

За нуль энтальпии и энтропии воды принимаются энтальпия и энтропия воды при $0\text{ }^{\circ}\text{C}$, а поэтому $i_0 = 0$ и $S_0 = 0$.

Изменение энтропии воды при нагреве ее от $0\text{ }^{\circ}\text{C}$ (273 K) до температуры кипения T_s определяется:

$$S' = \int_{273}^{T_s} \frac{dq}{T} = \int_{273}^{T_s} c_p^b \frac{dT}{T} = c_p^b \ln \frac{T_s}{273}.$$

При испарении жидкость, нагретая до температуры кипения T_s , обращается при постоянной температуре и давлении в пар, т. е. процесс испарения - *изобарно-изотермический* и в диаграмме $T - S$ он изображается горизонтальной линией $b' - c'$.

Теплота, на превращение 1 кг жидкости при температуре кипения в сухой насыщенный пар, называется *теплотой парообразования* r (площадь $S'b'c'S''S'$).

Теплота r - обратная функция p и обращается в 0 при $p_{кр}$. При низких p теплота r значительно больше теплоты жидкости. При увеличении давления разность между ними уменьшается и при давлении $p = 90 \text{ бар}$ $q' \approx r$.

Изменение энтропии при испарении равно:

$$S'' - S' = r/T_s.$$

При критическом давлении $r = 0$ и $S'' = S'$.

Теплота сухого насыщенного пара.

Состояние сухого насыщенного пара ($x=1$) определяется лишь одним параметром состояния - p_s или t_s . Температура сухого насыщенного пара, равная температуре кипения (насыщения), может быть при $p_s \leq 20$ бар приблизительно оценена по формуле $t_s \approx 100\sqrt{p_s}$ [°C], а плотность $\rho'' \approx 0,5\rho_s$ [кг/м³].

Полной теплотой сухого насыщенного пара λ'' называется теплота, расходуемая при $p_s = \text{const}$ на получение 1 кг сухого насыщенного пара из воды при 0°C :

$$\lambda'' = q' + r.$$

Если пренебречь сжимаемостью воды, то

$$\lambda'' = i'',$$

т. е. полная теплота сухого насыщенного пара приближенно равна его энтальпии.

Энтропия сухого насыщенного пара S'' равна

$$S'' = S' + \frac{r}{T} = c_p^b \ln \frac{T_s}{273} + \frac{r}{T_s}.$$

Теплота влажного пара λ_x , расходуемая на нагревание 1 кг воды от θ °C до кипения и неполное (в количестве x) ее испарение:

$$\lambda_x = q' + rx = i_x.$$

Состояние влажного пара определяется 2-мя параметрами: давлением (температурой t_s) насыщения p_s и степенью сухости x . Удельный объем влажного пара как объем смеси, состоящей из $(1-x)$ долей воды и x долей пара, равен:

$$v_x = (1-x)v' + xv''.$$

Энтропия влажного пара определяется:

$$S_x = c_p^b \ln \frac{T_s}{273} + \frac{r}{T_s x}.$$

Теплота, сообщаемая пару в процессе его перегрева при $p = const$, (площадь $S''c'd'SS''$) равна:

$$q = i - i'' = \int_{t_s}^t c_n^p dt = c_{pm}^n (t - t_s),$$

где i - энтальпия перегретого пара; c_{pm}^n - средняя теплоемкость пара в интервале температур t и t_s .

Теплота перегретого пара λ количество теплоты, которое необходимо подвести к 1 кг воды при 0°C , чтобы получить из нее перегретый пар температурой t :

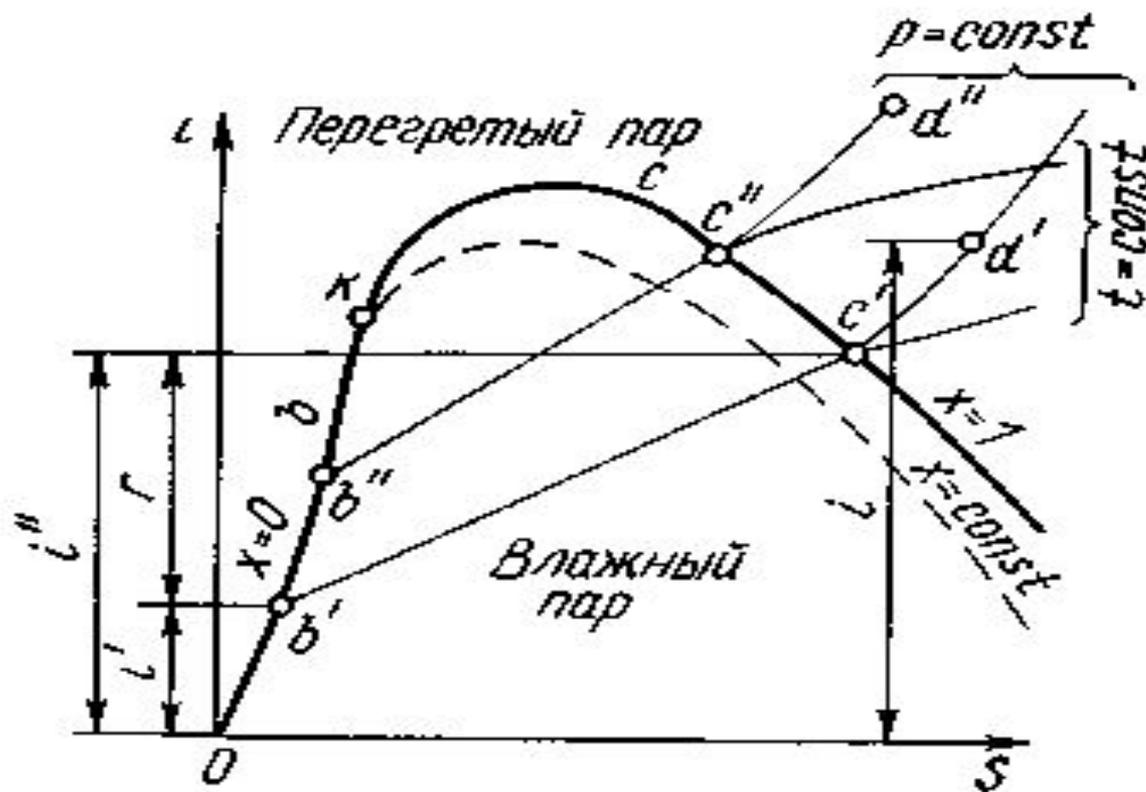
$$\lambda = q' + r + c_{pm}^n (t - t_s).$$

Изменение энтропии в процессе перегрева может найдено из 2-го закона термодинамики:

$$S - S'' = \int_{T_s}^T \frac{dq}{T} = \int_{T_s}^T c_p^n \frac{dT}{T} = c_{pm}^n \ln \frac{T}{T_s}.$$

откуда энтропия перегретого пара S

$$S = c_p^n \ln \frac{T_s}{273} + \frac{r}{T_s} + c_{pm}^n \ln \frac{T}{T_s}.$$



Точка 0 - энтальпия воды при 0 °С; линия b ($x = 0$) - кривая кипения; точка k - критическая точка; линия c ($x=1$) - кривая конденсации (отделяет область влажного пара от области перегретого пара).

Изобары воды почти совпадают с кривой кипения, в области влажного пара изобары - веерообразно расходящиеся пучки прямых линий, касательных к кривой конденсации, а в области перегретого пара - кривые с выпуклостью в сторону оси S .

Линии $ob'c'd'$ и $ob''c''d''$ - изобары парообразования.

Смесь сухого воздуха с водяным паром называется **влажным воздухом**.

Насыщенный влажный воздух – смесь сухого воздуха с насыщенным водяным паром.

Ненасыщенный влажный воздух – смесь сухого воздуха с ненасыщенным водяным паром.

Температура, до которой нужно охладить ненасыщенный влажный воздух, чтобы он стал насыщенным, называется **температурой точки росы**.

Расчет процессов с влажным воздухом проводится при условии, что количество сухого воздуха не меняется:

$$M_B = \text{const} = 1$$

Давление влажного воздуха - есть сумма парциальных давлений воздуха и водяного пара:

$$p = p_B + p_{\text{п}}$$

Абсолютная влажность воздуха — это масса пара, содержащегося в 1 м^3 влажного воздуха.

$$\rho_{\text{п}} = \frac{M_{\text{п}}}{V_{\text{п}}} = \frac{M_{\text{п}}}{V_{\text{см}}}$$

Относительная влажность воздуха — отношение абсолютной влажности ненасыщенного воздуха к максимально возможной абсолютной влажности воздуха при той же температуре:

$$\varphi = \frac{\rho_{\text{п}}}{\rho_{\text{max}}} = \frac{p_{\text{п}}}{p_{\text{max}}}.$$

Влагосодержание — это отношение массы пара, содержащегося во влажном воздухе, к массе сухого воздуха.

$$d = \frac{M_n}{M_s} = \frac{\rho_n}{\rho_s}, \left[\frac{\text{кг}}{\text{кг}} \right], \left[\frac{\text{г}}{\text{г}} \right].$$

Выведем формулу связи между влагосодержанием и парциальным давлением:

$$p_e V = M_e R_e T, \quad R_e = R/0.029,$$

$$p_n V = M_n R_n T, \quad R_n = R/0.018.$$

Разделив почленно первое уравнение на второе, получим:

$$\frac{p_e}{p_n} = \frac{0.622}{d}.$$

Учитывая, что $p_e = p - p_n$ находим:

$$d = 0.622 \frac{p_n}{p - p_n}.$$

Выражение относительной влажности воздуха через влагосодержание:

$$\varphi = \frac{d}{0.622 + d} \cdot \frac{p}{p_{\max}}$$

Относительная влажность воздуха и влагосодержание могут быть определены с помощью психрометра, состоящего из двух термометров – сухого и мокрого или по *i-d* диаграмме влажного воздуха.

Изобарную теплоемкость обычно относят к 1 кг сухого воздуха, она равна сумме теплоемкостей 1 кг сухого воздуха и d кг пара:

$$c_p = c_{pn} + c d.$$

Можно принять удельные изобарные теплоемкости сухого воздуха и водяного пара равными:

$$c_{pn} = 1 \text{ кДж/кг K (const) = } ,$$

$$c_p = 1,96 \text{ К/(const) = } .$$

Тогда

$$c_p = 1 + 1,96 d.$$

Энтальпия влажного воздуха определяется как энтальпия газовой смеси, состоящей из 1 кг сухого воздуха и d кг водяного пара:

$$I = i_v + i_n d,$$

где $i_v = c_{pv} t \approx t$ - энтальпия сухого воздуха,

$i_n = c_{pвод} t_n + r + c_{pn} (t - t_n)$ - энтальпия водяного пара, находящегося во влажном воздухе в перегретом состоянии,

t - температура влажного воздуха,

r - скрытая теплота парообразования,

$c_{pвод} = 4,2 \text{ кДж} / (\text{кг} \cdot \text{К})$ - удельная изобарная теплоемкость воды,

t_n - температура насыщения при парциальном давлении пара в смеси.

Учитывая, что для интервала температур $0 \leq \epsilon_n \leq 100^\circ$

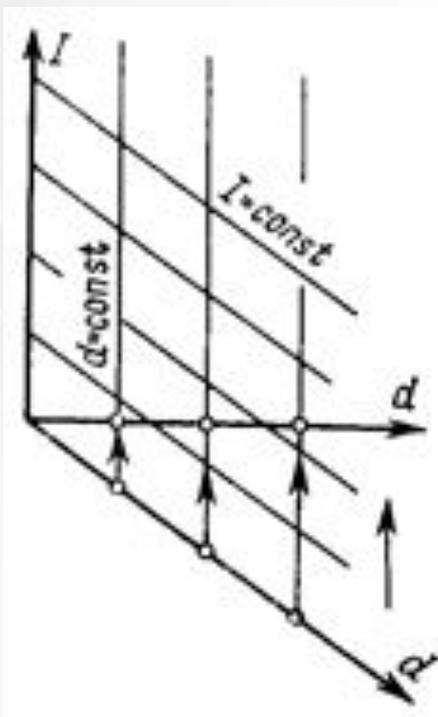
$$k_{\text{Дж}} = 2500 - 2,3t_n \quad / \quad \cdot \quad ,$$

$$i_n = 4,19t_n + 2500 - 2,3t_n + 1,96(t - t_n) = 2500 + 1,96t,$$

получим известную формулу Рамзина для энтальпии влажного воздуха:

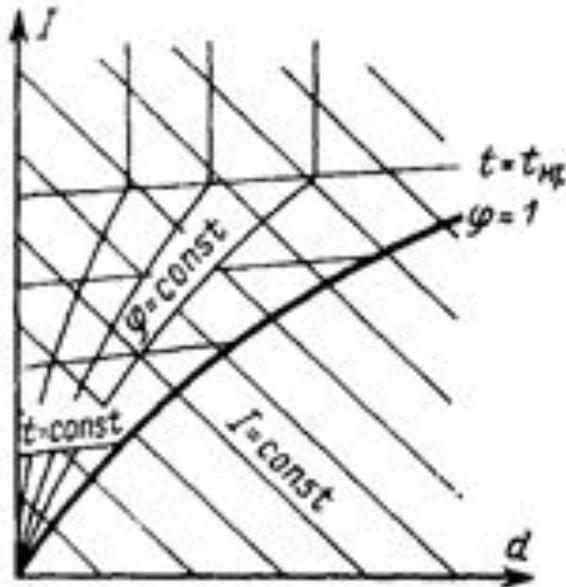
$$I = t + (2500 + 1,96t)d.$$

Id-диаграмма влажного воздуха предложена проф. Л.К.Рамзиным в 1918г.



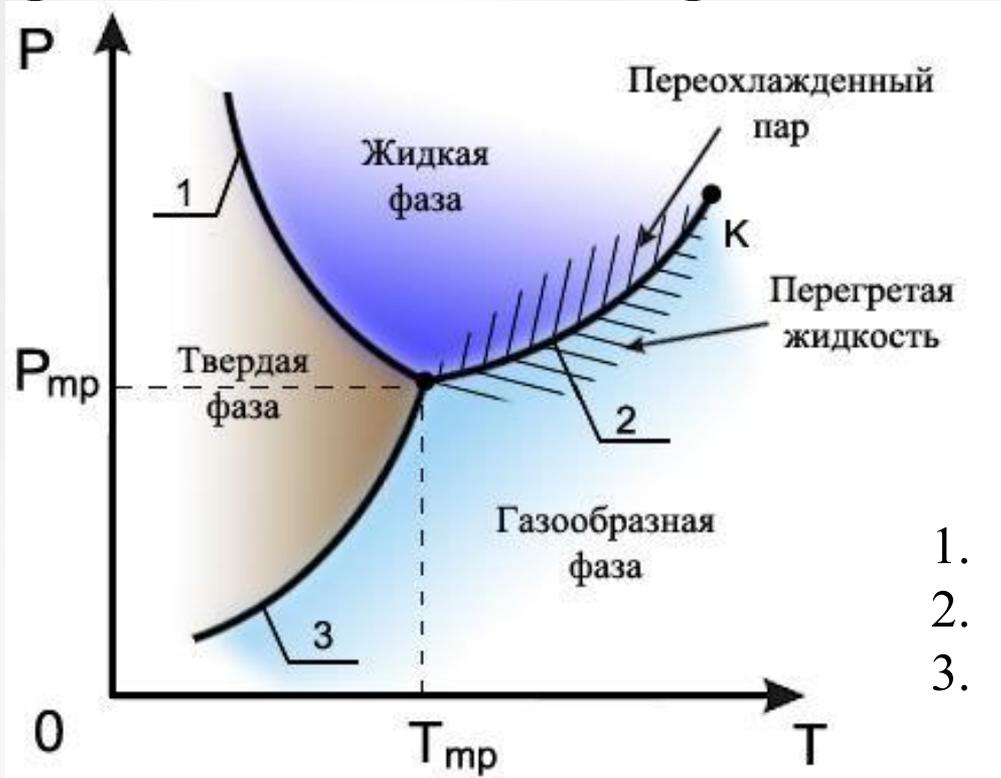
В этой диаграмме по оси абсцисс откладывается влагосодержание воздуха d , а по оси ординат, расположенной под углом 135° – его энтальпия I . Диаграмма строится для давления воздуха $p=745$ мм рт. ст., но с достаточной точностью ее можно применять и при небольших отклонениях от него.

Кроме того, на диаграмме имеются линии постоянных температур влажного воздуха (прямые линии), кривые относительной влажности воздуха, кривая парциальных давлений



По id -диаграмме, зная температуру t и относительную влажность φ можно определить энтальпию i , влагосодержание d и парциальное давление p_n . По температурам сухого и мокрого термометра можно определить температуру точки росы.

Фазовым переходом называется процесс, сопровождающийся затратой теплоты и изменением объема, в котором происходит изменение агрегатного состояния вещества.



1. Плавление – затвердевание,
2. Испарение - конденсация,
3. Сублимация – десублимация.

Процессы фазовых превращений из одного состояния в другое происходят при постоянной температуре с поглощением (выделением) определенного количества теплоты:

1. Температура (теплота) плавления (затвердевания),
2. Температура (теплота) кипения (конденсации),
3. Температура (теплота) сублимации (десублимации).

Тройная точка – точка термодинамического равновесия трех различных фаз вещества: твердой, жидкой и газообразной, т.е. пропадает различие между этими тремя фазами.

Уравнение Клайперона-Клаузиуса описывает связь между термическими величинами (температура, давление, удельный объем и калорической величиной (теплота фазового перехода)).

$$q = T(v'' - v') \frac{dp}{dT}, \quad \frac{dp}{dT} = \frac{q}{T(v'' - v')} = \operatorname{tg} \alpha.$$

Для всех нормальных жидкостей:

$$v'' - v' > 0, \operatorname{tg} \alpha > 0, \alpha < \pi/2.$$

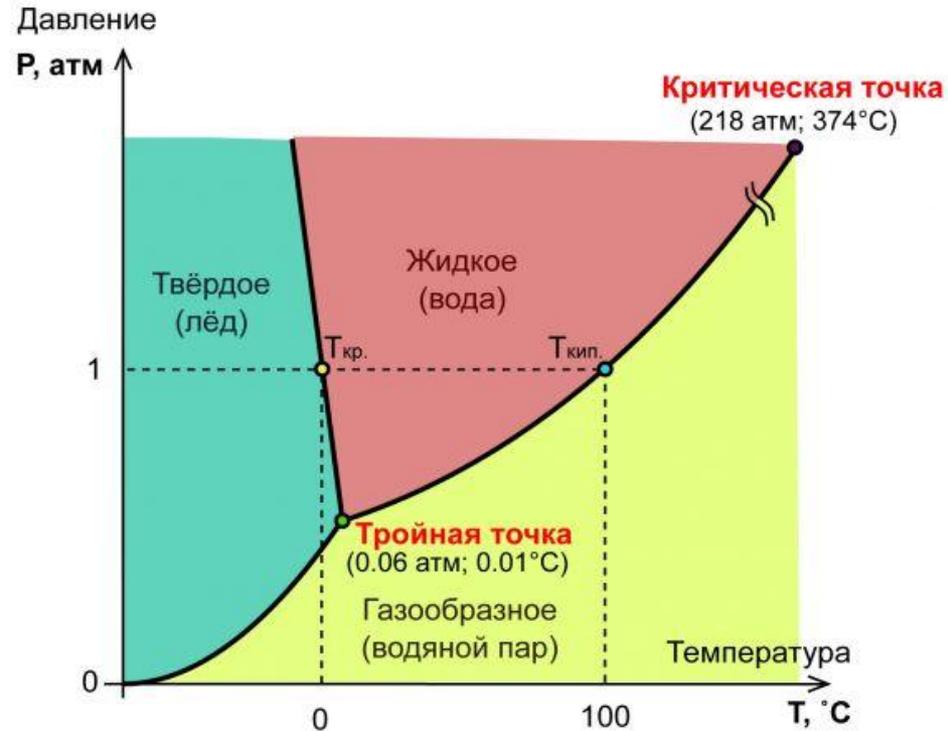
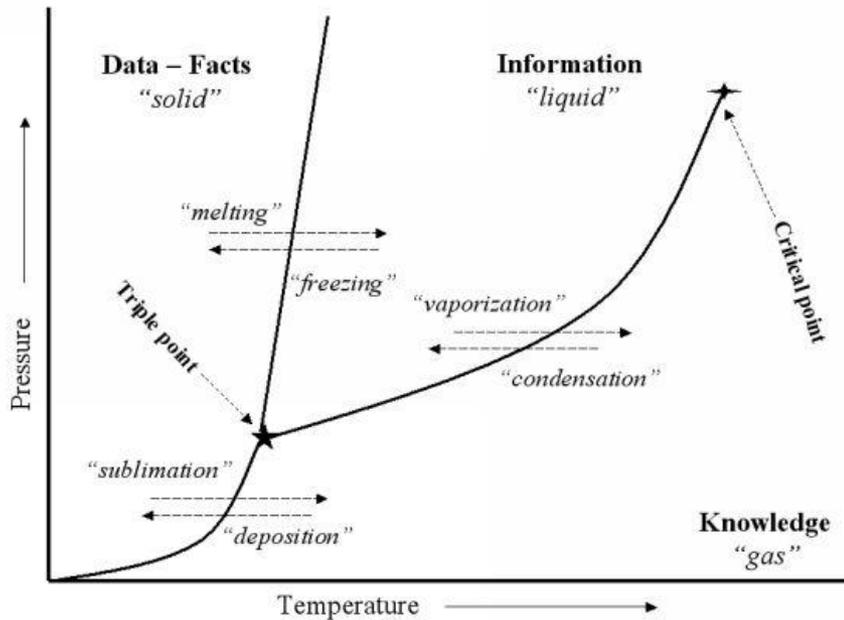
Для аномальной жидкости (вода):

$$v'' - v' < 0, \operatorname{tg} \alpha < 0, \alpha < \pi/2.$$

Тепло

Техника

Уравнение Клайперона-Клаузиуса



Уравнение Клайперона-Клаузиуса описывает связь между термическими величинами (температура, давление, удельный объем и калорической величиной (теплота фазового перехода).

$$q = T(v'' - v') \frac{dp}{dT}, \quad \frac{dp}{dT} = \frac{q}{T(v'' - v')} = \operatorname{tg} \alpha.$$

Для всех нормальных жидкостей:

$$v'' - v' > 0, \operatorname{tg} \alpha > 0, \alpha < \pi/2.$$

Для аномальной жидкости (вода):

$$v'' - v' < 0, \operatorname{tg} \alpha < 0, \alpha < \pi/2.$$