

**Котельные установки и
парогенераторы**

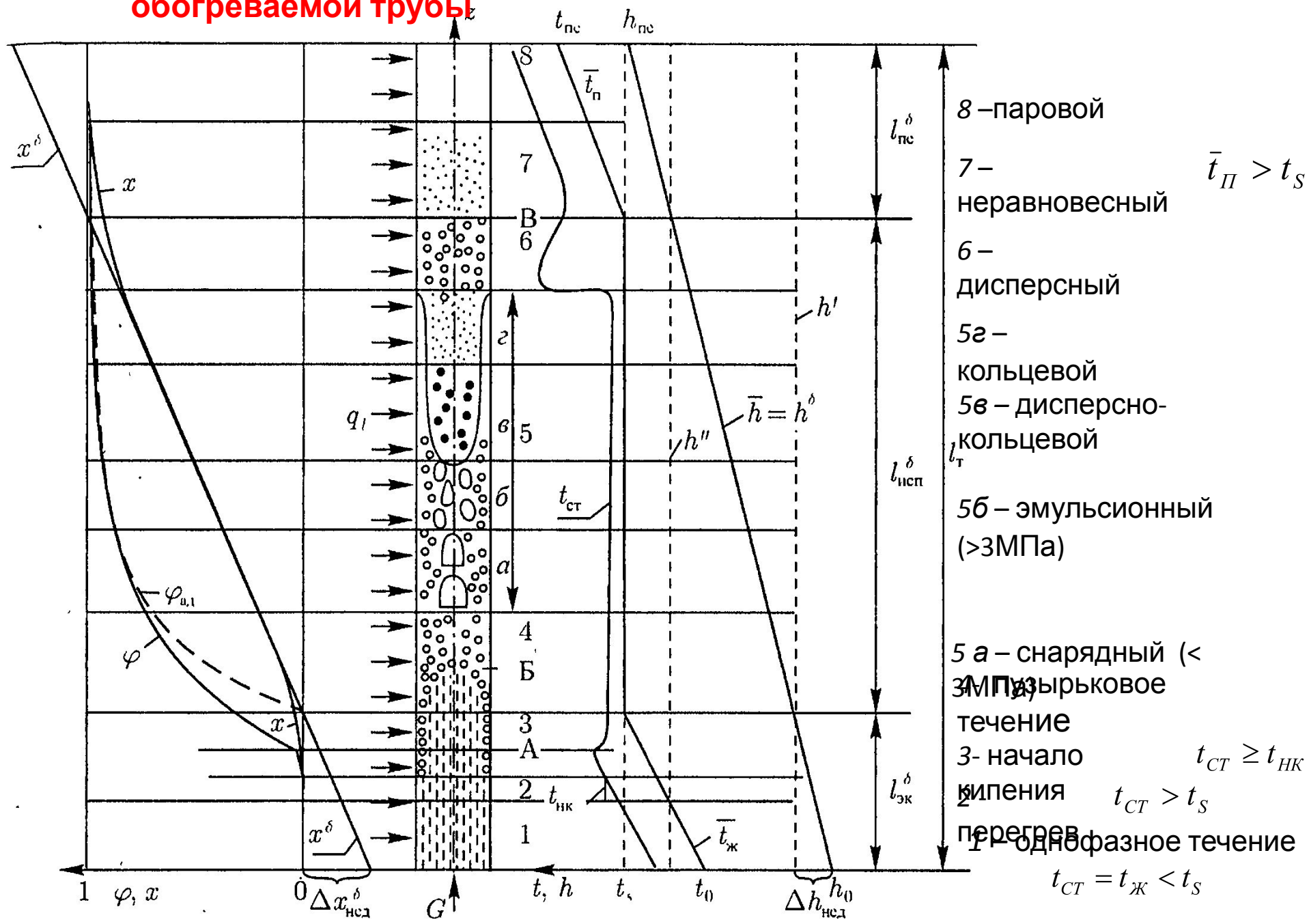
Режимы двухфазных течений в трубах

**Лекция
№3**

Влияние угла наклона трубы

В трубах с углом наклона менее 30° (слабо наклоненные) режимы течения можно принимать аналогично горизонтальным трубам. Для сильно наклоненных труб (более 30°) режимы течения близки к режимам вертикальных труб.

Режимы двухфазного течения вдоль вертикальной обогреваемой трубы



Балансовые соотношения для режимов течения теплоносителя в

вертикальной трубе

Начальные

↓

$$h^{\delta} = \bar{h} = h_0 + \frac{q_l l}{G} \quad \text{- балансовая (средняя) энтальпия потока} \quad (1)$$

$$l_{\text{эк}}^{\delta} + l_{\text{исп}}^{\delta} + l_{\text{пе}}^{\delta} = l_T \quad \text{- общая длина участка нагрева} \quad (2)$$

$$x^{\delta} = (\bar{h} - h')/r \quad \text{- балансовое массовое паросодержание} \quad (3)$$

1,2,3 – однофазное течение

$$(h_0 \leq h'; \bar{t}_ж < t_s; x^{\delta} < 0)$$

жилкости

$$l_{\text{эк}}^{\delta} = l_{\text{г.з}} = G \cdot \Delta h_{\text{нед}} / q_l \quad \text{- длина экономайзерного балансового участка} \quad (4)$$

4,5,6 – испарительные

$$(0 < x^{\delta} < 1)$$

участки

$$l_{\text{исп}}^{\delta} = G(h'' - h')/q_l = Gr/q_l \quad \text{- балансовая длина испарительного участка} \quad (6)$$

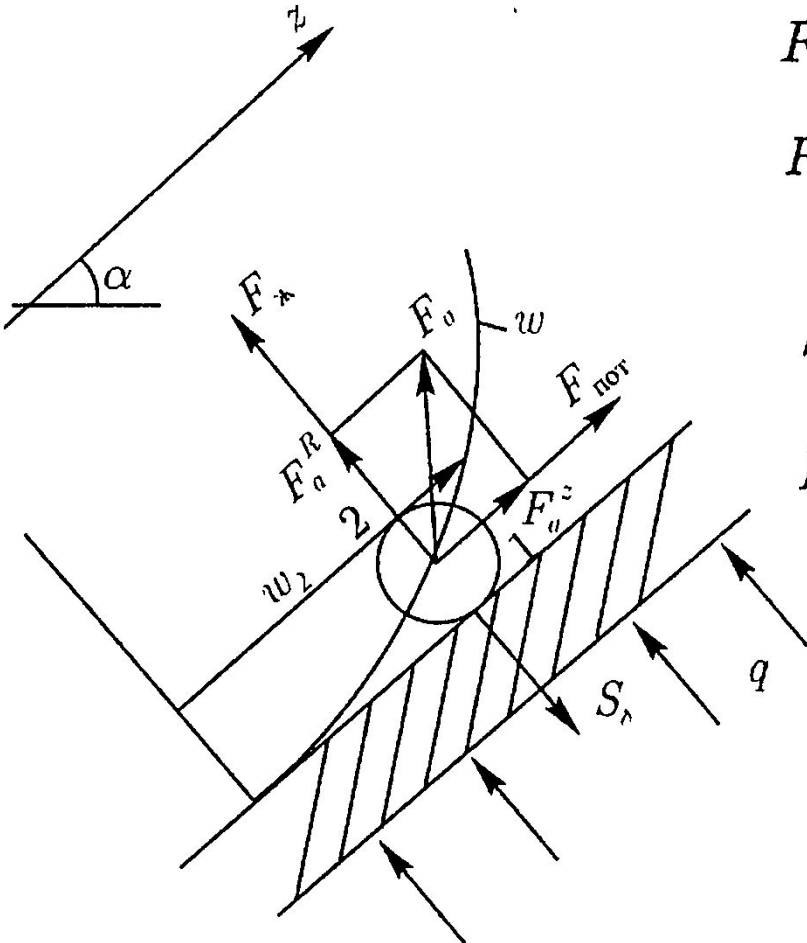
7,8 – участок перегрева

$$(x^{\delta} > 1)$$

пара

$$l_{\text{пе}} = G(h_{\text{пе}} - h''_s)/q_l \quad \text{- балансовая длина перегревательного участка} \quad (7)$$

Силы, действующие на пузырек пара в двухфазном потоке



$$F_{\text{пот}} = \rho' \frac{w^2}{2} \cdot \pi r_{\text{п}}^2 \quad - \text{напор жидкости} \quad (1)$$

$$F_A = g V_{\text{п}} (\rho' - \rho'') \quad - \text{сила} \quad (2)$$

$$(F_A^Z = F_A \cdot \sin \alpha ; F_A^R = F_A \cdot \cos \alpha)$$

$$S_{\text{б}} = \sigma \cdot l_{\text{нат}} \quad - \text{поверхностное натяжение} \quad (3)$$

$$F_{\text{ж}} = a \cdot \Delta p_{\text{ст}} \cdot f_{\text{п}} \quad - \text{аэродинамическая сила} \quad (4)$$

Условие отрыва пузырька от поверхности

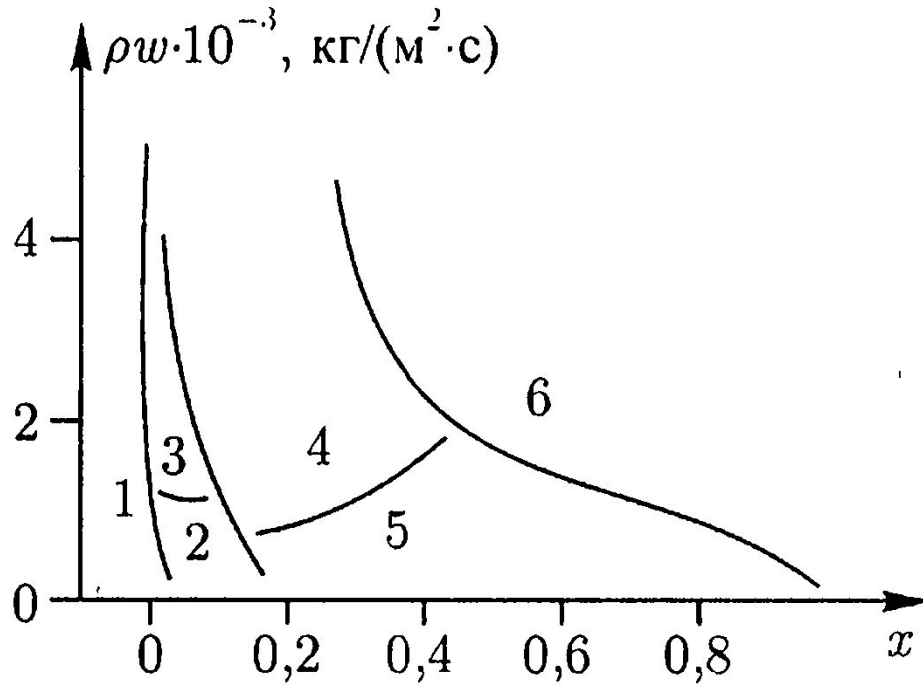
$$F_{\text{ж}}^R = F_A^R > S_{\text{б}} \quad (5)$$

Участок (холодное

кипение,
У стенки : $x^{\text{б}} < 0$,
истинное $\varphi > 0$

Образовавшиеся пузырьки пара поднимаются выше температуры насыщения пристеночного слоя жидкости выносятся в недогретую до температуры насыщения жидкость. До процесса схлопывания вследствие конденсации пара они движутся в недогретой жидкости. Процесс является термодинамически неравновесным.

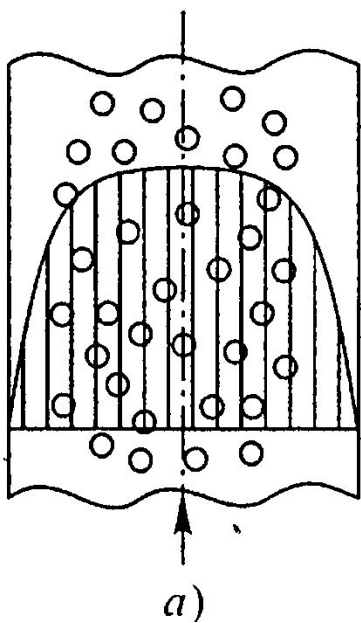
Изменение режимов водного теплоносителя для вертикального двухфазного потока ($p=7\text{МПа}$, $d=12,7\text{ мм}$)



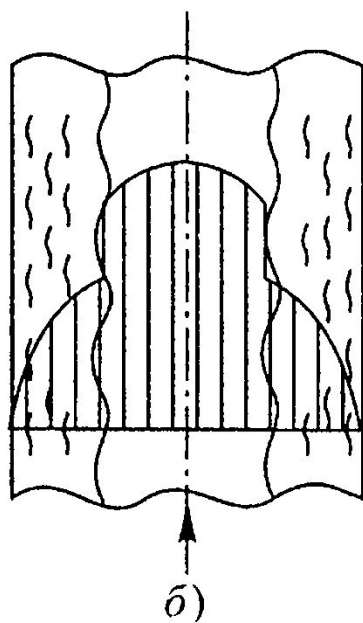
- 1 – пузырьковый режим
- 2 – нарядный
- 3 – эмульсионный
- 4 – дисперсно-кольцевой
- 5 – кольцевой
- 6 – дисперсный

Эпюра скоростей двухфазного потока

Подъемное течение

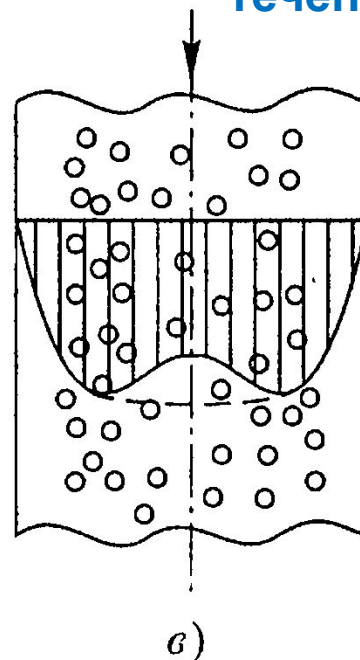


Пузырьковый режим

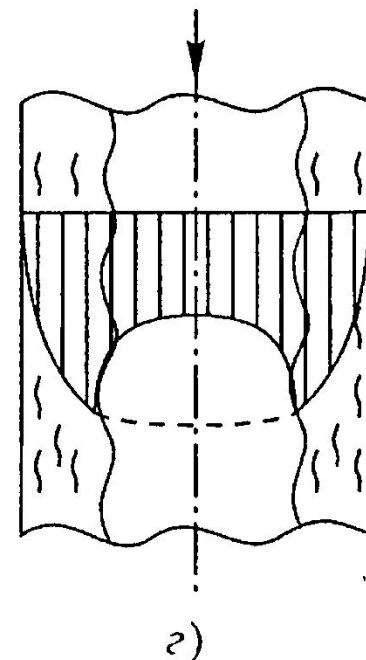


Кольцевой режим

Опускное течение

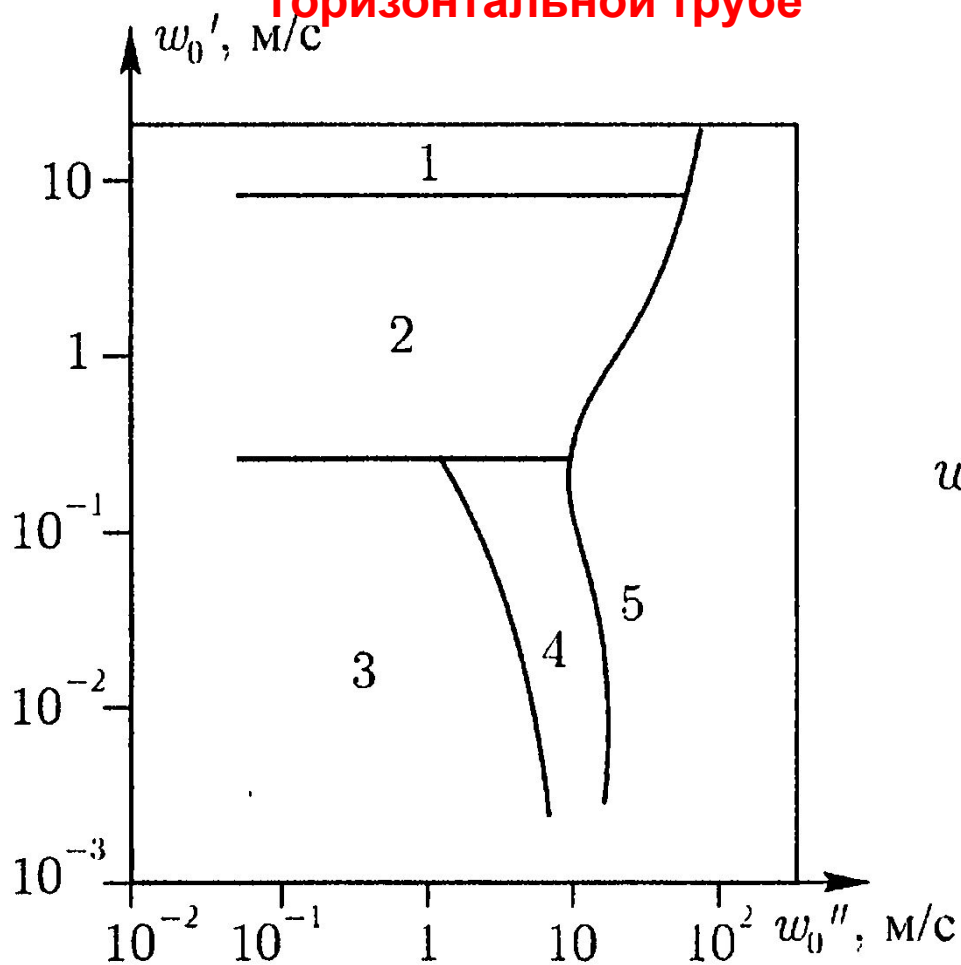


Пузырьковый режим



Кольцевой режим

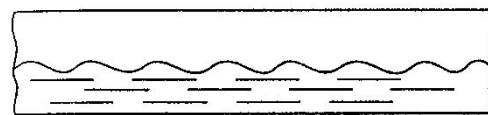
Карта режимов двухфазного потока в горизонтальной трубе



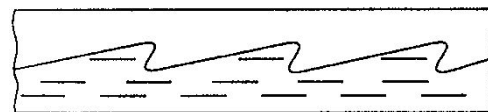
- 1 – пузырьковый
 - 2 – снарядный
 - 3 - расслоенный (слоистый)
 - 4 – волновой
 - 5 – кольцевой
- w_0' и w_0'' - приведенные скорости

Виды слоистого течения

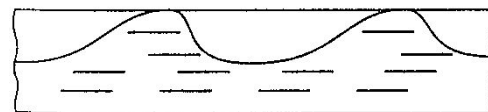
(малые значения числа Фруда)



СЛОИСТЫЙ



ВОЛНОВОЙ



поршневой

$$F_r = \frac{W^2}{g \cdot d_{BH}}$$

- критерий Фруда
(отношение сил инерции и Архимеда)

Сопротивление при движении потока теплоносителя в трубе

Однофазный

$$\Delta p = \Delta p_{\text{тр}} + \Delta p_{\text{м}} + \Delta p_{\text{уск}} + \Delta p_{\text{нив}}. \quad (1)$$

$$\Delta p_{\text{тр}} = \lambda \frac{l}{d} \cdot \frac{(\rho w) w_{\text{ср}}}{2} \quad \Delta p_{\text{м}} = \zeta_{\text{м}} \cdot \frac{(\rho w) w_{\text{ср}}}{2} \quad \Delta p_{\text{уск}} = \rho w (w_2 - w_1) \quad \Delta p_{\text{нив}} = l g \rho_{\text{ср}} \sin \alpha$$

Двухфазный

$$\Delta p = \Delta p_{\text{тр}} + \Delta p_{\text{м}} + \Delta p_{\text{уск}} + \Delta p_{\text{нив}}. \quad (2)$$

За основу расчетов $\Delta P_{\text{ТР}}$ и $\Delta P_{\text{М}}$ принимается гомогенная модель, затем вводятся экспериментальные поправки, учитывающие истинные параметры.

$$\Delta p_{\text{тр}}^{\text{гом}} = \lambda \frac{l}{d} \rho' \frac{w_0^2}{2} \left(1 - x + x \frac{\rho'}{\rho''} \right) = \lambda \frac{l}{d} \frac{\rho' w_0^2}{2} \left(1 + x \left(\frac{\rho'}{\rho''} - 1 \right) \right). \quad (3)$$

$$\Delta p_{\text{м}} = \zeta_{\text{м}}' \cdot \frac{\rho' w_0^2}{2} \left(1 + x \left(\frac{\rho'}{\rho''} - 1 \right) \right) \quad (4)$$

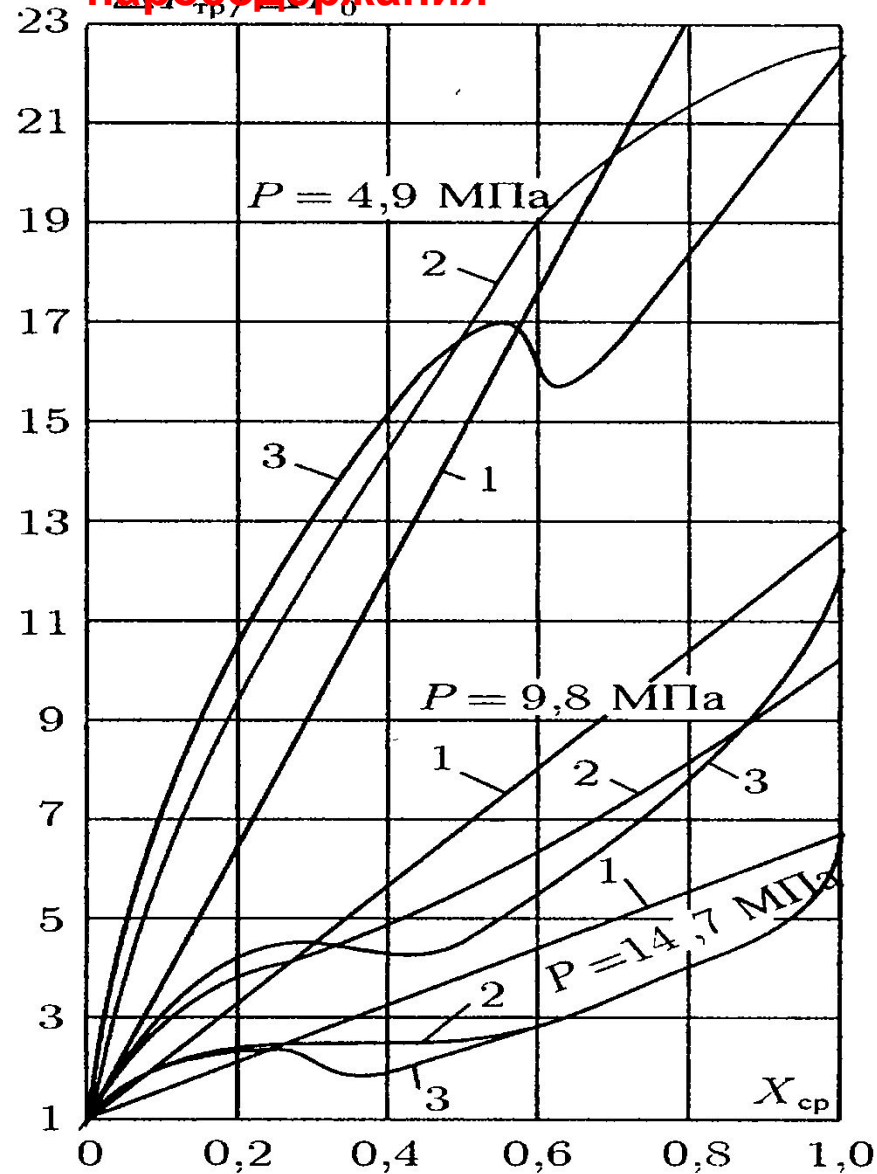
$$\Delta p_{\text{уск}} = (\rho w)^2 (v'' - v') (x_{\text{к}} - x_{\text{н}}) \quad (5)$$

$$\Delta p_{\text{нив}} = (\rho' - \bar{\varphi}(\rho' - \rho'')) g l \sin \alpha. \quad (6)$$

$$\Delta p_{\text{нив}} = \pm (\rho' - \bar{\varphi}(\rho' - \rho'')) g H \quad \text{- вертикальная труба} \quad (6a)$$

(«+» - подъемное течение; «-» - опускное течение)

Сопротивление пароводяного потока в зависимости от среднего паросодержания



1 – ГОМОГЕННЫЙ ПОТОК;
2 – без обогрева; 3 – с

Адиабатный поток:

$$\frac{\Delta p_{\text{тр}}^{\text{ГОМ}}}{\Delta p_0} = 1 + x \left(\frac{\rho'}{\rho''} - 1 \right) \quad (1)$$

$$\Delta p_0 = \lambda \frac{l}{d} \frac{\rho' w_0^2}{2} \quad (x=0)$$

С обогревом потока:

$$\frac{\Delta p_{\text{тр}}^{\text{ГОМ}}}{\Delta p_0} = 1 + \bar{x} \left(\frac{\rho'}{\rho''} - 1 \right). \quad (2)$$

$$\bar{x} = (x_1 + x_2) / 2$$

Постоянное паросодержание:

$$\Delta p_{\text{тр}} = \lambda \frac{l}{d} \cdot \frac{\rho' w_0^2}{2} \left(1 + \psi x \left(\frac{\rho'}{\rho''} - 1 \right) \right) \quad (3)$$

Переменное паросодержание:

$$\Delta p_{\text{тр}} = \lambda \frac{l}{d} \cdot \frac{\rho' w_0^2}{2} \left(1 + \bar{\psi} \bar{x} \left(\frac{\rho'}{\rho''} - 1 \right) \right) \quad (4)$$

$$\bar{\psi} = \frac{\psi_{\text{к}} x_{\text{к}} - \psi_{\text{н}} x_{\text{н}}}{x_{\text{к}} - x_{\text{н}}}$$

**Спасибо за
внимание**