

Часть 1

Техническая термодинамика

Занятие 5

Исследование термодинамических процессов водяного пара.
Смеси идеальных газов. Влажный воздух.

Уравнение состояния реальных газов

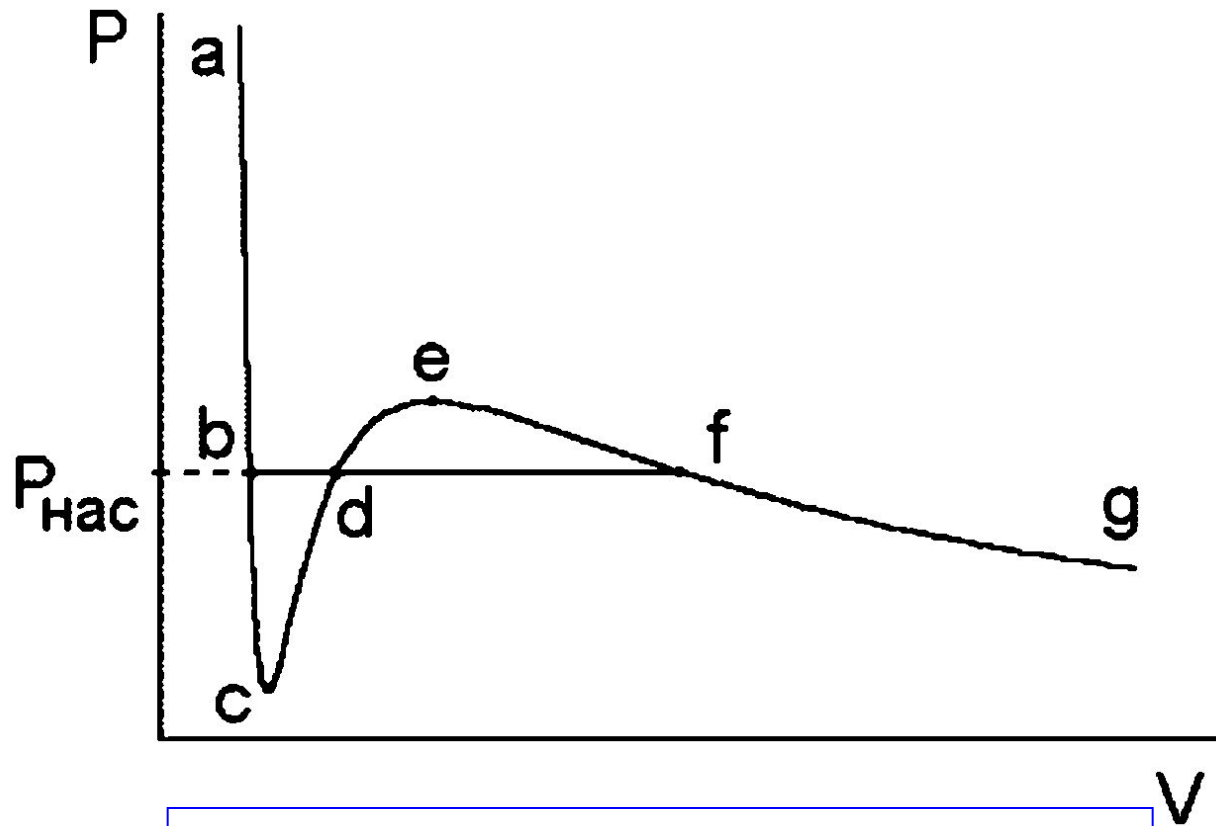
$$p = \frac{RT}{v} \cdot \frac{v}{(v-b)} = \frac{RT}{v-b} \quad p_{\text{мол}} = \frac{a}{v^2}$$

Уравнение Ван-дер-Ваальса (1873):

$$p + \frac{a}{v^2} = \frac{RT}{v-b}$$

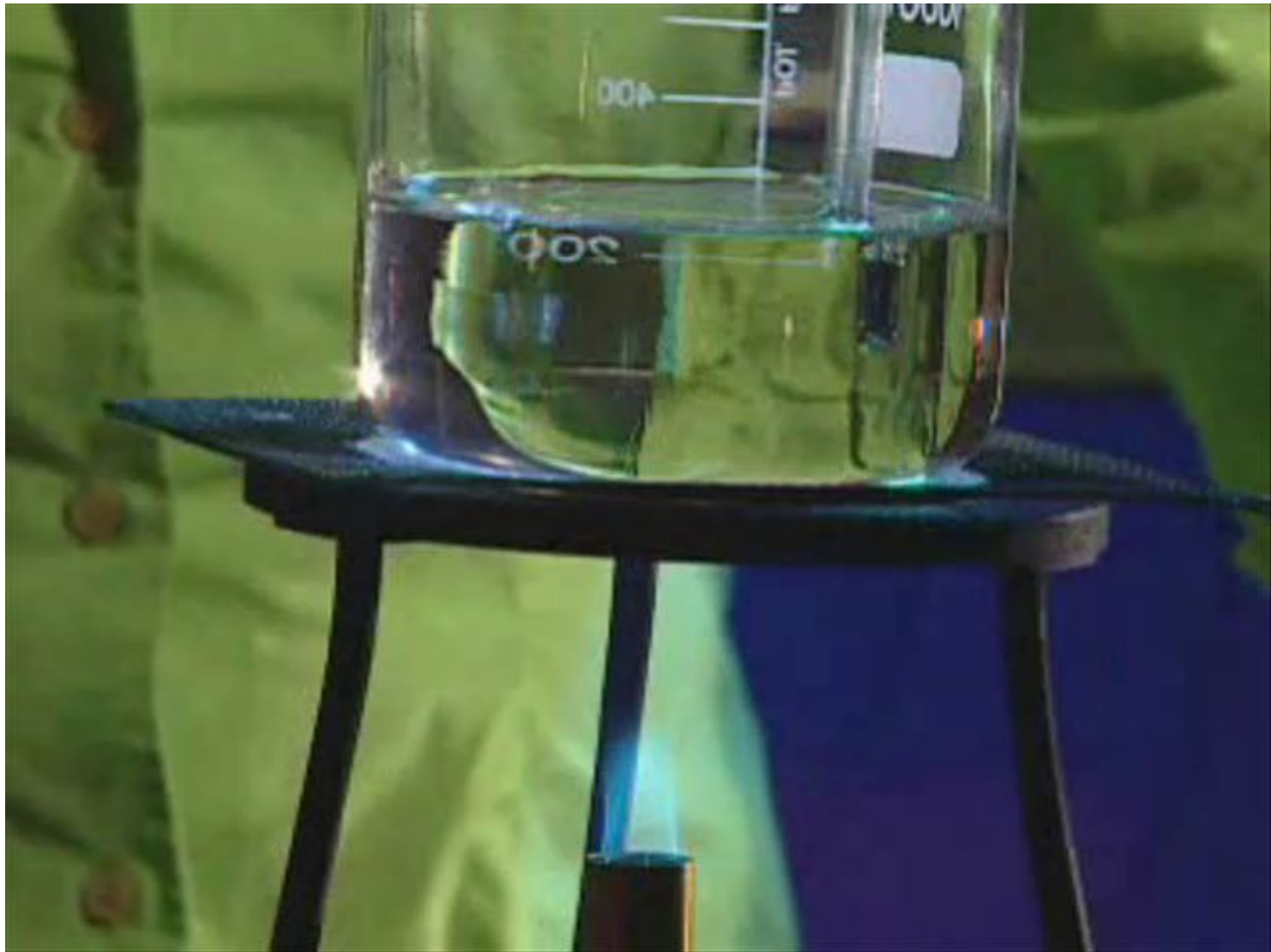
$$\left(p + \frac{a}{v^2} \right) \cdot (v-b) = RT$$

Изотерма Ван-дер-Ваальса



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

Изотерма Ван-дер-Ваальса

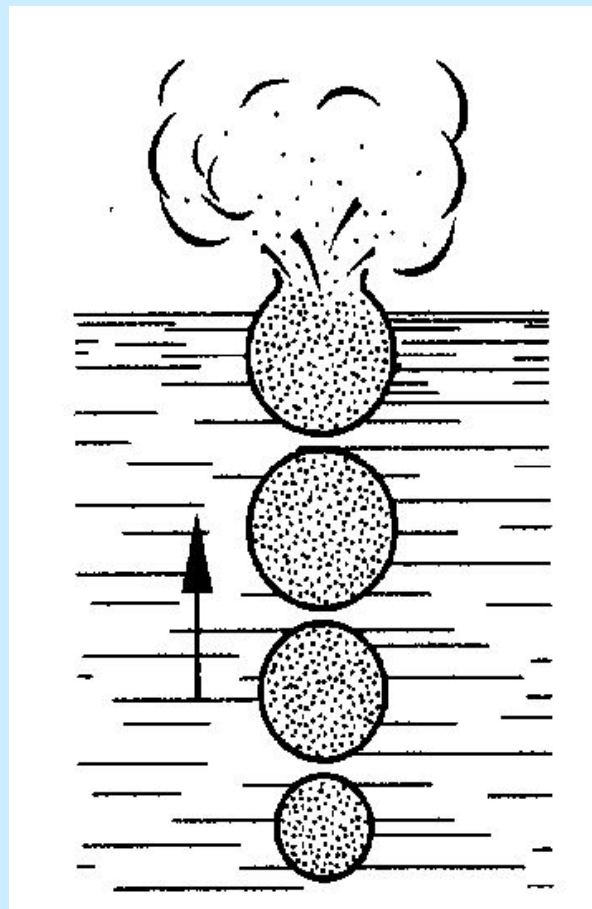
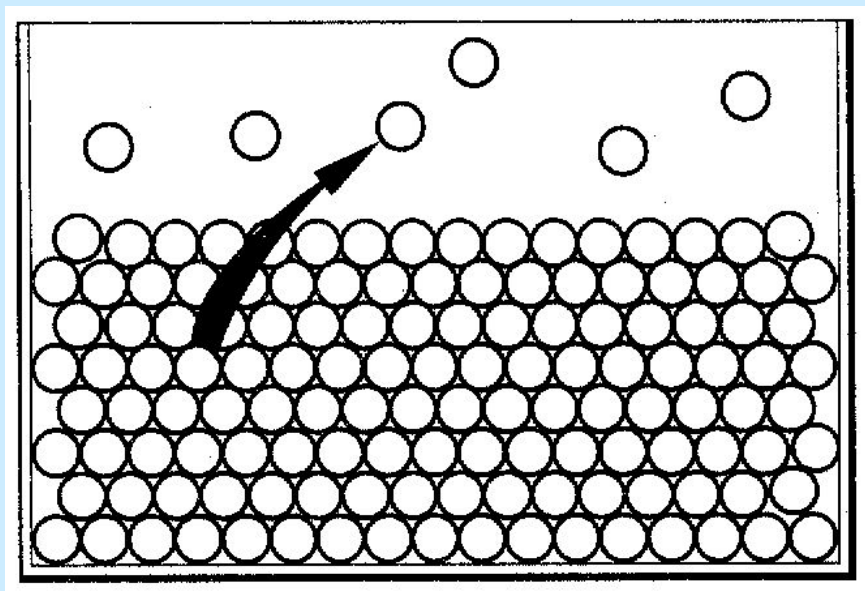


Термодинамические процессы водяного пара

Водяной пар

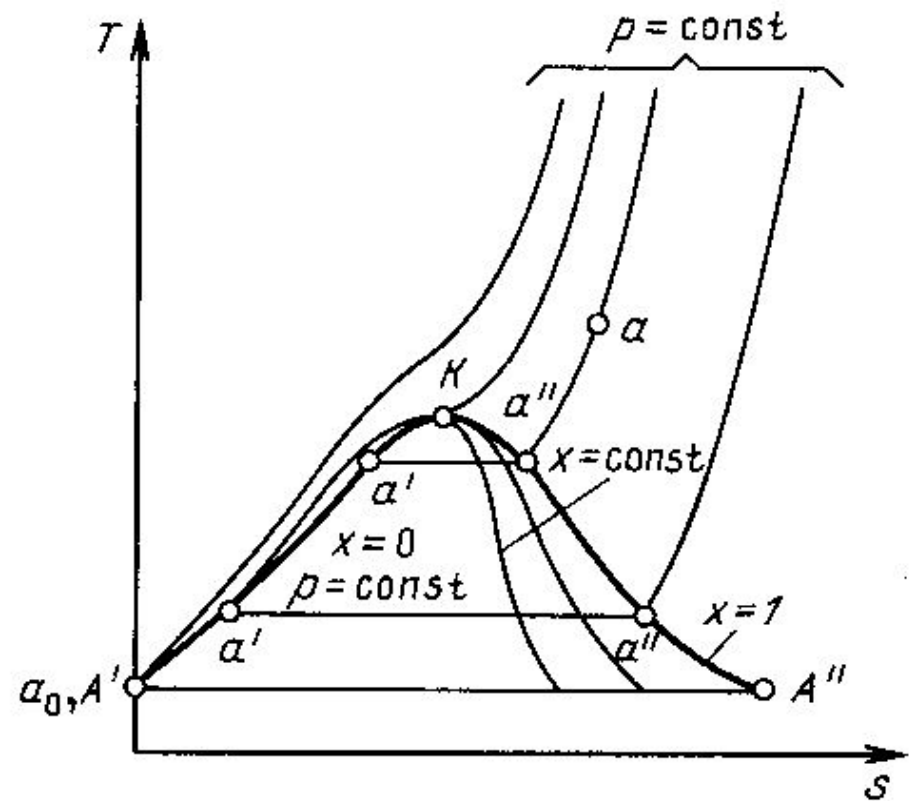
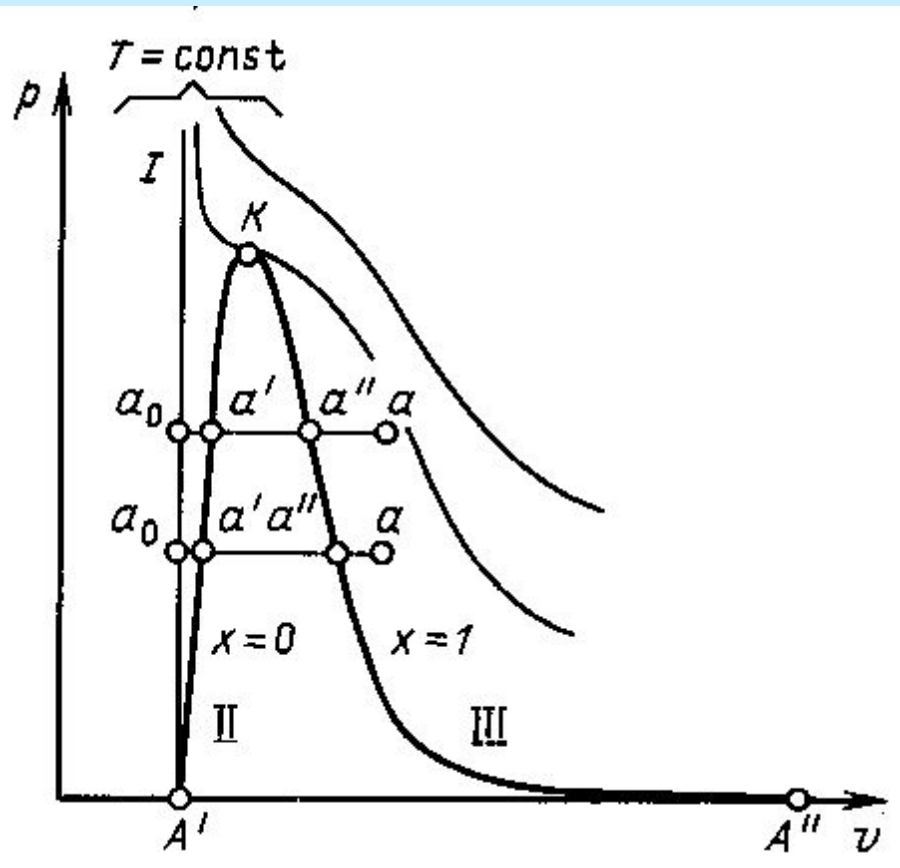
ИСПАРЕНИЕ

КИПЯЧЕНИЕ



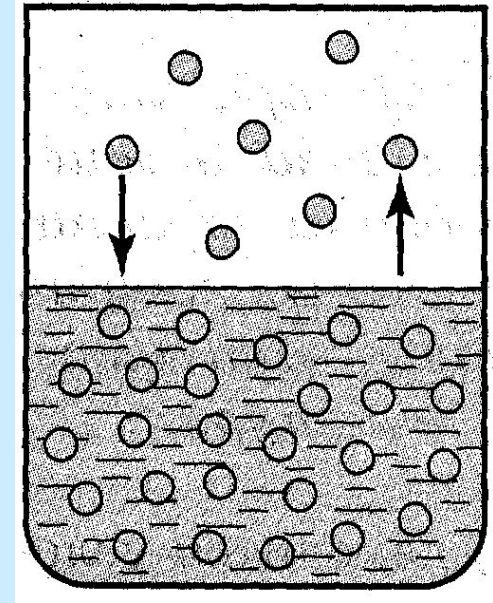
Термодинамические процессы водяного пара

Процесс испарения при постоянном давлении



Параметры водяного пара

Насыщенный – пар, находящийся в термическом и динамическом равновесии с жидкостью из которой он образуется.



Пар: влажный и сухой

↓
↪ отсутствуют частицы жидкой фазы

↓
двухфазная смесь из пара с взвешенными капельками жидкости

Перегретый – пар, температура которого превышает температуру насыщенного пара того же давления

Параметры водяного пара

Насыщенный – пар, находящийся в термическом и динамическом равновесии с жидкостью из которой он образуется.

Степень сухости

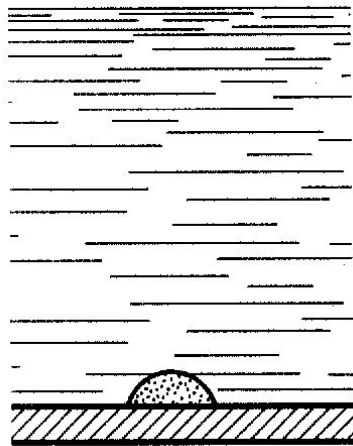
$$x = \frac{m_{\text{сух}}}{m_{\text{ВЛ}}}$$

Температура насыщения **t_s**

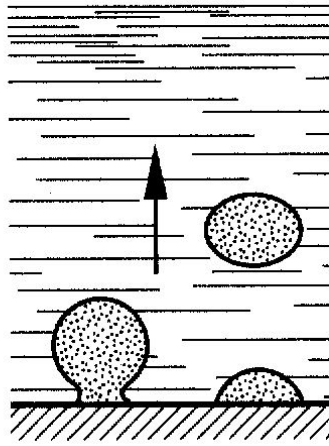
К – критическая точка

А' – тройная точка

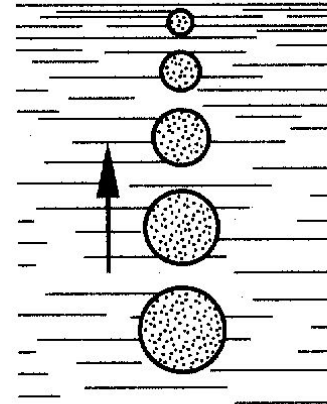
Процесс кипения



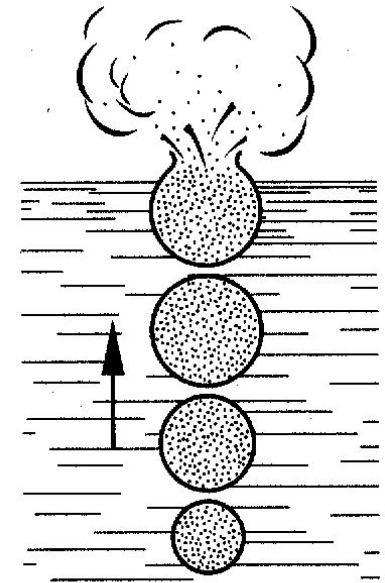
a)



б)



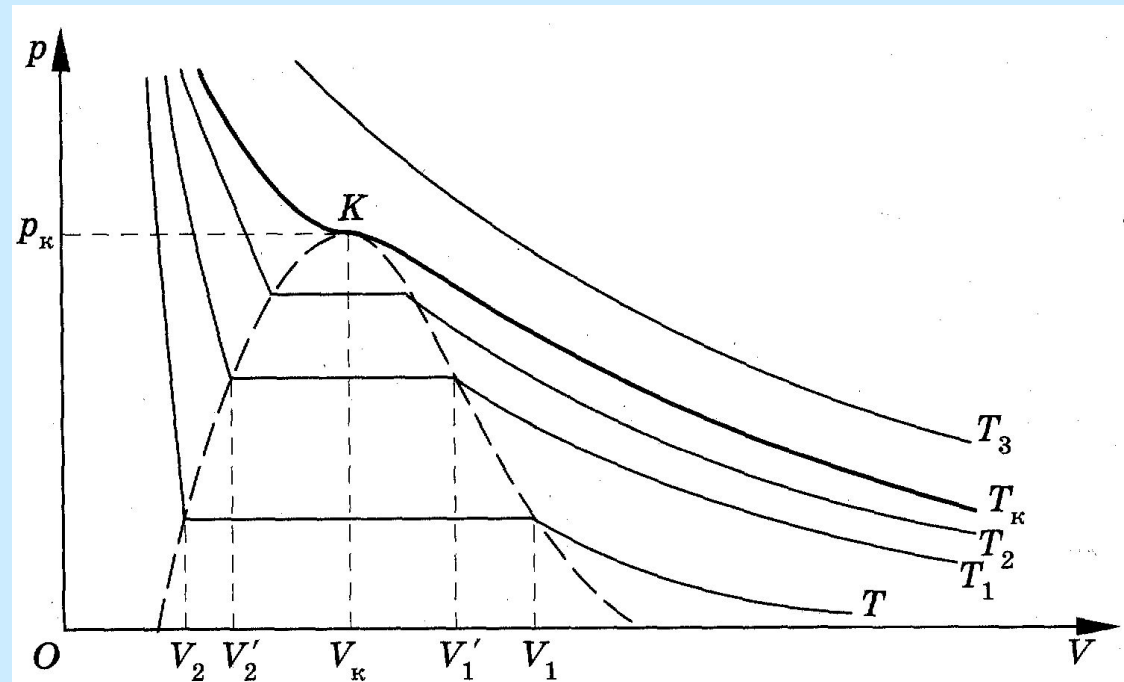
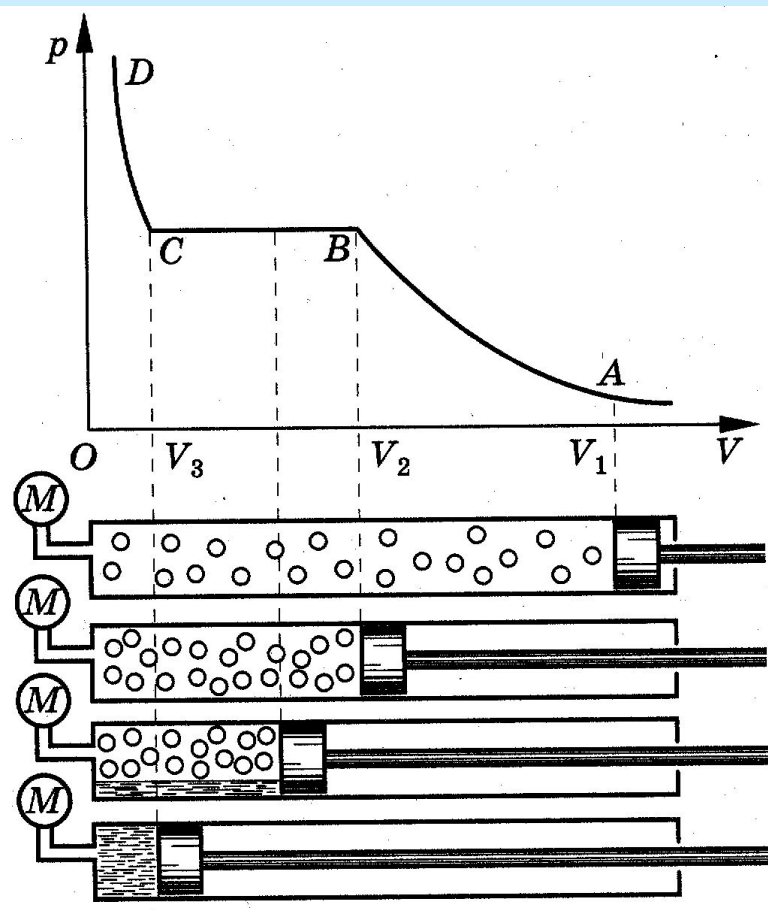
в)



г)

Термодинамические процессы водяного пара

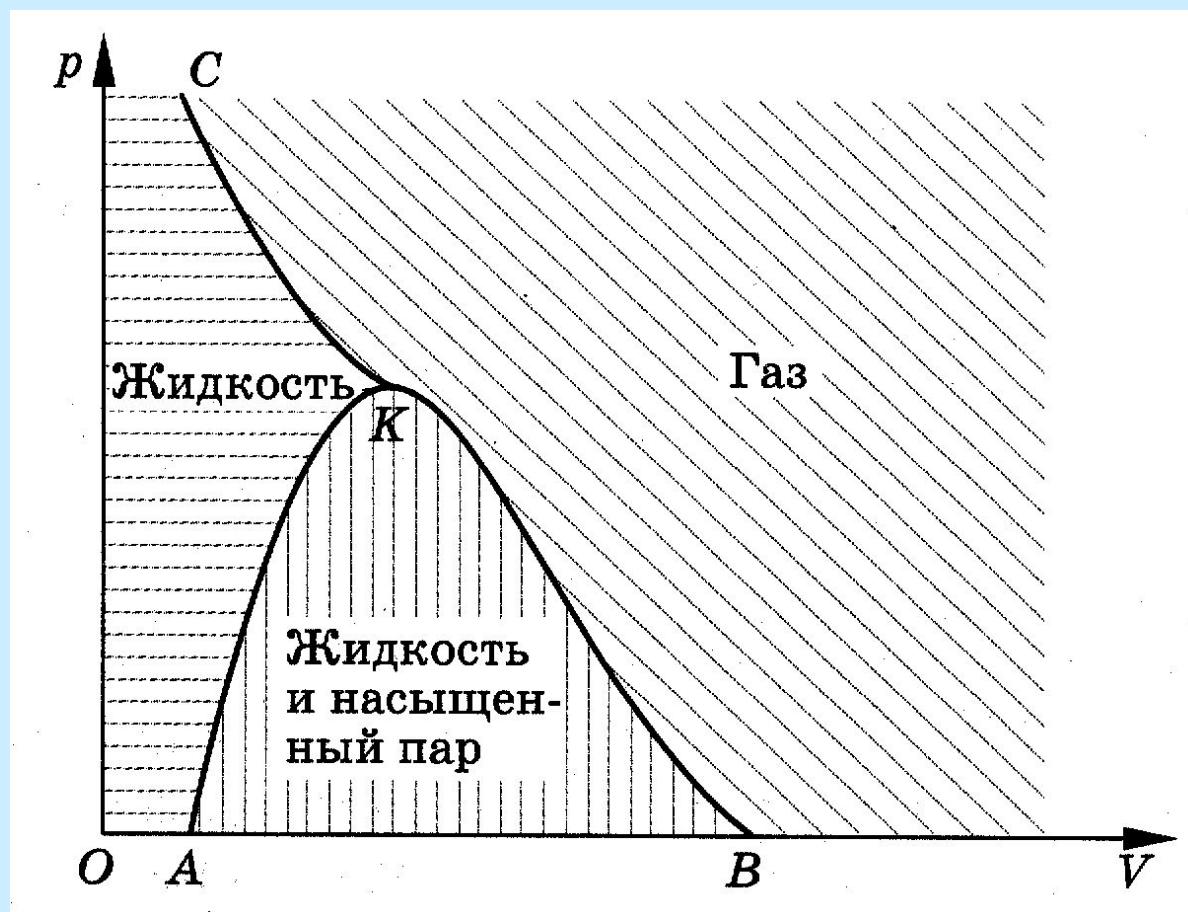
Изотермы водяного пара



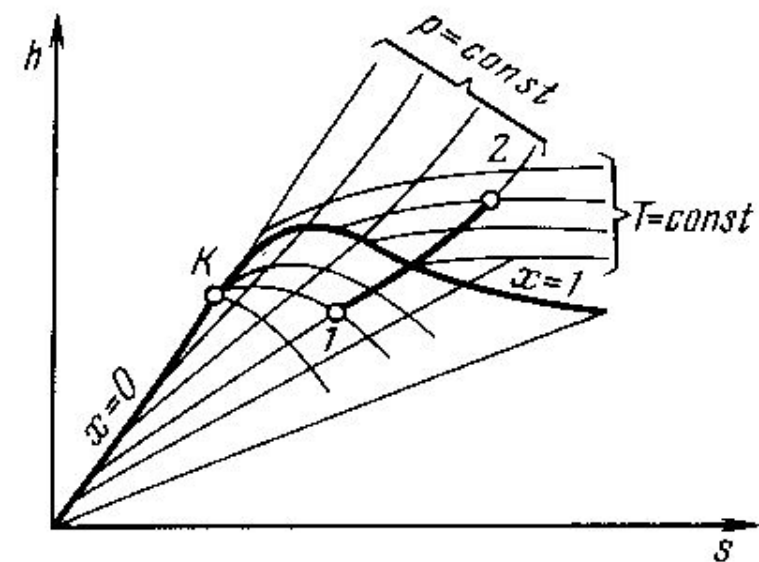
Термодинамические процессы водяного пара

Сублимация(поглощение) Плавление(конденсация)

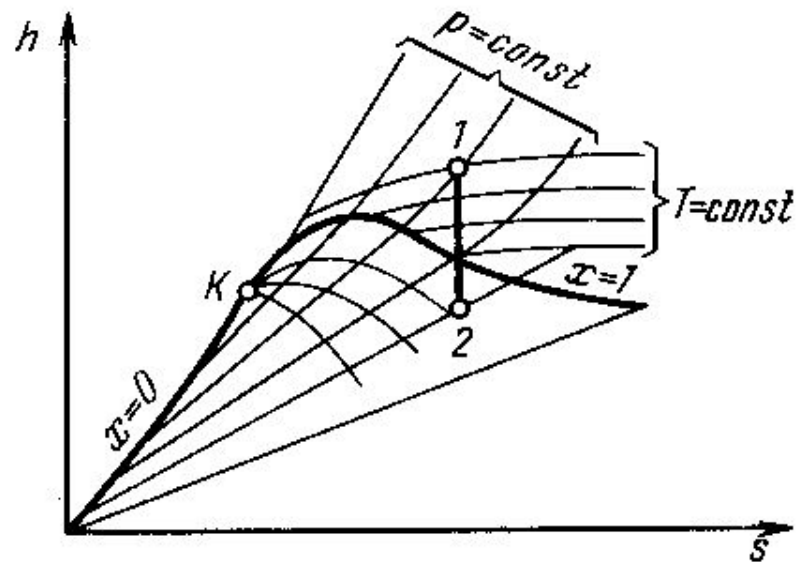
Плавление(затвердевание)



Номограммы термодинамического состояния водяного пара



Изобарный процесс водяного пара



Адиабатный процесс водяного пара

Смеси идеальных газов

Газовая смесь – механическая смесь отдельных компонентов различных газов, химически не реагирующих между собой и близких по свойствам к идеальным газам

Для газовых смесей справедливы следующие положения:

- 1. Каждый газ, входящий в смесь, имеет температуру, равную температуре смеси.**
- 2. Любой из газов, входящих в смесь, распространяется по всему объему смеси, и поэтому объем любого газа равен объему смеси.**

Смеси идеальных газов

- 3. Каждый из газов, входящих в смесь, подчиняется своему уравнению состояния.**
- 4. Смесь в целом является как бы новым газом и подчиняется своему уравнению состояния.**
- 5. Число молей смеси равно сумме молей составляющих компонентов:**
$$v_{\text{см}} = v_1 + v_2 + \dots + v_n$$

Смеси идеальных газов

Закон Дальтона - давление смеси газов, химически не взаимодействующих друг с другом, равно сумме их **парциальных давлений**

Парциальное давление – давление, которое имел бы газ, если бы он один при той же температуре занимал весь объем смеси

$$p = \sum_{i=1}^n p_i$$

Смеси идеальных газов

Для каждого компонента смеси уравнение состояния следует записывать так:

$$p_i V_{\text{см}} = m_i R_i T_{\text{см}}$$

Массовая доля $g_n = \frac{m_n}{m_{\text{см}}}$

Объемная доля $r_n = \frac{V_n}{V_{\text{см}}}$

Влажный воздух

Влажный воздух – смесь сухого воздуха и водяного пара.

сух.в + нас. в.п.

Насыщенный влажный воздух

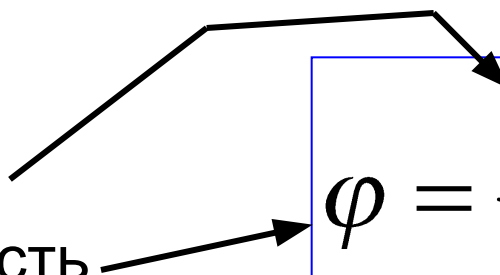
Ненасыщенный влажный воздух

сух.в + пп в.п.

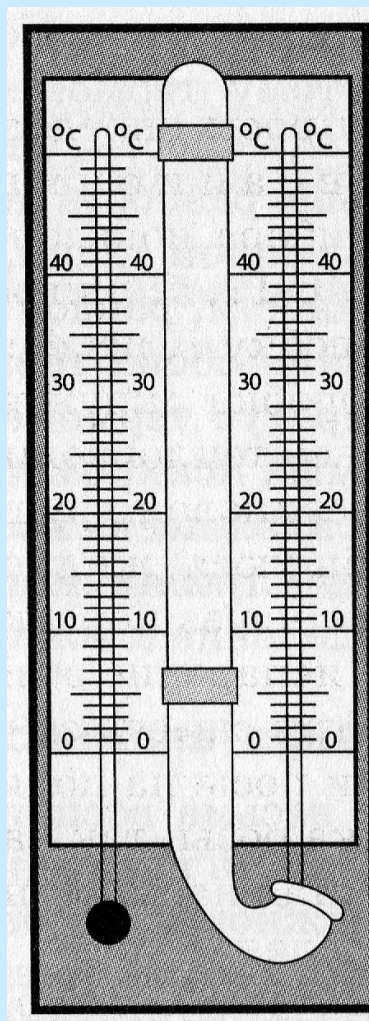
Температура точки росы – температура до которой необходимо охлаждать ненасыщенный влажный воздух, чтобы содержащийся в нем перегретый пар стал насыщенным

Абсолютная влажность

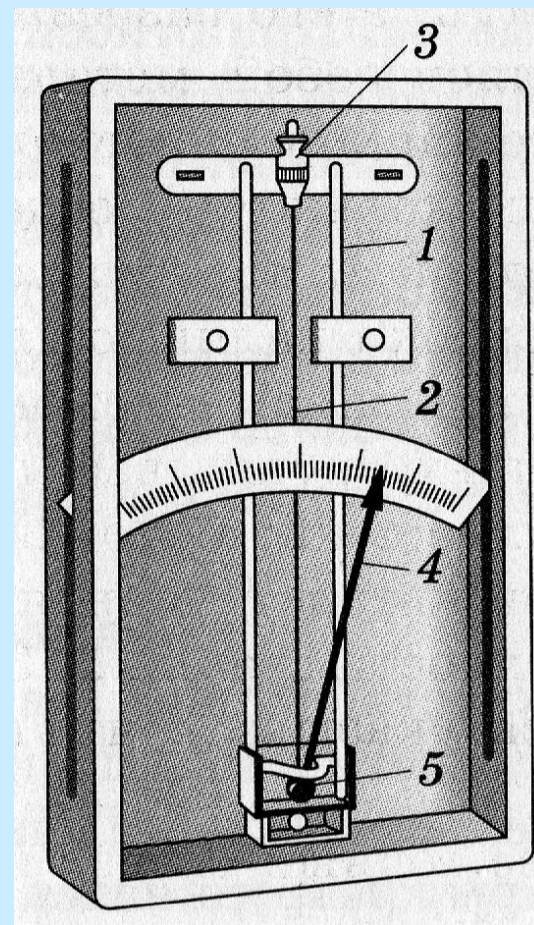
Относительная влажность


$$\varphi = \frac{\rho_{\Pi}}{\rho_s} = \frac{p_{\Pi}}{p_s}$$

Влажный воздух



ПСИХРОМЕТР



ГИГРОМЕТР

Влажный воздух

ВЛАГОСОДЕРЖАНИЕ

$$d = 0,622 \frac{\varphi p_s}{p - \varphi p_s}$$

$$d = \frac{M_{\Pi}}{M_B}$$

Максимальное влагосодержание при $\varphi=1$!

$$d = 0,622 \frac{p_s}{p - p_s}$$

Влажный воздух

Теплоемкость и энтальпия

$$c_p = c_{pv} + dc_{pn}$$

При теплоемкости сухого воздуха 1 кДж/(кг·К) и водяного пара 2 кДж/(кг·К)

$$c_p = 1 + 2d$$

Влажный воздух

Энтальпия

$$i = i_e + di_n$$

При теплоемкости сухого воздуха 1 кДж/(кг·К) и водяного пара 2 кДж/(кг·К), а также с учетом теплоты парообразования 2500 кДж/(кг·К)

$$i = c_{pe}t + (2500 + c_{pn}t)d$$

или

$$i = t + (2500 + 2t)d$$

кДж/кг