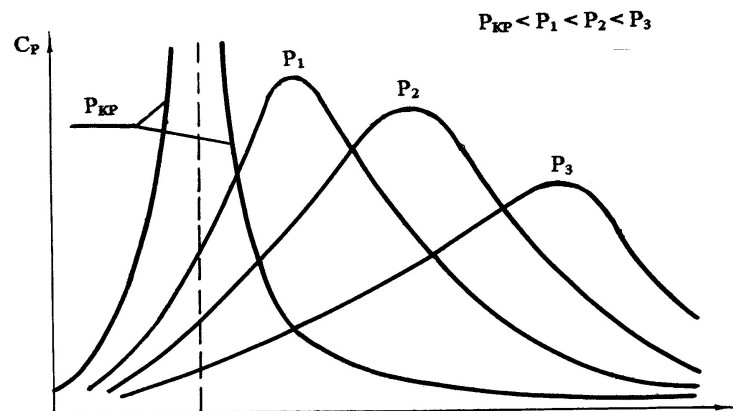


Рис. 6.20. Зависимость изобарной теплоемкости жидкости и пара от температуры при сверхкритических давлениях

Таблицы т/д свойств

При ориентации в фазовых состояниях воды и пара с использованием таблиц необходимо помнить:

1) при $P = \text{const}$:

$t < t_h$ – жидкая фаза воды,

$t > t_h$ – перегретый пар,

$t = t_h$ – необходим 3-й параметр, например:

$h = h'$ – кипящая вода,

$h = h''$ – сухой насыщенный пар,

$h' < h < h''$ – влажный пар,

$h < h'$ – жидкая фаза воды,

$h > h''$ – перегретый пар,

$h' < h < h''$ – влажный пар.

} аналогично и при ориентации
на v и s ;

2) при $t = \text{const}$:

$P < P_h$ – перегретый пар,

$P > P_h$ – жидкая фаза воды,

$P = P_h$ – аналогично $t = t_h$ при $P = \text{const}$ с ориентацией на h , v , s .

Некоторые выпуски таблиц включают в себя 2 части: 1-я в СИ, где P – в Па, h – в кДж/кг, и 2-я в СГС, где P – в кгс/см², а h – в ккал/кг.

Диаграмма T,s для воды и водяного пара

Для иллюстрации процессов изменения состояния воды и водяного пара и паровых циклов широко используется T,s- диаграмма. Она дает большой объем информации, позволяющий судить об особенностях энергетических эффектов и о тепловой экономичности циклов. В тепловой диаграмме T,s наносятся линии постоянных параметров воды и пара и функций состояния (6.21).

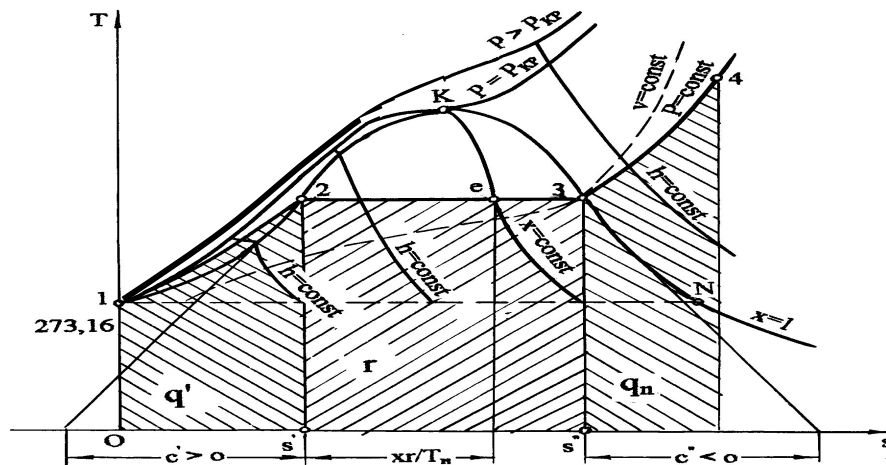


Рис. 6.21. Диаграмма T,s для жидкости и пара

Нулевое значение энтропии соответствует тройной точке жидкости (0,01 °С или 273,16 К и 611,2 Па). Построение линий постоянных параметров и функций состояния проводится по данным таблиц термодинамических свойств воды и водяного пара. Используя табличные значения зависимости между температурой насыщения T_n и энтропией кипящей жидкости s' и сухого насыщенного пара s'' , можно построить нижнюю ($x=0$) и верхнюю ($x=1$) пограничные кривые. Эти пограничные кривые соединяются в критической точке К с координатами $T_{кр} = 647,27$ К (374,12 °С) и $s_{кр} = 4,4237$ кДж/(кг·К). Линия $x = 0$ начинается в тройной точке жидкости при $T = 273,16$ К и $s_1' = 0$. Сухому насыщенному пару в тройной точке соответствует энтропия $s_N'' = 9,1562$ кДж/(кг·К) (см. рис. 6.21, точка N). Ниже горизонтали 1N находится зона сублимации, здесь слева от линии $x = 1$ – область твердой фазы и пара, а справа от линии $x = 1$ – область перегретого пара. Выше линии $x = 0$ находится область жидкой фазы, а выше линии $x=1$ находится область перегретого пара.

Диаграмма h, s для воды и водяного пара

В инженерной практике широкое применение находит h, s - диаграмма для воды и водяного пара. Такое широкое использование h, s - диаграммы в теплоэнергетических расчетах обусловлено тем, что для основных процессов теплоэнергетических установок (изобарного, $P=\text{const}$, и адиабатного, $s=\text{const}$) разности энтальпий представляют их главные энергетические характеристики: количество теплоты или техническую работу, которые в h, s - диаграмме могут быть элементарно представлены отрезками вертикальных прямых линий. В T, s - диаграмме эти величины представляются сложными площадями.

Диаграмма h, s строится по данным таблиц термодинамических свойств воды и водяного пара. На рис. 6.22 приведен общий вид такой диаграммы для воды и водяного пара.

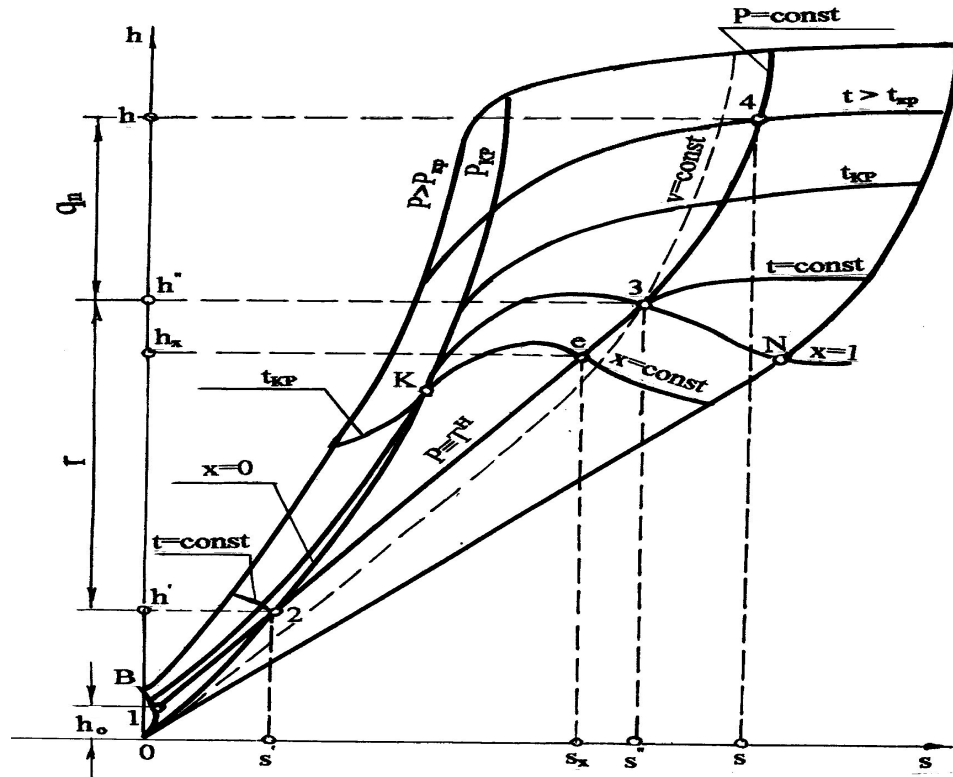


Рис. 6.22. Диаграмма h, s для жидкости и пара

За начало отсчета энтропии в h, s - диаграмме, как и в T, s - диаграмме, приняты параметры тройной точки жидкой фазы воды. В этой точке $s_0' = 0$ и $u_0' = 0$, а энтальпия $h_0' = 0,000614$ кДж/кг будет больше нуля, но численное ее значение очень мало. Следовательно, начало линии $x=0$, соответствующее тройной точке воды, расположено очень близко к началу координат. При повышении давления и температуры энтальпия h' и энтропия s' жидкости на линии насыщения растут до критической точки и пограничная линия $x=0$ представляется вогнутой кривой ОК.

Пограничная кривая сухого насыщенного пара $x=1$ имеет вид кривой KN. Максимальное значение энтальпии (ординаты) этой кривой $h''_{\text{max}} = 2801,9$ кДж/кг достигается при давлении около 30 бар и энтропии 6,18 кДж/(кг·К).

Основные процессы изменения состояния водяного пара

В практике теплоэнергетики наиболее часто встречаются: изохорный процесс (растопка котла при повышении давления), изобарный процесс (установившийся режим работы котла, процессы в подогревателях и конденсаторах пара), адиабатный процесс (в паровой турбине и насосе), изотермический процесс (испарение воды в реакторе кипящего типа).
(далее см. текст лекций)

ВЛАЖНЫЙ ВОЗДУХ

Влажный воздух – это смесь сухого воздуха и водяного пара. В воздухе при определенных условиях кроме водяного пара может находиться его жидкая (вода) или кристаллическая (лед, снег) фаза. В естественных условиях воздух всегда содержит водяной пар. Влажный воздух можно рассматривать как смесь сухого воздуха и водяного пара (жидкую и твердую фазы воды в воздухе пока считаем отсутствующими).

Используя законы для смесей газов, получим, что давление влажного воздуха равно сумме парциальных давлений сухого воздуха и водяного пара:

$$P = P_v + P_{п}$$

В качестве определяющих параметров водяного пара во влажном воздухе используются температура воздуха t и парциальное давление водяного пара $P_{п}$. Водяной пар во влажном воздухе может находиться в трех состояниях (рис.7.1): точка 1 – перегретый пар, точка 2 – сухой насыщенный пар, точка 3 – влажный насыщенный пар (сухой насыщенный пар плюс капельки жидкости в состоянии насыщения). Высшим пределом парциального давления водяных паров при данной температуре воздуха t является давление насыщения пара $P_{п\max} = P_n$.

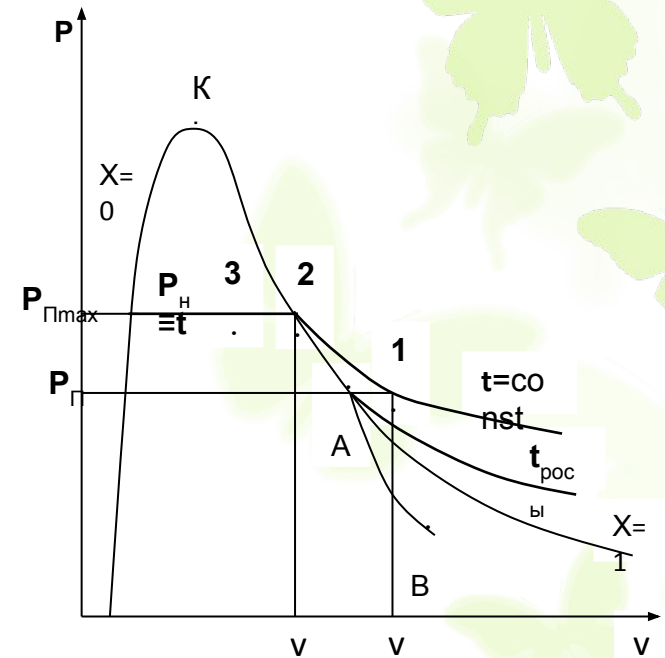


Рис.7.1. Основные состояния и характеристики водяного пара во влажном воздухе в P,v- диаграмме

ВЛАЖНЫЙ ВОЗДУХ

Абсолютная влажность ρ – это массовое количество водяных паров в м³ влажного воздуха. Для ее определения используется величина, обратная удельному объему водяного пара при $P_{\text{п}}$ и t , $\rho=1/v$ (кг/м³). Абсолютная влажность воздуха характеризует содержание в воздухе только паровой фазы воды.

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

$$\phi = \frac{\rho}{\rho''} = \frac{v''}{v}$$

где ρ'' и v'' – максимальная абсолютная влажность воздуха и удельный объем сухого насыщенного водяного пара при данной T и t . Относительная влажность воздуха характеризует потенциальную возможность воздуха испарять влагу и забирать в себя пар из окружающей среды при данной T .

Различают 3 состояния влажного воздуха.

1. **Ненасыщенный влажный воздух** – $\phi < 100\%$, $P_{\text{п}} < P_{\text{н}}$, $\rho < \rho''$, водяной пар во влажном воздухе в виде перегретого пара (точка 1).

2. **Насыщенный влажный воздух** – $\phi = 100\%$, $P_{\text{п}} = P_{\text{н}}$, $\rho = \rho''$, водяной пар во влажном воздухе в виде сухого насыщенного пара (точка 2).

3. **Перенасыщенный влажный воздух** – $\phi = 100\%$, $P_{\text{п}} = P_{\text{н}}$, $\rho = \rho''$, кроме сухого насыщенного пара в воздухе находятся капельки воды в состоянии насыщения (льда, снега (т. 3 при наличии капелек воды).

В технике используется такая характеристика влажного воздуха, как **температура точки росы**. Это такая температура, начиная с которой при охлаждении влажного воздуха при постоянном давлении из него начинается выпадение капелек воды (соответствует $T(A)$ процесса 1А, рис. 7.1). При снижении T воздуха ниже T точки росы при постоянном давлении всей смеси и постоянном содержании в ней H_2O (процесс АВ) 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, v -диаграмме процесс АВ пойдет в области влажного пара с уменьшением степени сухости по мере снижения T .

Характеристики атмосферного влажного воздуха

При T -х атм воздуха $0-50\text{ }^{\circ}\text{C}$ P парц водяного пара очень мало ($0,006-0,07$ бар), что позволяет применить к перегретому и сухому насыщенному водяному пару уравнение идеального газа: $P_{\text{п}} v = RT, P_{\text{п}} v'' = RT,$

где $P_{\text{п}}, P_{\text{н}}$ и v, v'' – парциальные давления и удельные объемы для перегретого и сухого насыщенного водяного пара при температуре T .

Разделив эти выражения друг на друга, получим расчетное выражение

относительной влажности воздуха через парциальные давления водяного пара:

$$\varphi = \frac{v''}{v} = \frac{P_{\text{п}}}{P_{\text{н}}}$$

Молярная масса атм влажного воздуха определяется по уравнению для смеси газов: $\mu = r_{\text{в}} \mu_{\text{в}} + r_{\text{п}} \mu_{\text{п}},$

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 $P_{\text{п}}$ – атм и парциальные давления сухого воздуха и водяного пара; $\mu_{\text{в}}, \mu_{\text{п}}$ – молярные массы сухого воздуха и водяного пара, $\mu_{\text{в}} = 28,96$ кг/кмоль, $\mu_{\text{п}} = 18,016$ кг/кмоль. В результате получаем расчетное выражение молярной массы влажного воздуха

Газовая постоянная влажного воздуха, $R = \frac{8314}{\mu} = \frac{8314}{28,96 - 10,944 \frac{P_{\text{п}}}{P}}$ она больше газовой постоянной сухого воздуха. $\rho = \frac{P}{RT} = \frac{P(28,96 - 10,944 \frac{P_{\text{п}}}{P})}{8314 \cdot T}$

Плотность влажного воздуха

Влагосодержание d – это масса водяного пара в гр., приходящаяся на 1 кг сух. воздуха. $d_{\text{п}} = \frac{m_{\text{п}}}{m_{\text{в}}} 1000$

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

где $d_{\text{п}}, d_{\text{ж}}, d_{\text{т}}$ – количество пара, жидкости и твердой фазы H_2O (лед, снег) в граммах на 1 кг сухого воздуха (влагосодержания);

$h_{\text{в}}, h_{\text{п}}, h_{\text{ж}}, h_{\text{т}}$ – удельные энтальпии сухого воздуха, пара, жидкости и твердой фазы H_2O , кДж/кг.

ВЛАЖНЫЙ ВОЗДУХ

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.7.3) имеют место следующие факты:

в атмосферном воздухе твердая фазы воды (т.ф.) может присутствовать только при температурах и парциальных давлениях пара, меньших (или равных) температуры и давления тройной точки воды, т.к. 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 ненамного меньше (или равно) 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 .

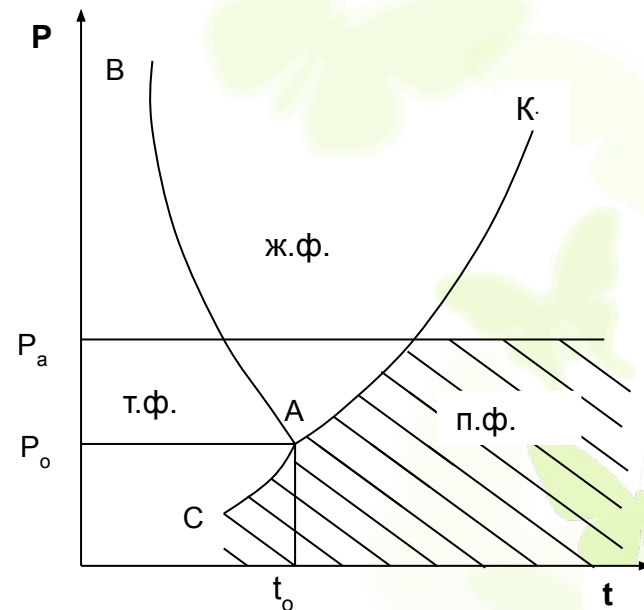
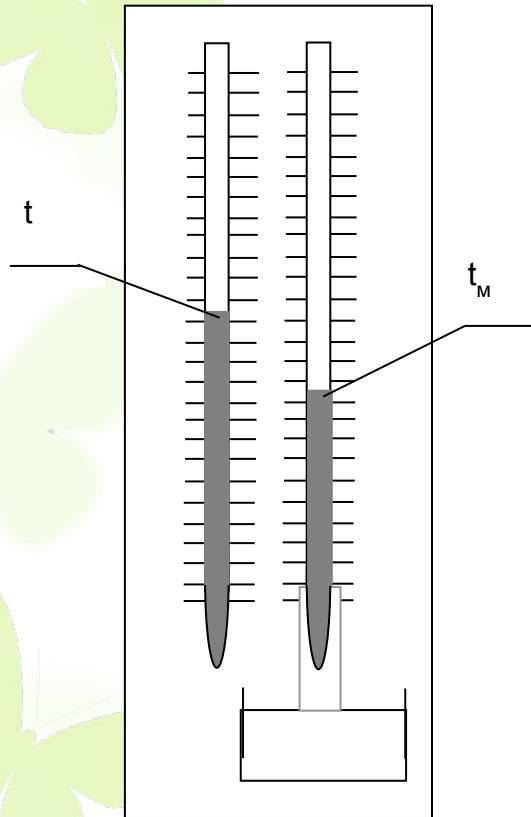


Рис.7.3. Область возможных фазовых состояний воды в атмосферном влажном воздухе в P,t - диаграмме

Психрометр

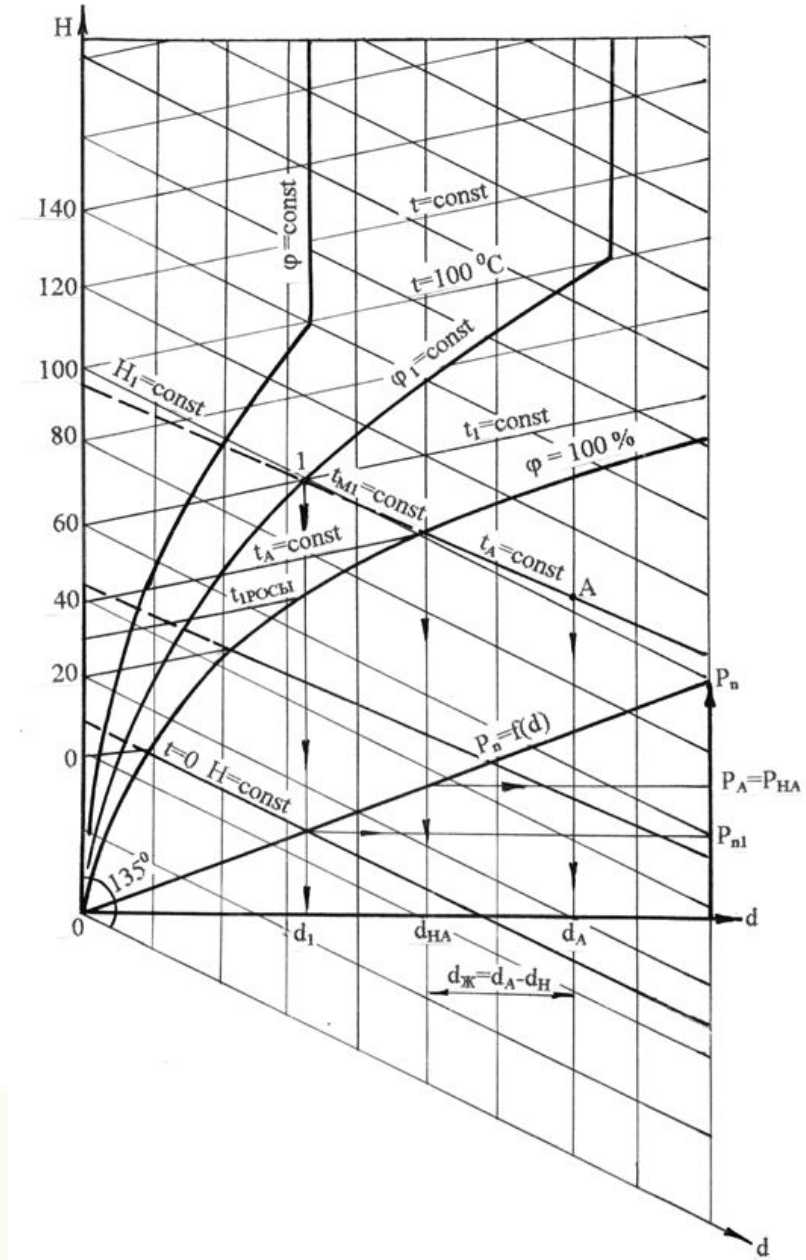
- прибор для определения влагосодержания атмосферного воздуха, состоит из двух термометров: сухого и мокрого. Мокрый термометр обернут тканью, смачиваемой водой.



Сухой термометр показывает температуру t атмосферного влажного воздуха. Мокрый термометр - температуру t_M , которая меньше температуры сухого термометра. Понижение температуры t_M по отношению к температуре t вызвано испарением воды из ткани. Однако t_M будет больше температуры t росы вследствие наличия теплообмена влажной ткани с окружающей средой, имеющей температуру $t > t_M$. При насыщенном влажном воздухе вода не может испаряться из ткани и $t = t_M$. При ненасыщенном влажном воздухе $t > t_M$. Чем суше воздух, тем больше разность температур $t - t_M$ и тем меньше его влагосодержание. Зависимость влагосодержания d_H для атмосферного воздуха от t и t_M устанавливается экспериментально. Результаты этих испытаний сводятся в психрометрические таблицы, которыми пользуются для определения влагосодержания воздуха по показаниям температур психрометра.

H,d-диаграмма атмосферного влажного воздуха

Ось координат влагосодержаний d имеет нулевое начало. Вертикальные линии в H,d- диаграмме представляют линии постоянных влагосодержаний $d = \text{const}$. Линии постоянных энтальпий $H = \text{const}$ параллельны оси d и идут под углом 135° к оси H .



H,d-диаграмма атмосферного влажного воздуха

Область ненасыщенного влажного воздуха

Для ненасыщенного влажного воздуха в H,d- диаграмме (область выше линии $\phi=100\%$) изображение изотерм $t=\text{const}$ ведется в соответствии с уравнением энтальпии для этой области, когда в воздухе может присутствовать только паровая фаза воды. Изотермы в этой области представляют собой близкие к параллельным прямые линии с угловым коэффициентом, соответствующим величине $(\partial H/\partial d)_t = (2501 + 1,93t)/1000$.

Незначительное расхождение изотерм вызвано произведением $1,93t$.

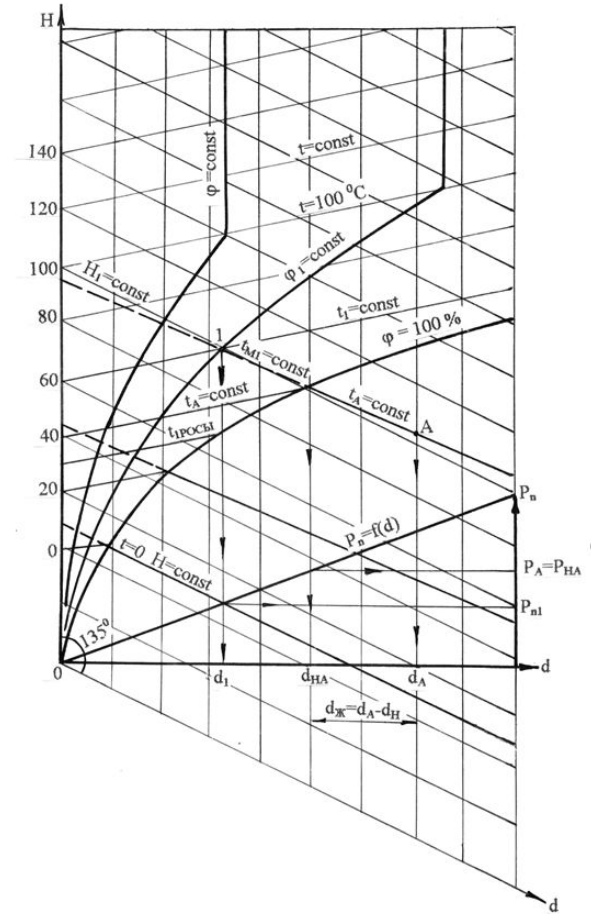
Изотерма $0\text{ }^\circ\text{C}$ в этой области, представляет собой горизонтальную прямую. Это достигается выбором масштаба по осям H и d в соответствии со значением углового коэффициента изотермы $0\text{ }^\circ\text{C}$ $(\partial H/\partial d)_{t=0} = 2501/1000$ при ее горизонтальном изображении.

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 T.

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

однозначно определяет относительную влажность

Соединив на изотермах точки с одинаковыми ϕ , получают линии постоянных относительных влажностей воздуха ($\phi=\text{const}$). При этом $\phi=0$ соответствует $d=0$, т.е. линия $\phi=0$ совпадает с осью энтальпий H.



Таким образом, ось энтальпий H в H,d- диаграмме выполняет три функции: является осью энтальпий, осью температур, линией постоянной относительной влажности воздуха $\phi=0$.

Область перенасыщенного влажного воздуха

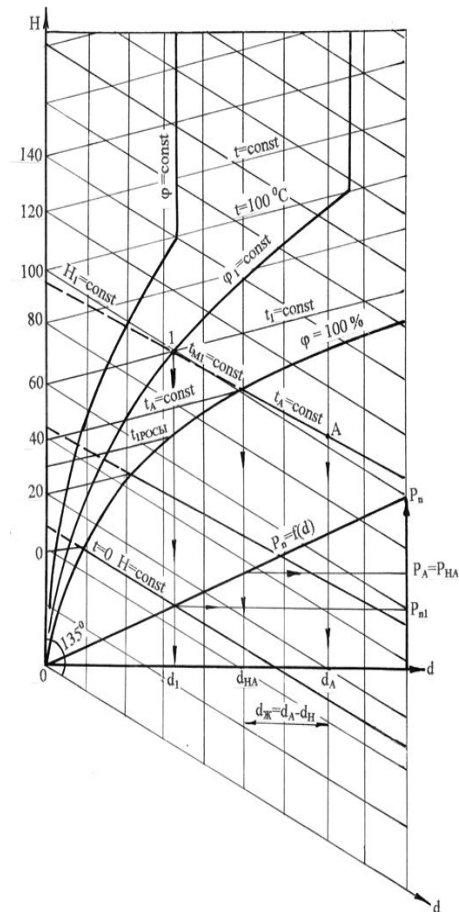
В области перенасыщенного влажного воздуха (тумана, ниже линии $\phi=100\%$) кроме ПФ в воздухе может присутствовать Ж или ТФ воды. При атм давлении воздуха и T выше 0°C могут одновременно существовать только П и ЖФ воды, а при T -х ниже 0°C – только П и ТВ (лед, снег) фазы воды, и только при 0°C могут одновременно существовать все три фазы воды. ЖФ воды при «-» T -х может существовать только при p -х выше давления тройной точки воды P_o , а max парц давление водяного пара в атм воздухе при этих T -х не может быть больше этого P . Области возможного фазового существования воды в атм воздухе - в фазовой диаграмме P, t для воды. Заштрихованная площадь соответствует состоянию воды в атм воздухе. Сверху область ограничена max парциальным P насыщения водяного пара, соответствующим 100°C . Большого парциального давления водяного пара в атмосферном воздухе быть не может, т.к. парц. p водяного пара при температуре воздуха 100°C равно полному давлению воздуха ($P_{\text{Hmax}} = P$). Слева ограничение этой области идет по линиям фазовых переходов: по линии насыщения АК – где может находиться одновременно Ж и ПФ воды, и по линии сублимации АС – где возможно одновременное существование тв и ПФ воды.

Количество водяного П в области тумана влажного воздуха при постоянной T не меняется. Оно соответствует max возможному влагосодержанию пара в воздухе при данной T и определяется в H, d - диаграмме на линии $\phi=100\%$, как влагосодержание насыщенного воздуха $d_{\text{н1}}=d_{\text{н1}}(A)$. Увеличение влагосодержания воздуха на изотерме в области тумана обусловлено увеличением ЖФ воды в воздухе. Парц давление водяных паров на изотерме в области тумана при этом остается постоянным и равным давлению насыщения ($P_{\text{н1}}=P_{\text{н1}}$). В выражении энтальпии перенасыщенного влажного воздуха при $t=\text{const}$ переменной будет только третье слагаемое, определяющее угол наклона изотермы 27 в области тумана H, d - диаграммы выражением $(\partial H/\partial d)_t=4,1877t/1000$. Угловой

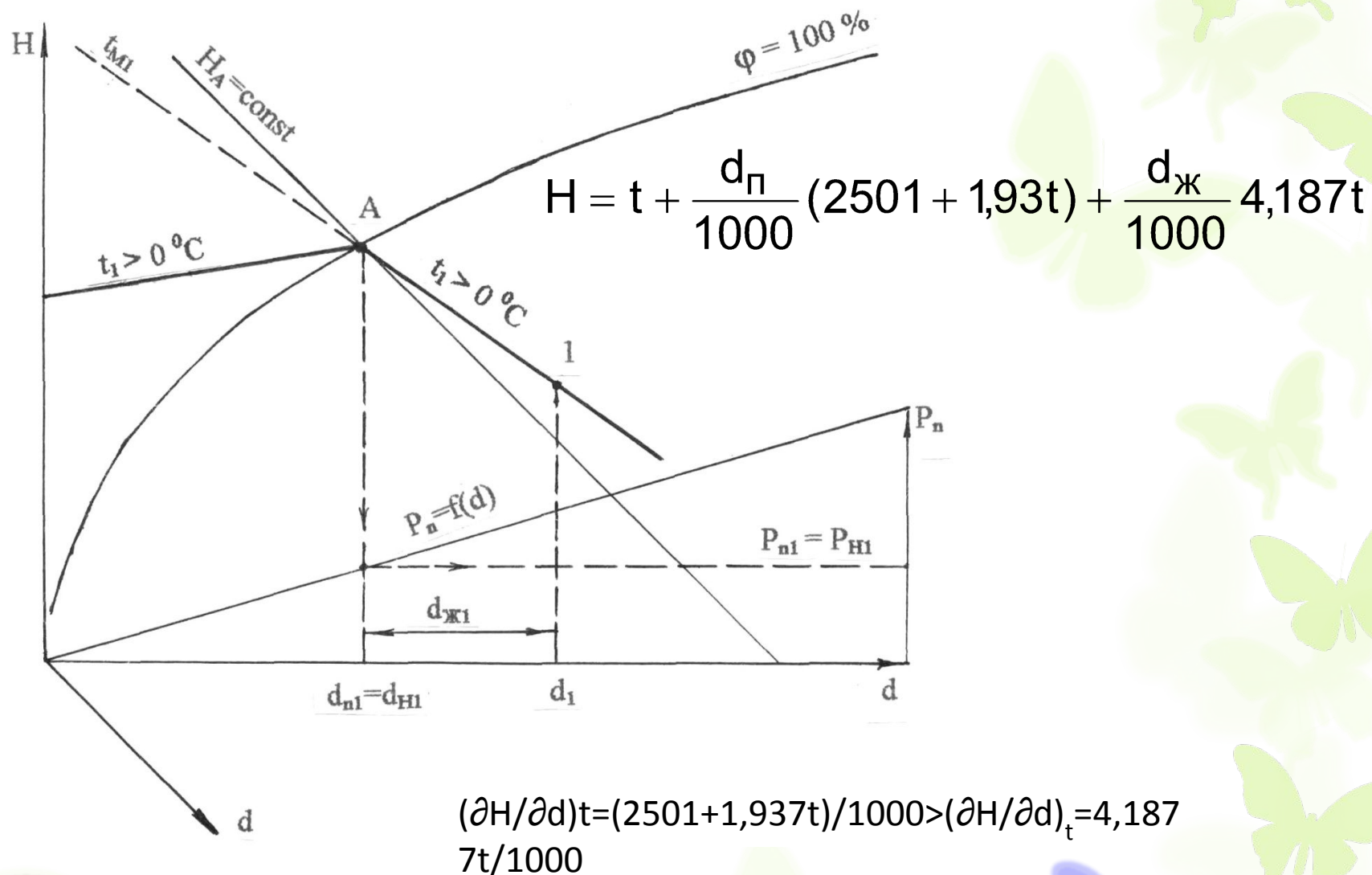
коэфф. для изотермы ненасыщенного влажного воздуха

$$(\partial H/\partial d)_t=(2501+1,937t)/1000>(\partial H/\partial d)_t=4,1877t/1000$$

H, d- диаграмма атмосферн. Влажного воздуха



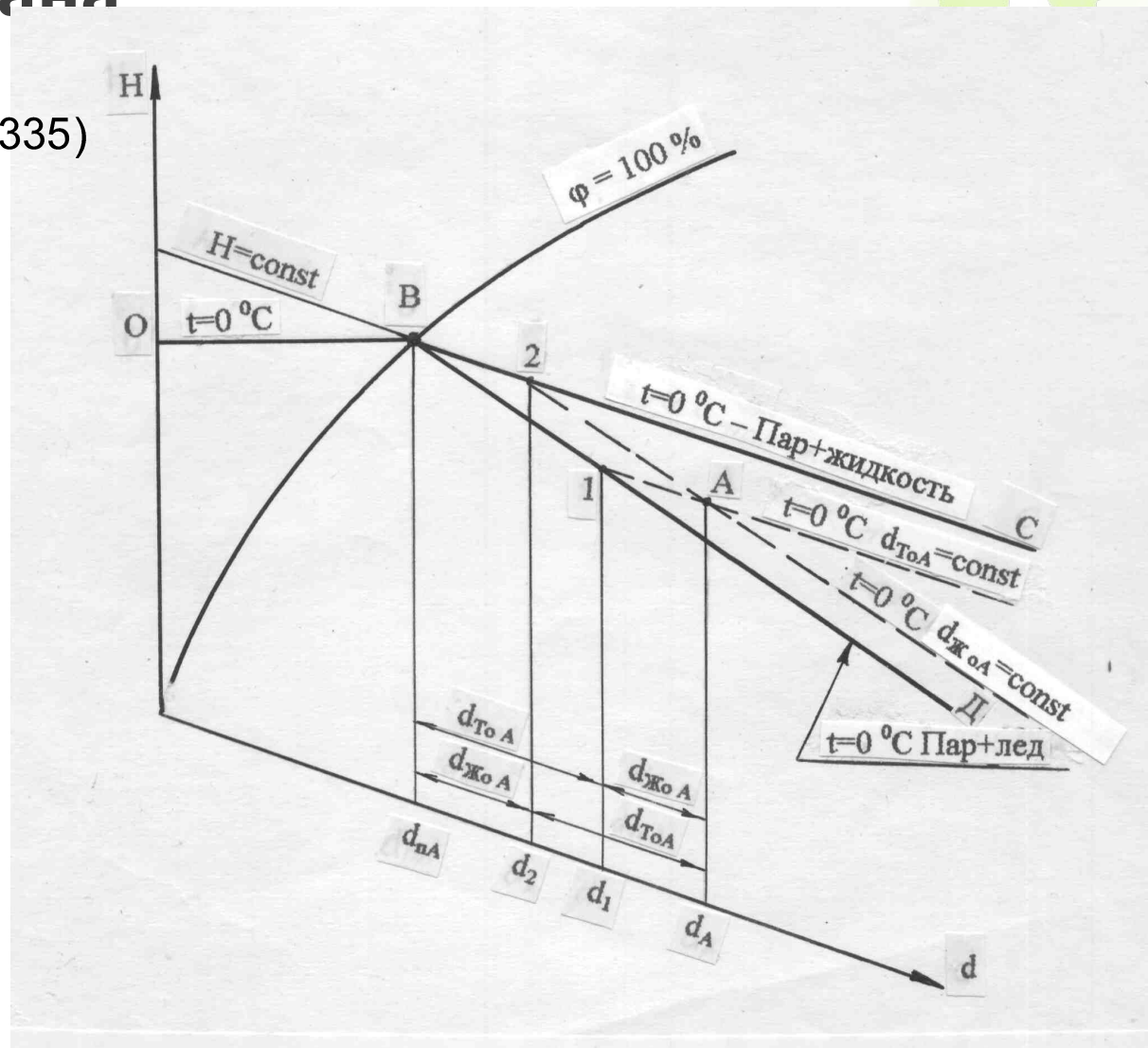
Область перенасыщенного влажного воздуха



Изображение в H,d- диаграмме изотермы 0 °С в области тумана

$$H_{t=0} = \frac{d_{HO}}{1000} 2501 + \frac{d_{TO}}{1000} (-335)$$

Рис. 7.8. К определению параметров перенасыщенного влажного воздуха по H,d - диаграмме при $t=0\text{ }^{\circ}\text{C}$



особенности характеристик влажного воздуха при отрицательных температурах

Для температур меньше 0 °С в атмосферном влажном воздухе могут присутствовать только паровая и твердая фазы воды. В случае ненасыщенного влажного воздуха имеет место только паровая фаза воды, для которой уравнение энтальпии соответствует выражению

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

точке 1 соответствует ненасыщенный влажный воздух с относительной влажностью $\phi = P_{\text{п}}/P_{\text{с}} = v''/v = \rho/\rho'' < 1$, где $P_{\text{с}}$ – давление сублимации, соответствующее изотерме $t < 0$ °С, а v'' – удельный объем сухого "насыщенного" пара при $P_{\text{с}}$, в этом случае $P_{\text{п}} < P_{\text{с}}$, а водяной пар перегретый;

точке 2 соответствует насыщенный влажный воздух с относительной влажностью $\phi = 100\%$ и $P_{\text{п}} = P_{\text{с}}$, $\rho = \rho''$, $v = v''$, а водяной пар во влажном воздухе будет в виде сухого "насыщенного";

точке 3 соответствует перенасыщенный влажный воздух с относительной влажностью $\phi = 100\%$, $P_{\text{п}} = P_{\text{с}}$, водяной пар во влажном воздухе кроме сухого "насыщенного" пара содержит твердую фазу воды (лед, снег)

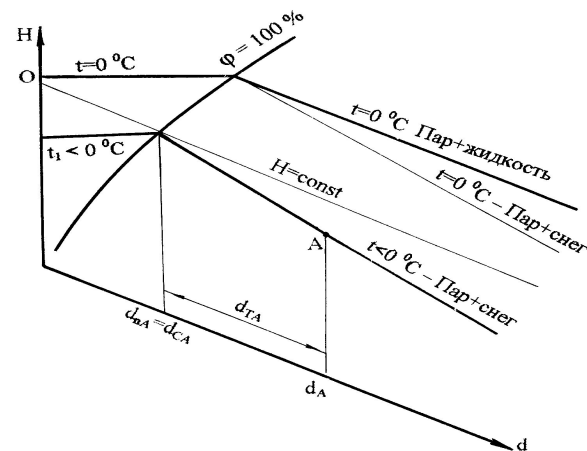


Рис. 7.9. К определению параметров перенасыщенного влажного воздуха по H, d - диаграмме при $t < 0$ °С

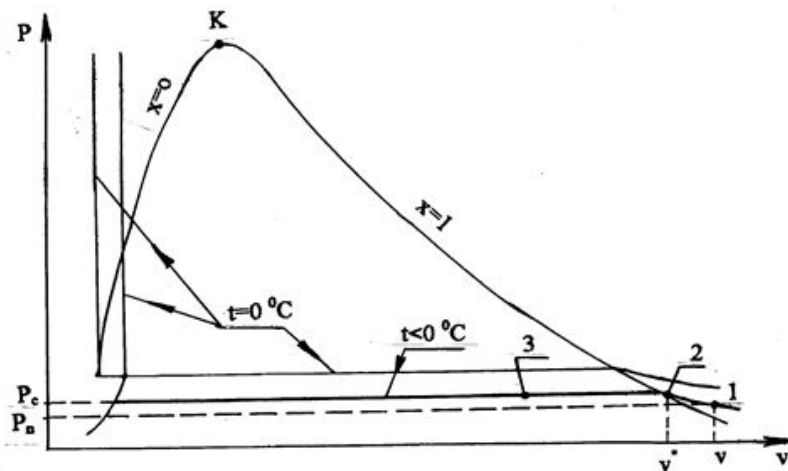
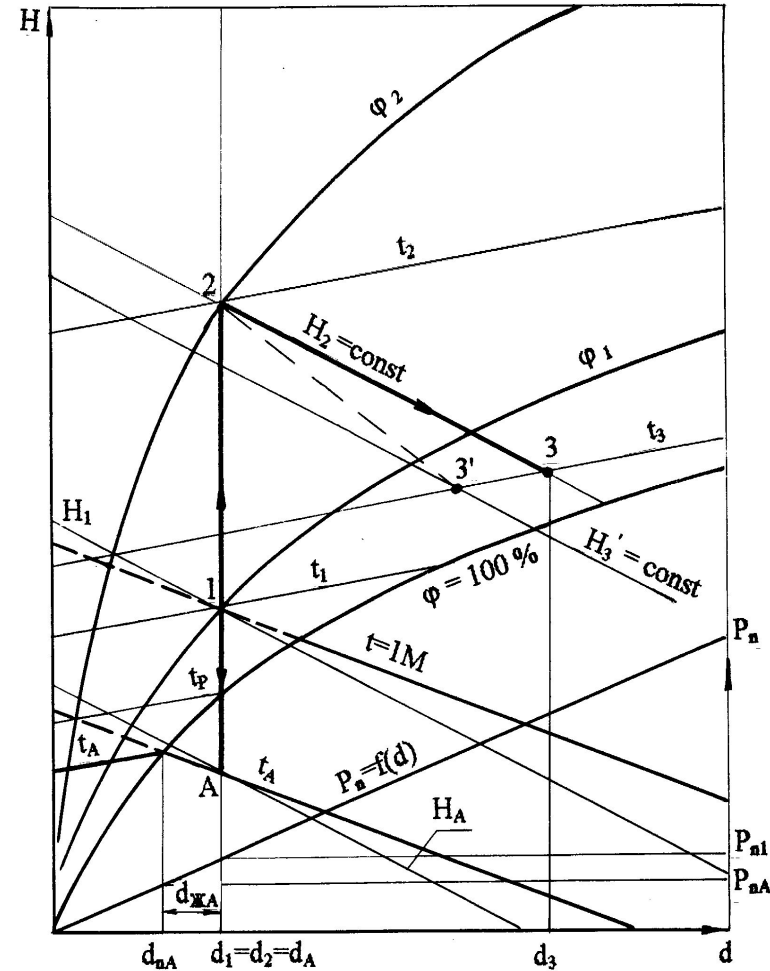


Рис. 7.10. Состояния H₂O в атмосферном влажном воздухе при $t < 0$ °С в P, v - диаграмме

Пример пользования H, d - диаграммой

При известных температурах сухого t_1 и мокрого t_{m1} термометров, взятых с показаний психрометра, определяем на их пересечении в H, d - диаграмме точку 1, соответствующую состоянию влажного воздуха (см. рис.7.6). По осям координат находим H_1 и d_1 и проходящую через точку 1 линию $\phi_1 = \text{const}$. На пересечении линий $d_1 = \text{const}$ и $\phi_1 = 100\%$ определяется температура точки росы $t_{1\text{росы}}$, а по зависимости $P_{\text{п}} = f(d)$ и d_1 находится парциальное давление пара $P_{\text{п1}}$.

Если точка А (см. рис.7.6) располагается в области перенасыщенного влажного воздуха и мы знаем ее температуру, то определить влагосодержание d_A в ней можно только экспериментально. Влагосодержание пара в этой точке соответствует величине $d_{\text{нА}}$, находящейся на пересечении линий t_A и $\phi = 100\%$. Влагосодержание жидкой фазы воды в этой точке определяется как разность влагосодержаний: $d_{\text{жА}} = d_A - d_{\text{нА}}$. Парциальное давление пара для точки А равно давлению насыщения: $P_A = P_{\text{нА}}$ при t_A и $\phi = 100\%$.



Изображение процессов влажного воздуха в H, d - диаграмме

Процесс нагрева 12 - вертикальная прямая, идущая вверх. Отн. влажность воздуха в этом процессе $\downarrow (\phi_2 < \phi_1)$.

Снижение относительной влажности увеличивает потенциальные возможности воздуха по забору влаги из окружающей среды, т.е. осуществлять сушку материалов более эффективно горячим воздухом. **Процесс охлаждения 1A** представляет вертикальную прямую, но идет вниз. Отн. влажность воздуха в этом процессе возрастает. В случае

охлаждения воздуха ниже точки росы ($t_A < t_{\text{росы}}$) можно определить по H, d - диаграмме количество влаги, выпавшей в виде капелек жидкости из воздуха $d_{\text{жА}}$. Для этого определяется количество пара в перенасыщенном воздухе $d_{\text{нА}}$ по t_A и $\phi = 100\%$ и по разности влагосодержаний $d_1 - d_{\text{нА}} = d_{\text{жА}}$ находится влагосодержание жидкой фазы воды в воздухе. В конце

такого процесса степень сухости водяного пара со $\downarrow T$ будет уменьшаться. **процесс сушки В** этом пр-се воздух используется в качестве сушильного агента. Поскольку воздух контактирует с материалами, содержащими воду, его влагосодержание может увеличиваться. **увеличение влагосодержания воздуха происходит только за счет**

испарения воды (процесс 23). Отн. влажность воздуха в начале процесса должна быть меньше 100%. Теплота, идущая на испарение воды, берется из воздуха и передается испаряемой воде, поступающей в воздух. В результате

испарения воды воздух охлаждается, T его уменьшается, а испаренная вода в виде пара уносится потоком воздуха, увеличивая его влагосодержание на величину $d_{\text{исп}} = d_3 - d_2$. За счет увеличения влагосодержания ($d_3 > d_2$) возрастает и

парциальное давление водяного пара ($P_{\text{п3}} > P_{\text{п2}}$) в этом процессе. **энтальпия влажного воздуха** при этом **остаётся**

неизменной ($H_2 = H_3$), поскольку внешнего подвода (отвода) теплоты не было, а просто произошло перераспределение E между воздухом и добавившимися к нему водяными П. В случае если **процесс сушки осуществляется воздухом,**

имеющим 100% - ную относительную влажность, его **влагосодержание может увеличиваться только за счет**

механического уноса потоком воздуха капелек воды. Этот процесс в H, d - диаграмме будет идти в области тумана по изотерме (рис.7.12, пр-с 12), поскольку **при отсутствии испарения воды T воздуха изменяться не будет**. Энтальпия

воздуха в конце такого процесса будет больше, чем энтальпия воздуха в начале процесса ($H_2 > H_1$). Поскольку унос

капель воды в нашем процессе приводит к увеличению $d_{\text{ж}}$ от нуля до $d_{\text{ж2}}$, то, **несмотря на постоянство температуры**

воздуха в процессе 12, его энтальпия будет возрастать. **Процесс поглощения влаги из воздуха** объектом, имеющим

одинаковую с ним T , при отсутствии т/о с окружающей средой будет идти при постоянной T в сторону уменьшения влагосодержания воздуха (процесс АВ, рис.7.12). Относительная влажность, энтальпия и парциальное давление водяного пара будут уменьшаться, если весь процесс идет в области ненасыщенного влажного воздуха.