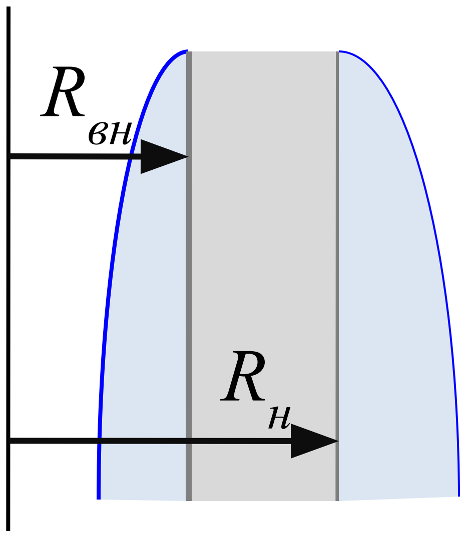
Конденсация на вертикальной трубе



Если толщина пленки жидкости мала по сравнению с радиусом трубы, то можно пользоваться формулами для вертикальной плоскости!

В общем случае кривизну стенки надо учитывать

Профиль скорости для ламинарного течения:

$$w_x(r,x) = \frac{\rho g R^2}{4\mu}\left[1 - \left(\frac{r}{R}\right)^2 + 2\frac{R \pm \delta(x)}{R}\ln\frac{r}{R}\right]$$

Знак «+» – для наружной поверхности, знак «– » – для внутренней, R – радиус стенки, на которой происходит конденсация.

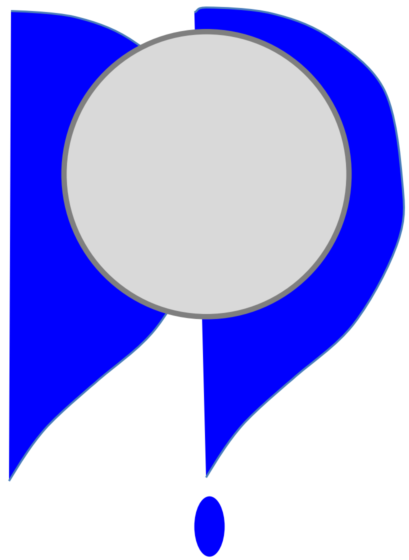
Уравнение для толщины пленки: $$\pm\sqrt{\frac{4\lambda'\mu'\Delta T x}{\rho'^2 g r}} = \Delta^2 \ln\frac{\Delta}{R} + \frac{R^2 - \Delta^2}{2}$$

$$\Delta = R \pm \delta$$

Коэффициент теплоотдачи: $$\bar{\alpha} = \left(1 \mp \frac{\delta(h)}{2R}\right)\bar{\alpha}_{Nu}$$

На наружной поверхности трубы коэффициент теплоотдачи меньше, чем на плоской стенке, на внутренней – больше.

Конденсация на горизонтальной трубе



При конденсации на наклонной плоскости и ламинарном течении жидкости ускорение свободного падения заменяется его проекцией на эту плоскость.

$$\bar{\alpha} = \bar{\alpha}_{Nu} \sqrt[4]{\cos\varphi}$$

φ – угол между плоскостью и вертикалью

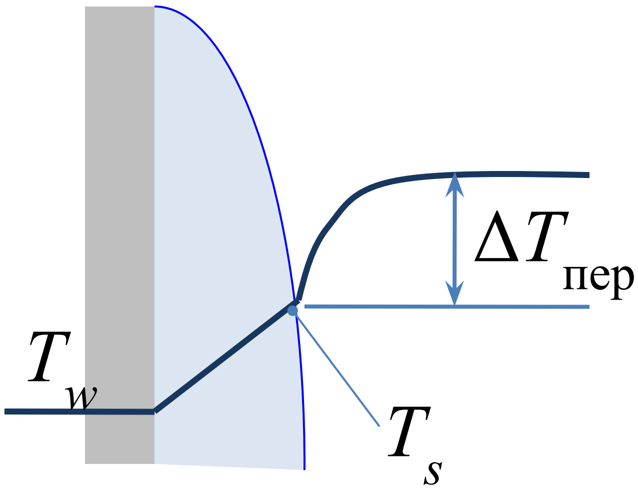
Для криволинейной поверхности угол φ является переменным, поэтому формулу для среднего коэффициента теплоотдачи можно получить с помощью интегрирования. Если толщина пленки мала по сравнению с диаметром трубы, то

$$\bar{\alpha} = 0,728\left(\frac{\lambda'^3 r g \rho'^2}{\mu' \Delta T d}\right)^{1/4}$$

Волны на межфазной поверхности возникают при $d > 20\sqrt{\sigma/\rho' g}$

Турбулентный режим возможен только на трубах очень большого диаметра и на практике почти не встречается.

Конденсация перегретого и влажного пара



Если температура пара выше температуры насыщения, то к поверхности жидкости из пара подводится тепло:

$$q' = q'' + jr$$

Конденсирующийся пар необходимо охладить до температуры насыщения, кроме того, часть пара не конденсируется:

$$q'' = q_1 + q_2 \qquad\qquad q_1 = C''_p \Delta T_{пер} \quad j$$

Поэтому вместо теплоты парообразования надо подставлять эффективную величину, учитывающую тепловой поток в паре.

$$q' = jr_{эф} = j\left(r + C''_p \Delta T_{пер}\right) + q_2 \;\Longrightarrow\; r_{эф} = \frac{r + C''_p \Delta T_{пер}}{1-\beta}, \quad \beta = \frac{q_2}{q'}$$

При конденсации влажного пара нужно отвести меньше тепла, так как энтальпия влажного пара меньше, чем насыщенного пара.

От пара нужно отвести тепло, равное разности энтальпий пара и жидкости.

Степень сухости $x = \dfrac{h - h'}{r} \;\Longrightarrow\; r_{эф} = rx$

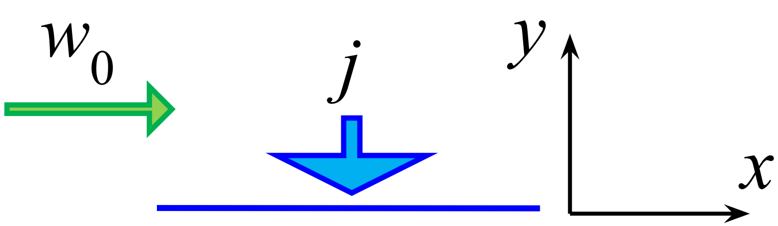
Конденсация движущегося пара

Движение пара приводит к касательному напряжению на границе раздела фаз, т. е. на жидкость действует дополнительная сила. Меняется граничное условие для скорости на поверхности раздела фаз:

$$\mu' \frac{\partial w'_x}{\partial y} = \mu'' \frac{\partial w''_x}{\partial y}$$

Влияние конденсации на течение пара

Толщина пленки мала → Можно пренебречь кривизной межфазной поверхности



$$w_x \frac{\partial w_x}{\partial x} + w_y \frac{\partial w_x}{\partial y} = \nu \frac{\partial^2 w_x}{\partial y} \qquad \frac{\partial w_x}{\partial x} + \frac{\partial w_y}{\partial y} = 0$$

Граничные условия:

$$y = 0: \quad w_x = 0, \quad w_y = w_{y0} = j/\rho''$$

$$y \to \infty: \quad w_x = w_0$$

Считаем, что величина $\dfrac{\partial w_x}{\partial x}$ мала $\Longrightarrow \dfrac{\partial w_y}{\partial y} = 0 \Longrightarrow w_y = w_{y0}$

Уравнение движения: $w_{y0}\dfrac{\partial w_x}{\partial y} = \nu \dfrac{\partial^2 w_x}{\partial y} \Longrightarrow w_x = C_1 \exp\left(\dfrac{w_{y0} y}{\nu}\right) + C_2 \qquad w_{y0} < 0$

$$y \to \infty: \quad w_x = w_0 \Longrightarrow C_2 = w_0$$

$$y = 0: \quad w_x = 0 \Longrightarrow C_2 = -w_0$$

$$\Longrightarrow w_x = w_0\left[1 - \exp\left(\frac{w_{y0} y}{\nu}\right)\right]$$

Касательное напряжение: $\sigma_\tau = \mu \dfrac{\partial w_x}{\partial y} = -\rho w_0 w_{y0} \exp\left(\dfrac{w_{y0} y}{\nu}\right)$

При $y = 0$

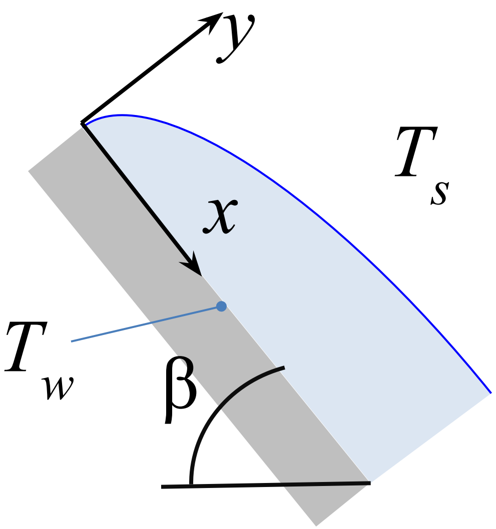
$$\sigma_\tau = -\rho w_0 w_{y0}$$

Введем коэффициент сопротивления стока $C_j = -w_{y0}/w_0 \Longrightarrow \sigma_\tau = 2C_j \dfrac{\rho w_0^2}{2}$

В общем случае надо учитывать также сопротивление, вызванное силами вязкости и турбулентными пульсациями:

$$\sigma_\tau = C_f \frac{\rho w_0^2}{2}, \quad C_f = C_* + 2C_j$$

Конденсация на плоской поверхности



Считаем, что силы инерции малы по сравнению с силами вязкости и гравитации:

$$\mu' \frac{\partial^2 w_x}{\partial y^2} = -\rho' g \sin\beta$$

Граничные условия:

$$y = 0: \quad w_x = 0$$

$$y = \delta(x): \quad \mu' \frac{\partial w_x}{\partial y} = \sigma_{гр} = \pm C_f \frac{\rho'' w_0^2}{2}$$

$$w_x = \frac{\rho' g \sin\beta}{\mu'}\left(\delta y - \frac{y^2}{2}\right) + \frac{\sigma_{гр}}{\mu'} y$$

$$\bar{w}_x \delta = \int_0^\delta w_x dy = \frac{\rho' g \sin\beta}{3\mu'}\delta^3 + \frac{\sigma_{гр}}{2\mu'}\delta^2$$

$$\frac{d}{dx}\left(\bar{w}_x \delta\right) = \frac{q}{r\rho'} = \frac{\lambda' \Delta T}{r\rho' \delta}$$

$$\left(\rho' g \sin\beta \delta^3 + \sigma_{гр}\delta^2\right)\frac{d\delta}{dx} = \frac{\lambda' \Delta T \nu}{r}$$

Введем обозначения: $a = \dfrac{r\rho' g \sin\beta}{4\lambda'\Delta T \nu}$, $b = \pm\dfrac{2}{3} C_f \dfrac{\rho'' w_0^2}{\rho' g \sin\beta}$

$$\left(\rho' g \sin\beta\,\delta^3 + \sigma_{гр}\delta^2\right)\frac{d\delta}{dx} = \frac{\lambda'\Delta T \nu}{r} \longrightarrow \left(4\delta^3 + 3b\delta^2\right)\frac{d\delta}{dx} = \frac{1}{a}$$

Решение этого уравнения: $\delta^4 + b\delta^3 = x \quad a = \;/$

Для неподвижного пара $b = 0$ $\longrightarrow$ $\delta = \sqrt[4]{x/a}$ – это решение задачи Нуссельта

Пар движется вниз, $b > 0$.

Если $b \gg \delta$: $\delta^3 = \dfrac{x}{ab} \longrightarrow \delta = \sqrt[3]{\dfrac{x}{ab}} = \sqrt[3]{\dfrac{6\lambda'\Delta T \nu x}{C_f \rho'' w_0^2 r}}$

$$\alpha = \frac{\lambda}{\delta} = \sqrt[3]{\frac{C_f \rho'' w_0^2 r \lambda'^2}{6\Delta T \nu x}} \qquad \bar{\alpha} = \frac{1}{h}\int_0^h \alpha\, dx = \frac{3}{2}\alpha\Big|_{x=h}$$

Если сила тяжести соизмерима с силой трения, то нужно решать исходное уравнение.

Если пар движется вниз, то он способствует уносу жидкости с поверхности стенки, что приводит к росту коэффициента теплоотдачи.

$$\delta^4 + b\delta^3 \pm x \; a = \; /$$

Если пар движется вверх, то $\boldsymbol{b < 0}$.

$C \neq 0$, так как толщина пленки при $x = 0$ может быть ненулевой.

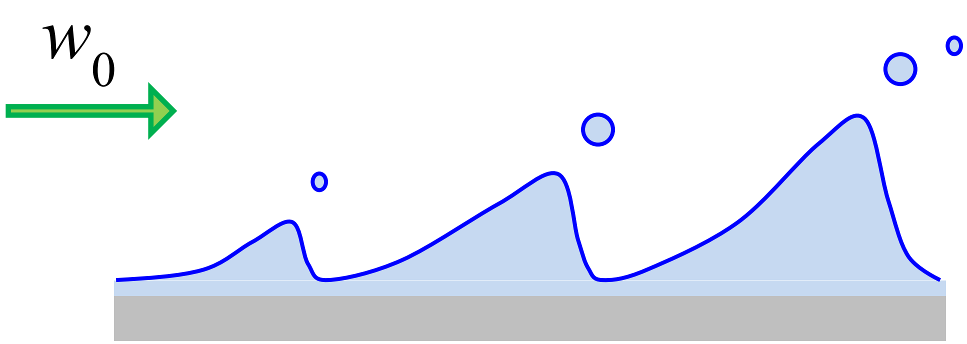
$C = h_0 / a$ $\quad$ h_0 – координата, при которой толщина пленки равна нулю.

$$\delta^4 + b\delta^3 = \frac{x - h_0}{a} \qquad \bar{\alpha} = \lambda \frac{\frac{3}{2}b - \frac{4}{3}\delta_0}{b\delta_0 - \delta_0^2}$$

δ_0 – толщина пленки при $x = 0$.

Если $|b| >> \delta$, то вся жидкость движется вверх, если сила тяжести соизмерима с силой трения, то часть жидкости движется вниз, а часть – вверх.

При высоких скоростях пара возможен **срыв конденсата**.



Вследствие касательных напряжений межфазная поверхность становится неустойчивой. На гребнях волн возможен унос жидкости в виде капель.