

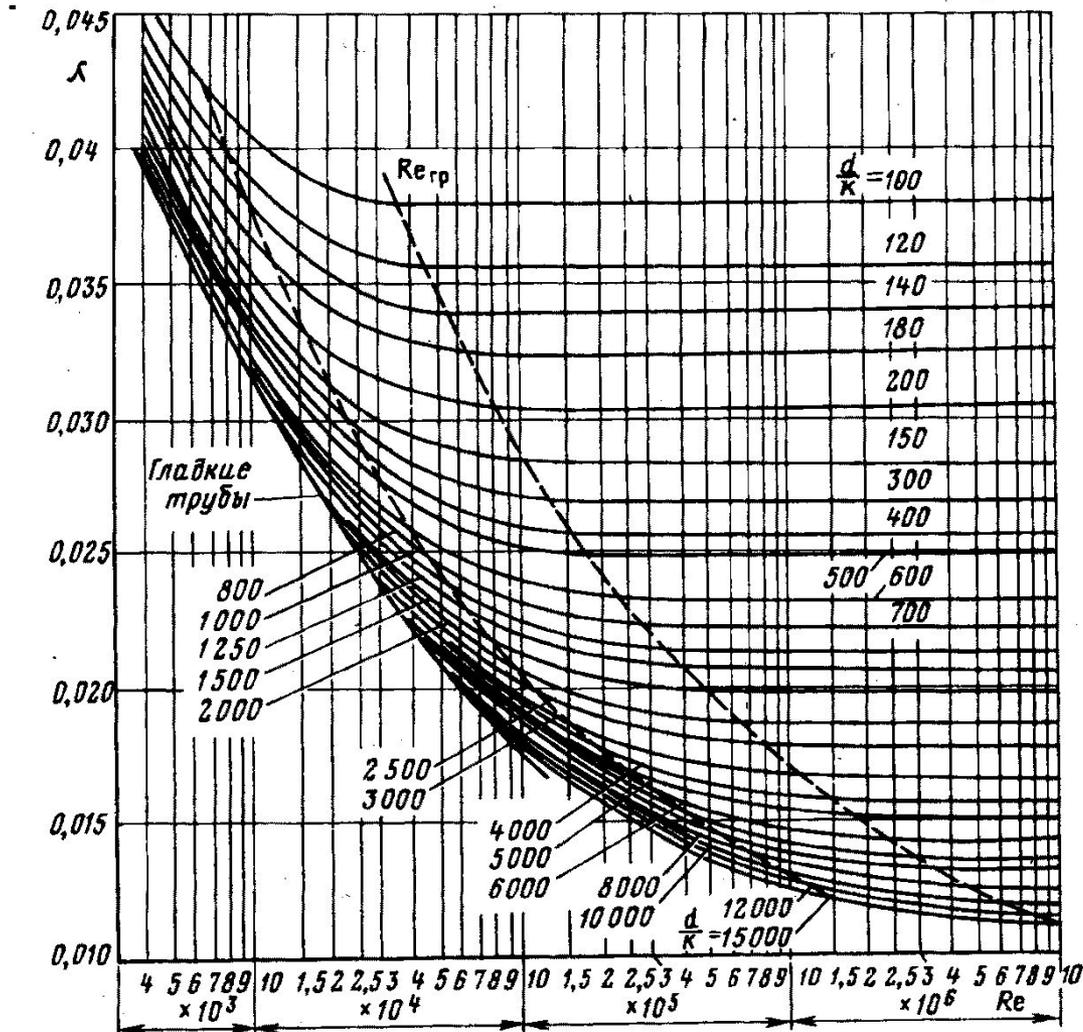
Эквивалентный диаметр равен внутреннему диаметру трубы

$$d_{\text{экв}} = \frac{4F}{P} = \frac{4\pi d^2}{4\pi d} = d$$

Сопротивления трубных элементов

$$\Delta p_{\text{эл}} = \Delta p_{\text{тр}} + \Delta p_{\text{м}} + \Delta p_{\text{уск}} \pm \Delta p_{\text{нив}} + \Delta p_{\text{ур}}$$

Течение жидкости в трубах, в подавляющем числе случаев, происходит в автомодельной области, при $Re > 10^5$



Уход из автомодельной области происходит редко:

- в котлах с ЕЦ при скоростях потока менее 0,1 м/с;
- в прямоточных котлах при температуре меньше 150 °С в трубах малого диаметра при скоростях меньше 2 м/с.

Потери давления за счёт

трения

$$\Delta p_{mp} = \lambda_0 l \frac{(\rho w)}{2\rho}, \quad \text{Па} \qquad \Delta p_{mp} = \lambda_0 l \frac{(\rho w)^2}{2\rho g}, \quad \frac{\text{КГС/М}}{2}$$

$\lambda_0 = \lambda / d$ приведенный коэффициент трения,
1/м

Коэффициент трения по формуле

Никурадзе

$$\lambda = \frac{1}{4 \left(\lg 3.7 \frac{d}{k} \right)^2}$$

d – внутренний диаметр трубы, мм; k – абсолютная шероховатость трубы, мм.

Для перлитных сталей $k=0,08$ мм, для аустенитных $k =0,01$ мм, см. п. 2-37 [1].

Отношение d/k называется относительной шероховатостью труб.

Потери давления за счёт местных сопротивлений

$$\Delta p_m = \sum \zeta_m \frac{(\rho w)^2}{2\rho g} \left[\text{кг} / \text{м}^2 \right]$$

Рекомендации по выбору ζ_m приведены в параграфе Г второй главы норм гидравлического расчёта [1].

рисунки!

Потери на трение и местные сопротивления могут считаться вместе по средней плотности среды если она изменяется не слишком сильно. В этом случае они записываются через коэффициент полного сопротивления

$$z = \lambda_0 l + \sum \zeta_m$$

$$\Delta p = \Delta p_{mp} + \Delta p_m = z \frac{(\rho w)^2}{2\rho g} \text{ кг/м}^2$$

При движении пароводяной смеси по обогреваемым трубам плотность непрерывно меняется, это создаёт потери давления от конвективного ускорения

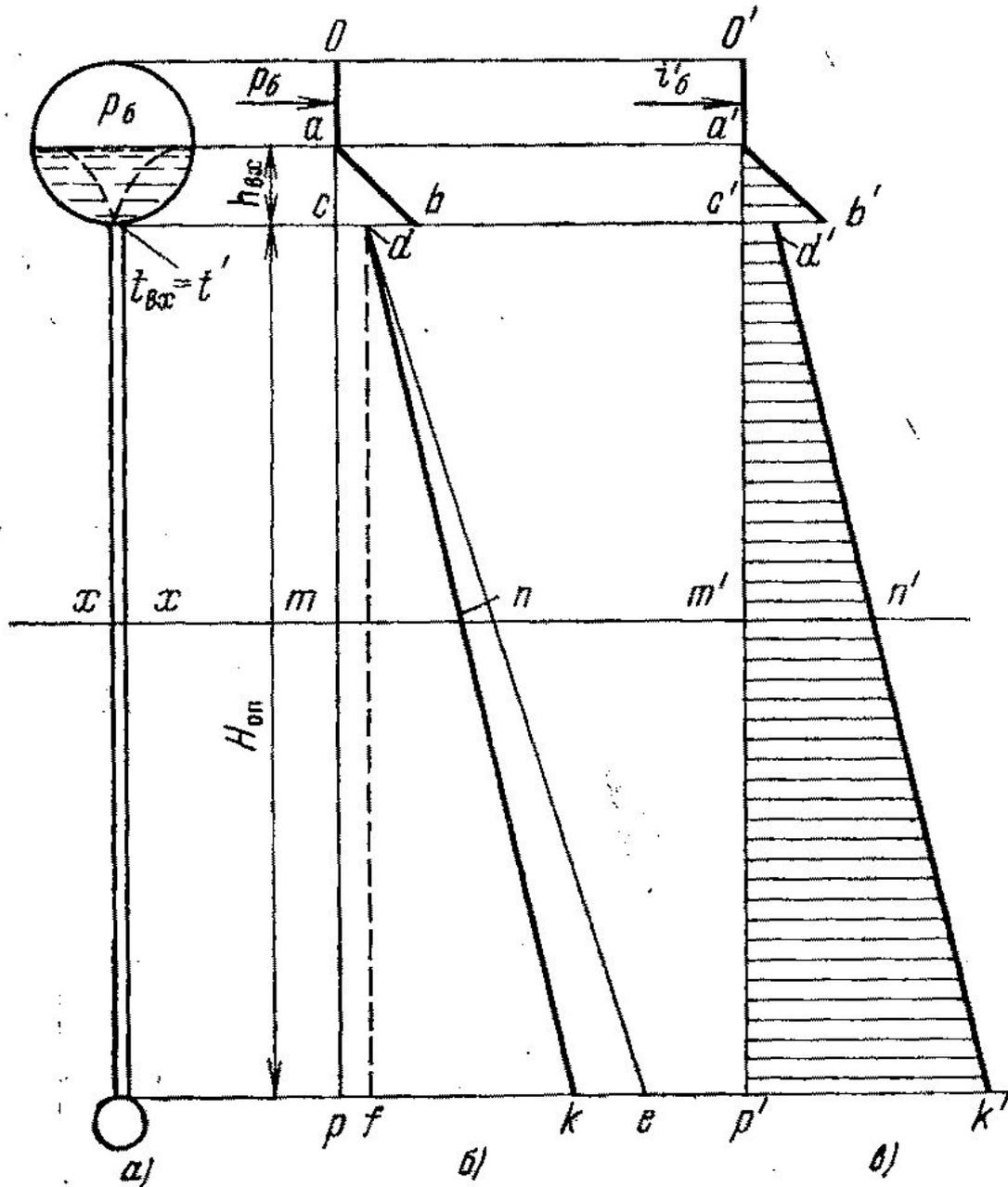
$$\Delta p_{\text{уск}} = (\rho w)(w_2 - w_1) = (\rho w)^2 \left(\frac{1}{\rho_2} - \frac{1}{\rho_1} \right)$$

w_2, w_1, ρ_2, ρ_1 – соответственно скорости и плотности на выходе и входе в элемент.

Нормативный метод /1/ рекомендует подсчитывать потери на ускорение только при сверхкритических параметрах и высоких тепловых нагрузках.

В целом, они могут вносить **до 10%** в итоговое изменение давления при расчёте контура циркуляции или пароперегревателя.

Нивелирное изменение давления /

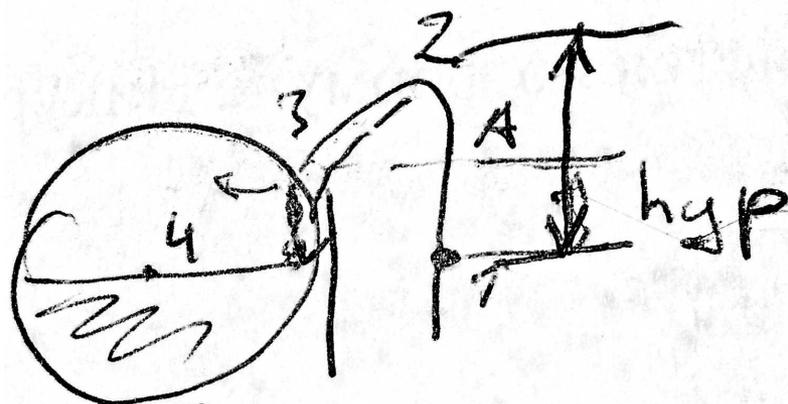


$$\Delta p_{нив} = \pm \bar{\rho} g h_{ивс} \text{ Па}$$

$$\Delta p_{нив} = \pm \bar{\rho} h_{ивс} \text{ кг/м}^2$$

В котлах с естественной циркуляцией ввод пароводяной смеси нередко происходит над уровнем воды в барабане. Необходимый напор для преодоления этого сопротивления записывают в виде

$$\Delta p_{ур} = h_{пр} g (\rho_a' - \rho'') (1 - \phi_{вых}),$$



вода поступает
самосекаш

Двухфазная среда

Потери давления за счёт трения для гомогенной среды

с постоянной плотностью

$$\Delta p_{тр}^{гом} = \lambda_0 l \frac{(\rho w)^2}{2\rho_{см} \cdot g} \text{ кг/м}^2$$

$$v_{см} = \frac{1}{\rho_{см}} = xv'' + (1-x)v' = \frac{x}{\rho''} + (1-x)\frac{1}{\rho'} = \frac{1}{\rho'} \left(x \frac{\rho'}{\rho''} + 1 - x \right) = \frac{1}{\rho'} \left(1 + x \left(\frac{\rho'}{\rho''} - 1 \right) \right)$$

$$\Delta p_{тр}^{гом} = \lambda_0 l \frac{(\rho w)^2}{2\rho' \cdot g} \left(\text{кг/м} \left(\frac{\rho'}{\rho''} - 1 \right) \right), \quad 2$$

Двухфазная среда

Потери давления за счёт трения неомогенной среды

для необогреваемых

труб

$$\Delta p_{тр}^{см} = \lambda_0 l \frac{(\rho w)^2}{2\rho' \cdot g} \left(\frac{\rho'}{\rho''} - 1 \right), \quad 2$$

для обогреваемых

труб

$$\Delta p_{тр}^{см} = \lambda_0 l \frac{(\rho w)^2}{2\rho' \cdot g} \left(\frac{\rho'}{\rho''} - 1 \right), \quad 2$$

$$\bar{\psi} = \frac{\psi_2 \cdot x_2 - \psi_1 \cdot x_1}{x_2 - x_1}$$

ψ_2, ψ_1 – значения ψ в конце и начале участка

Потери давления за счёт местных сопротивлений

$$\Delta p_m^{см} = \sum \zeta'_m \frac{(\rho w)^2}{2\rho' \cdot g} \left(1 + x \left(\frac{\rho'}{\rho''} - 1 \right) \right), \quad 2$$

ζ'_m – коэффициент местных потерь при движении пароводяной смеси, определяется по п. 2-50–2-55 [1]. Как правило, ζ'_m больше (до нескольких раз), чем ζ для однофазной жидкости.

Расчёт гидравлических сопротивлений сложных систем

Последовательное
соединение

$$\Delta p_{нар} = \Delta p_i = z_i \cdot \frac{(\rho \omega_i)^2}{2 \rho_i g}$$

$$G_{нар} = \sum G_i \quad \rho \omega_F = \frac{\sum_i G_i}{\sum_i F_i} = \frac{G}{F}$$

$$\Delta p_{нар} = f(z_n, \rho \omega_F)?$$

Расчёт гидравлических сопротивлений сложных систем

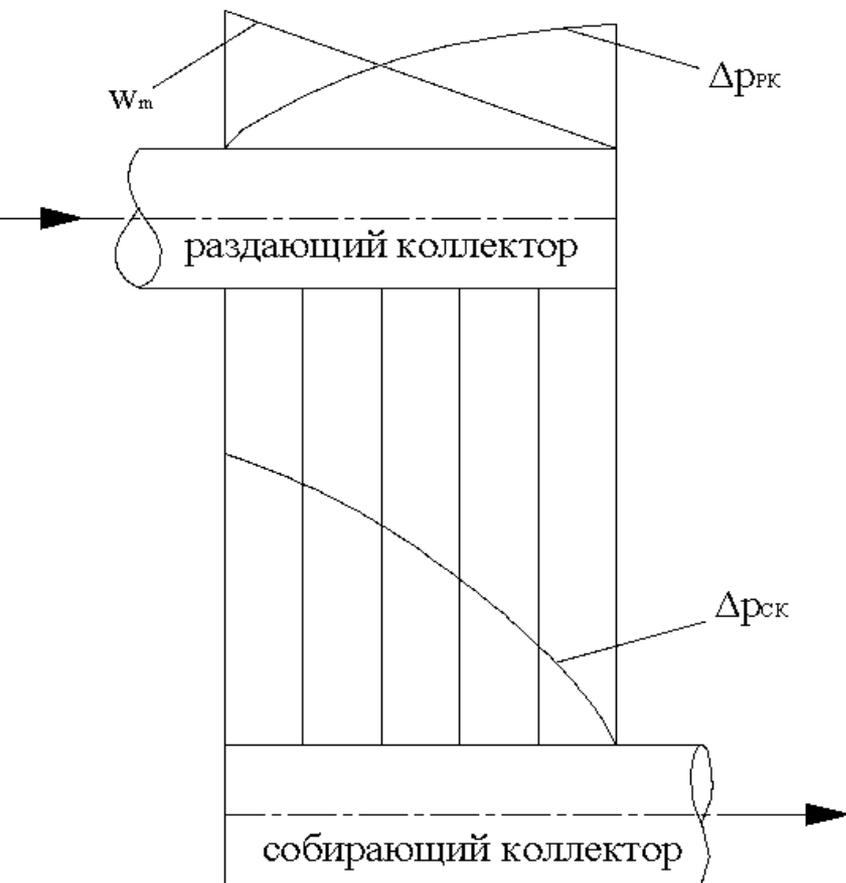
Параллельное
соединение

$$\Delta p_{\text{посл}} = \sum_i z_i \cdot \frac{(\rho \omega_i)^2}{2 \rho_i g}$$

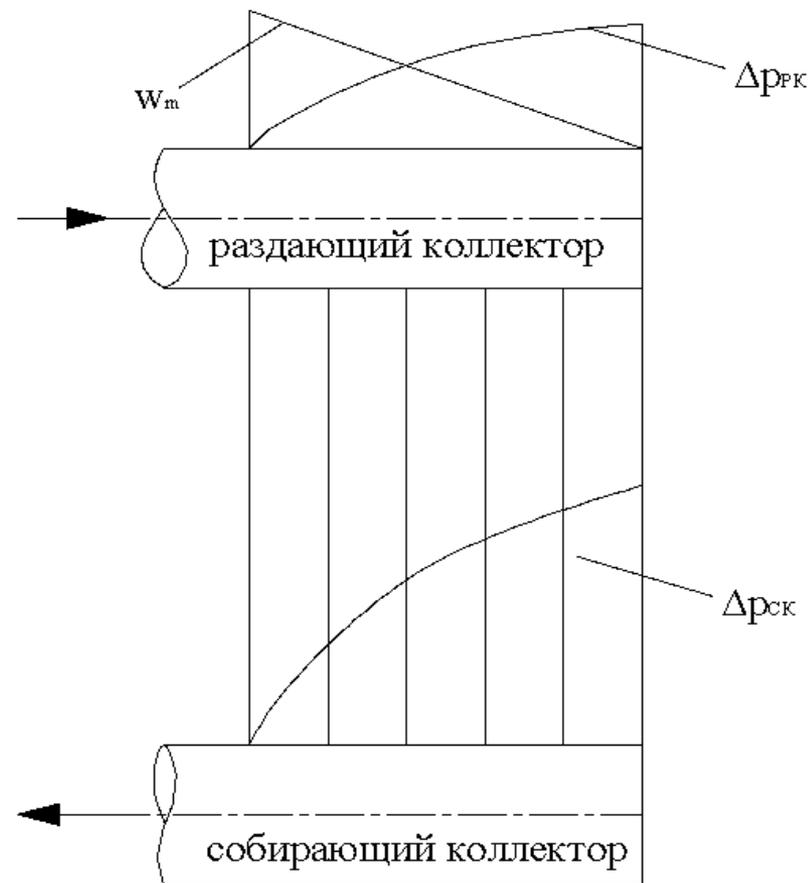
$$\rho \omega = \frac{G}{f} \quad \rho \omega_i F_i = \rho \omega_n F_n \quad \rho \omega_i = \rho \omega_n \frac{F_n}{F_i}$$

$$\Delta p_{\text{посл}} = f(z_{\text{зв}}, \rho \omega_n)?$$

Гидравлические сопротивления коллекторов



а) Схема Z.



б) Схема II.

Гидравлические сопротивления коллекторов

Изменение скорости в коллекторе можно представить в виде линейной зависимости от длины коллектора

$$\rho w = \rho w_x^{\text{макс}} \left(1 - \frac{x}{l} \right)$$

где l – длина активной зоны коллектора, x – длина, откладываемая от начала координат в сечении с максимальной (раздающий коллектор) или нулевой (собирающий коллектор) скоростью, до текущего сечения коллектора.

Гидравлические сопротивления коллекторов

Зависимость давления вдоль длины активной зоны
коллектора

$$\Delta p_x = \Delta p_k \left(1 - \left(\frac{\rho w_x}{\rho w_{\text{макс}}} \right)^2 \right)$$

Среднее изменение давления в
коллекторе

$$\Delta p_{cp} = \frac{1}{l} \int_0^l \Delta p_x dx$$

Гидравлические сопротивления коллекторов

Среднее изменение давления в коллекторе

$$\Delta p_{cp} = \frac{2}{3} \Delta p_k$$

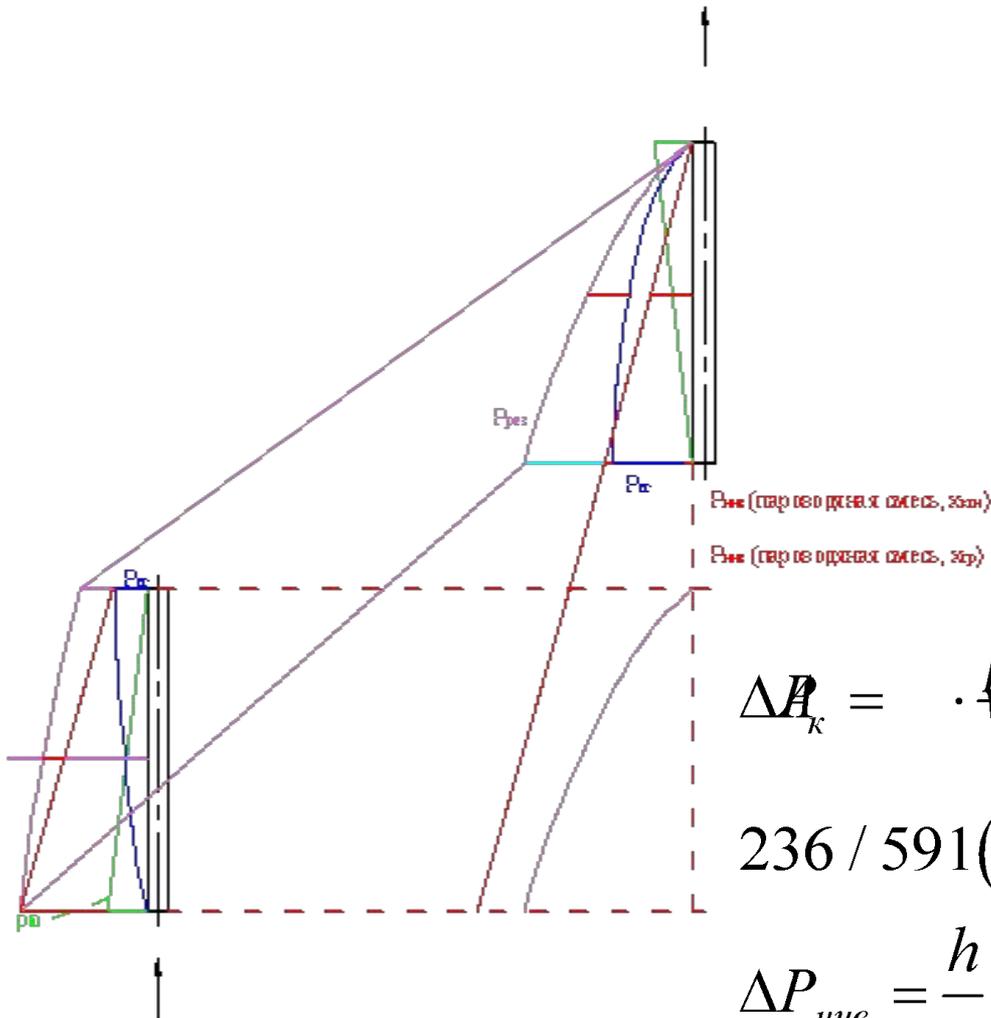
Максимальное изменение давления в коллекторе

$$\Delta p_k = A \frac{(\rho w)^2}{2\rho g} \text{ кг/м}^2$$

Здесь A – коэффициент, учитывающий потери в коллекторе, принимается по п. 2-60 [1].

Перепад давления между
коллекторами

$$\Delta p = (p_1 + \Delta p_{PK}) - (p_2 + \Delta p_{CK}) = (p_1 - p_2) + (\Delta p_{PK} - \Delta p_{CK})$$



$$\Delta P_k = \frac{\rho w^2}{2g} = 0.8 \cdot \frac{2246.4^2}{2 \cdot 9.81} \cdot 0.0015 =$$

$$236 / 591 (PK / CK), \quad \text{кгс} / \text{м}^2$$

$$\Delta P_{нуб} = \frac{h}{v} = \frac{1.015}{0.0015} = 676 / 645, \quad \text{кгс} / \text{м}^2$$