

# Лекция 7

## Теплоотдача.

### Гидродинамика двухфазных течений.

### Расчет теплоотдачи при естественной конвекции жидкости

$$Nu = f(Re, Gr, Pr...)$$

$$Nu = \frac{\alpha l}{\lambda}$$

$$Gr = \frac{g \beta \vartheta_c l^3}{\nu^2}$$

$$Pr = \frac{\nu}{a}$$

$$\beta = \frac{1}{\nu} \left( \frac{\partial \nu}{\partial T} \right)_p, \frac{1}{K}$$

$$Re = \frac{wl}{\nu}$$

# Теплоотдача при естественной конвекции в большом объеме

## Вертикальная поверхность

$$(Gr_{ж\ell} \cdot Pr_{ж}) < 10^9$$

$$\overline{Nu}_{ж\ell} = 0,75(Gr_{ж\ell} \cdot Pr_{ж})^{0,25} \cdot \left(\frac{Pr_{жс}}{Pr_c}\right)^{0,25}$$

$$(Gr_{ж\ell} \cdot Pr_{ж}) > 6 \cdot 10^{10}$$

$$Nu_{жс} = 0,15(Gr_{жс} \cdot Pr_{жс})^{1/3} \cdot \left(\frac{Pr_{жс}}{Pr_c}\right)^{0,25}$$

Для среднего значения то же самое

## Горизонтальная труба а

$$\overline{Nu}_{жс} = 0,5(Gr_{жс} \cdot Pr_{жс})^{0,25} \cdot \left(\frac{Pr_{жс}}{Pr_c}\right)^{0,25}$$

## Теплоотдача при естественной конвекции в ограниченном объеме

$$q_K = \frac{\lambda_{\text{ЭКВ}}}{\delta} (t_1 - t_2)$$

$$\lambda_{\text{ЭКВ}} = \lambda \varepsilon_K$$

$$\varepsilon_K = 0,18 (\text{Gr}_{\text{ж}\delta} \cdot \text{Pr}_{\text{ж}})^{0,25}$$

$$t_{\text{ж}} = \frac{t_1 + t_2}{2}$$

$$Q_K = \frac{2\pi l \lambda_{\text{ЭКВ}} (t_1 - t_2)}{\ln \frac{d_2}{d_1}}$$

# Расчет теплоотдачи при вынужденной конвекции жидкости

Теплоотдача при вынужденном продольном  
омывании поверхности

$$Re_{жсл} \leq 5 \cdot 10^5$$

$$\overline{Nu}_{жсл} = 0,66 Re_{жсл}^{0,5} Pr_{жс}^{0,33} \cdot \left( \frac{Pr_{жс}}{Pr_c} \right)^{0,25}$$

$$Re_{жсл} > 5 \cdot 10^5$$

$$\overline{Nu}_{жсл} = 0,037 Re_{жсл}^{0,8} Pr_{жс}^{0,43} \cdot \left( \frac{Pr_{жс}}{Pr_c} \right)^{0,25}$$

# Теплоотдача при вынужденном омывании труб и пучков труб поперечным потоком жидкости



$$5 < Re_{жсd} < 10^3 : \quad \bar{Nu}_{жсd} = 0,5 Re_{жсd}^{0,5} Pr_{жс}^{0,38} \left( \frac{Pr_{жс}}{Pr_c} \right)^{0,25}$$

$$10^3 < Re_{жсd} < 2 \cdot 10^5 : \quad \bar{Nu}_{жсd} = 0,25 Re_{жсd}^{0,6} Pr_{жс}^{0,38} \left( \frac{Pr_{жс}}{Pr_c} \right)^{0,25}$$

$$Re_{жсd} = 3 \cdot 10^5 \div 2 \cdot 10^6 : \quad \bar{Nu}_{жсd} = 0,023 Re_{жсd}^{0,8} Pr_{жс}^{0,37} \left( \frac{Pr_{жс}}{Pr_c} \right)^{0,25}$$



# Трубный пучек



$$\bar{Nu}_{\text{жсд}} = C \operatorname{Re}_{\text{жсд}}^n \operatorname{Pr}_{\text{жс}}^{0,33} \left( \frac{\operatorname{Pr}_{\text{жс}}}{\operatorname{Pr}_c} \right)^{0,25} \cdot \varepsilon_s.$$

*шахматный* :  $C = 0,41$ ,  $n = 0,60$ ;  $\alpha_1 = 0,6\alpha_3$ ,  $\alpha_2 = 0,7\alpha_3$

$$\frac{s_1}{s_2} < 2 : \varepsilon_s = \left( \frac{s_1}{s_2} \right)^{\frac{1}{6}} ; \quad \frac{s_1}{s_2} \geq 2 : \varepsilon_s = 1,12.$$

*коридорный* :  $C = 0,26$ ,  $n = 0,65$ ;  $\alpha_1 = 0,6\alpha_3$ ,  $\alpha_2 = 0,9\alpha_3$ .

$$\varepsilon_s = \left( \frac{s_2}{d} \right)^{-0,15}.$$



# Теплоотдача при вынужденном течении жидкости в трубах



$$(\text{Re}_{\text{ж},d} \leq 2300), (Gr_{\text{ж},d} \cdot \text{Pr}_{\text{ж}} \geq 8 \cdot 10^5):$$

$$\overline{Nu}_{\text{ж},d} = 0,15 \cdot \text{Re}_{\text{ж},d}^{0,33} \cdot \text{Pr}_{\text{ж}}^{0,33} \cdot (Gr_{\text{ж},d} \cdot \text{Pr}_{\text{ж}})^{0,1} \cdot \varepsilon_t \cdot \overline{\varepsilon}_\ell$$

$l/d$	1	2	5	10	15	20	30	40	50
$\overline{\varepsilon}_\ell$	1,9	1,7	1,44	1,28	1,18	1,13	1,05	1,02	1,0

$$(Gr_{\text{ж},d} \cdot \text{Pr}_{\text{ж}} < 8 \cdot 10^5):$$

$$\overline{Nu}_{\text{ж},d} = 1,55 \cdot (\text{Pe}_{\text{ж},d} \cdot \frac{d}{l})^{0,33} \left( \frac{\mu_c}{\mu_{\text{ж}}} \right)^{0,14} \cdot \overline{\varepsilon}_\ell$$

$$\varepsilon_t = \left( \frac{\text{Pr}_{\text{ж}}}{\text{Pr}_c} \right)^{0,25}$$

$$(\text{Re}_{\text{ж},d} \geq 10^4):$$

$$\overline{Nu}_{\text{ж},d} = 0,021 \cdot \text{Re}_{\text{ж},d}^{0,8} \cdot \text{Pr}_{\text{ж}}^{0,43} \cdot \varepsilon_t \cdot \overline{\varepsilon}_\ell; \quad \overline{\varepsilon}_\ell \approx 1 + 2d/l$$

$$(2300 < \text{Re}_{\text{ж},d} < 10^4): \overline{Nu}_{\text{ж},d} = K_0 \cdot \text{Pr}_{\text{ж},d}^{0,43} \cdot \varepsilon_t \cdot \overline{\varepsilon}_\ell$$

$\text{Re} \cdot 10^{-3}$	2,2	2,3	2,5	3,0	3,5	4,0	5	6	7	8	9	10
$K_0$	2,2	3,6	4,9	7,5	10	12,2	16,5	20	24	27	30	33

# Расчет теплоотдачи при фазовых превращениях

Теплоотдача при пленочной конденсации неподвижного пара на вертикальной поверхности

$$\text{Re}_s = \frac{\bar{\alpha} l (t_s - t_c)}{r \rho_{жс} v_{жс}}; \quad Z_s = \left( \frac{g l^3}{v_{жс}^2} \right)^{1/3} \frac{\lambda_{жс} (t_s - t_c)}{r \rho_{жс} v_{жс}}.$$

$$Z_s < 2300 \quad \text{Re}_s = 0,95 Z_s^{0,78} \left( \frac{\text{Pr}_{жсs}}{\text{Pr}_{жсc}} \right)^{0,25};$$

$$Z_s \geq 2300 \quad \text{Re}_s = \left[ 89 + 0,024 \left( \frac{\text{Pr}_{жсs}}{\text{Pr}_{жсc}} \right)^{0,25} \cdot \text{Pr}_{жсs}^{0,5} (Z - 2300) \right]^{4/3}$$



# Теплоотдача при пленочной конденсации на горизонтальной трубе

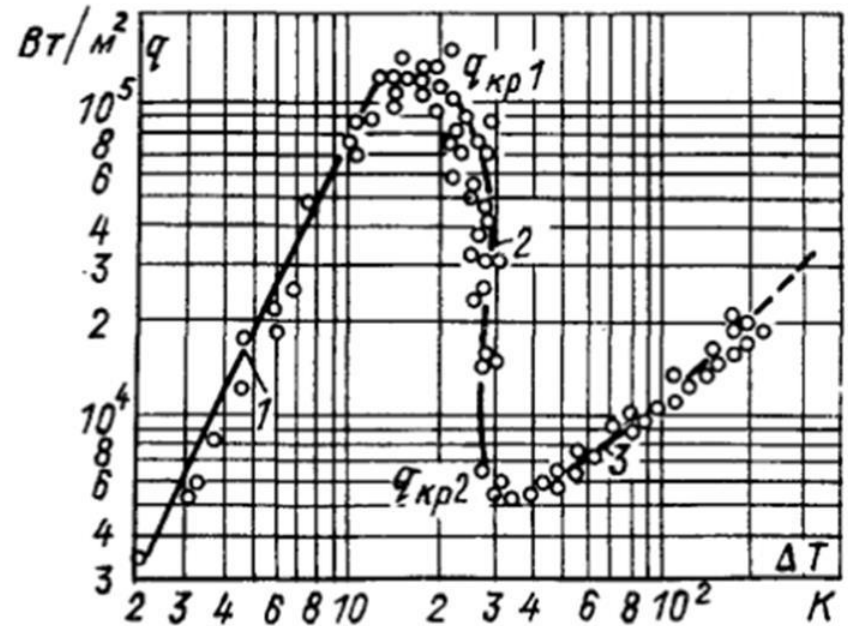
$$\bar{\alpha} = 0,728 \sqrt[4]{\frac{\lambda_{жс}^3 \rho_{жс}^2 g r}{\mu_{жс} (t_s - t_c) d}} \left( \frac{\text{Pr}_{жсs}}{\text{Pr}_{жсc}} \right)^{0,25}$$

$$\frac{\bar{\alpha}}{\bar{\alpha}_N} = \left( 1 + 3,62 \chi^4 \frac{Fr}{\text{Pr}_{жсs} K} \right)^{1/4}$$

$$Fr = \frac{w_n^2}{gd}, \quad K = \frac{r}{c_{pжс} (t_s - t_c)},$$

$$\chi = 0,9 \left[ 1 + \left( \text{Pr}_{жсs} \frac{K}{R} \right)^{1/3} \right], \quad R = \left( \frac{\rho_{жс} \mu_{жс}}{\rho_n \mu_n} \right)^{1/2}$$

# Теплоотдача при пузырьковом кипении жидкости в условиях свободного движения



$$Nu_* = C Re_*^n Pr_{ж}^{1/3}$$

$$Re_* \leq 0,01 \quad C = 0,0625,$$

$$Re_* > 0,01 \quad C = 0,125,$$

$$Nu_* = \frac{\alpha l_*}{\lambda_{ж}},$$

$$w_* = \frac{q_c}{r \rho_n},$$

$$l_* = \frac{\sigma \rho_{ж} c_{pж} T_s}{(r \rho_n)^2},$$

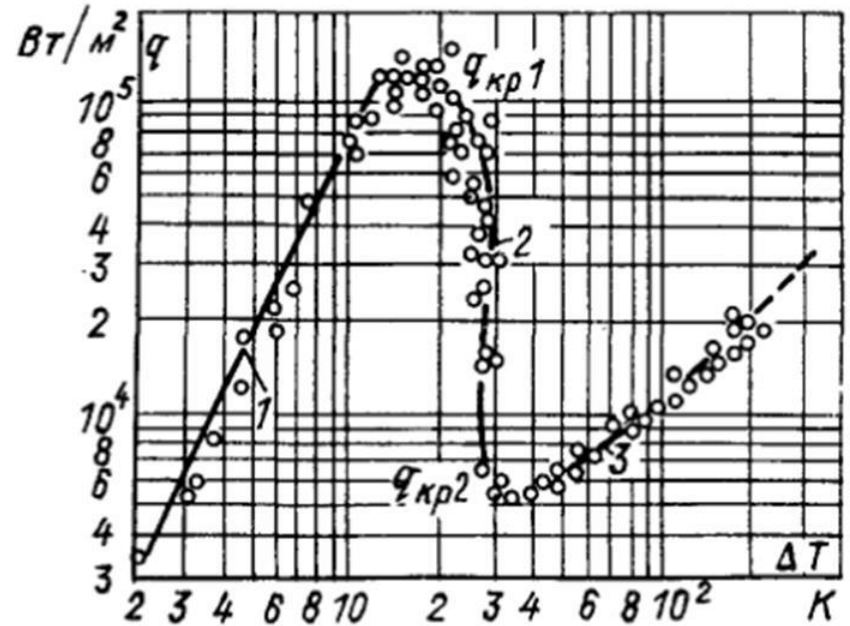
$$Re_* = \frac{w_* l_*}{\nu_{ж}}$$

$$n = 0,5;$$

$$n = 0,65;$$



# Кривая кипения для азота



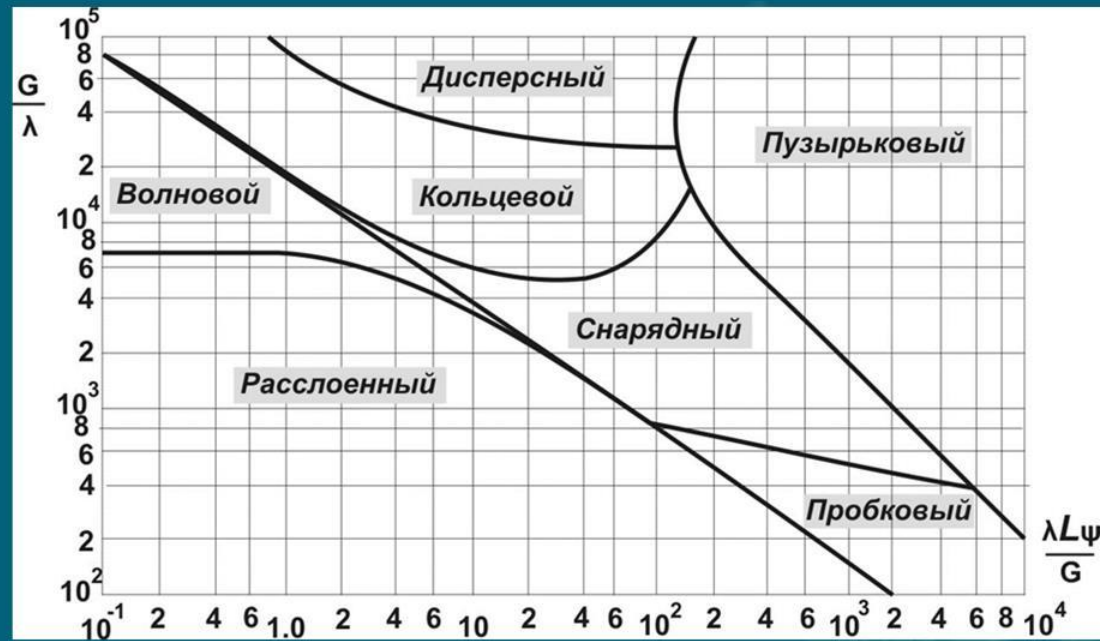
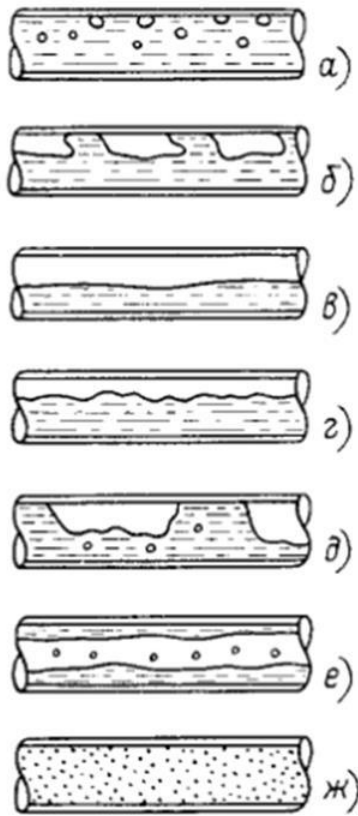
$$Nu = 75 C_{\chi} K^{0.7} Pr_{жс}^{-0.2}$$

$$Nu = \frac{\alpha}{\lambda_{ж}} \sqrt{\frac{\sigma}{g(\rho - \rho_{II})}}, \quad K = \frac{q}{r \rho_n w_*}, \quad C_{\chi} = \left( \frac{\chi}{\chi_p} \right)^{0.5}$$

$$w_* = 0.36 \cdot 10^{-3} \left( \frac{p_{кр}}{p} \right)^{1.4} \text{ — скорость роста пузырьков}$$

$\chi = \sqrt{\lambda c \rho}$  — теплоусвояемость материала стенки

$\chi_p$  — теплоусвояемость бронзы



$$\frac{\alpha_q}{\alpha_w} \leq 0,5 : \quad \bar{\alpha} = \alpha_w,$$

$$\frac{\alpha_q}{\alpha_w} \geq 2 : \quad \bar{\alpha} = \alpha_q,$$

$$0,5 < \frac{\alpha_q}{\alpha_w} < 2 : \quad \bar{\alpha} = \alpha_w \frac{4\alpha_w + \alpha_q}{5\alpha_w - \alpha_q}$$

$$\lambda = \left[ \frac{\rho_{\Pi} \rho_{\text{ж}}}{\rho_a \rho_w} \right]^{\frac{1}{2}} ; \quad \psi = \left( \frac{\sigma_{\text{ж}}}{\sigma_w} \right) \left[ \left( \frac{\mu_w}{\mu_{\text{ж}}} \right) \left( \frac{\rho_{\text{ж}}}{\rho_w} \right)^2 \right]^{\frac{1}{3}} ;$$

$$G = x; \quad L = 1 - x.$$

