

Режимы течения пленки:

**а** — ламинарный ( $\delta$  — толщина пленки); **б** — ламинарно-волновой ( $\delta_0$  — остаточная толщина,  $l$  — длина волны); **в** — турбулентный ( $\delta_n$  — толщина ламинарного подслоя)

$$Re_e = 7(Ar. / K^3 Pr^3)^{1/8}$$

$$Re. = 2,3 Ar.^{1/5}; Re_{кр} = 35 Ar.^{1/5}, \text{ где } Re = \frac{\bar{q}L}{\eta v} = \frac{V}{v}; Ar. = \left( \frac{\sigma^3}{v^4 \Delta \rho g} \right)^{0,5}$$

$$q = \frac{\lambda}{\delta(x)} (T_s - T_{ст}) \text{ и } q = \alpha (T_s - T_{ст})$$

$$\alpha(x) = \lambda / \delta(x)$$

$$g(\rho' - \rho'') + \mu' \frac{d^2 W_x}{dy^2} = 0.$$

$$W_x = 0 \text{ при } y = 0; \partial W_x / \partial y = 0 \text{ при } y = \delta$$

$$W_x = -\frac{g(\rho' - \rho'')}{2\mu} y^2 + C_1 y + C_2$$

$$C_1 = \frac{g(\rho' - \rho'')}{\mu'} \delta \text{ и } C_2 = 0$$

$$W_x = \frac{g(\rho' - \rho'')}{2\mu} \left( \delta y - \frac{y^2}{2} \right)$$

$$\overline{W}_x = \frac{1}{\delta} \int_0^\delta W_x dy = \frac{g(\rho' - \rho'') \delta^2}{3\mu'}$$

$$G_x = \rho' \overline{W}_x \delta$$

$$dG_x = d(\rho' \overline{W}_x \delta) = \frac{g \rho'^2 \delta^2 d\delta}{\mu'}$$

$$rdG_x = \frac{\lambda'}{\delta} (T_s - T_{cm}) dx, \text{ отсюда } \frac{g \rho'^2 r}{\mu'} \delta^2 d\delta = \frac{\lambda'}{\delta} (T_s - T_{cm}) dx.$$

$$\delta = \sqrt[4]{\frac{4\lambda' \mu' (T_s - T_{cm}) x}{r g \rho'^2}}$$

$$\alpha_x = \sqrt[4]{\frac{(\lambda')^3 g (\rho')^2 r}{4\mu' (T_s - T_{cm}) x}}$$

Средний коэффициент теплообмена

$$\bar{\alpha} = \frac{1}{h} \int_0^h \alpha_x dx = \frac{4}{3} \sqrt[4]{\frac{(\lambda')^3 g(\rho')^2 r}{4\mu'\Delta T h}} = 0,943 \sqrt[4]{\frac{A}{h\Delta T}}$$

$$A = \frac{(\lambda')^3 g(\rho')^2 r}{\mu'}$$

$$\overline{Nu} = 0,943(Gr Pr K)^{1/4},$$

где  $\overline{Nu} = \bar{\alpha}h/\lambda$ ,  $Gr = (gh^3/\nu^2)(1 - \rho''/\rho')$ ,  $K = r/c\Delta T$

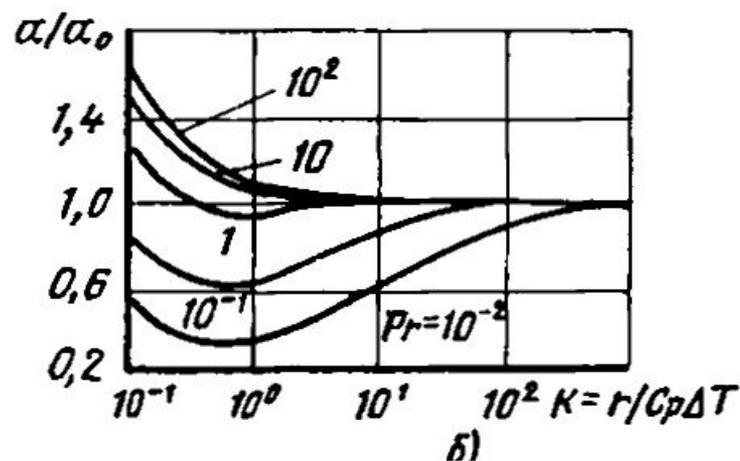
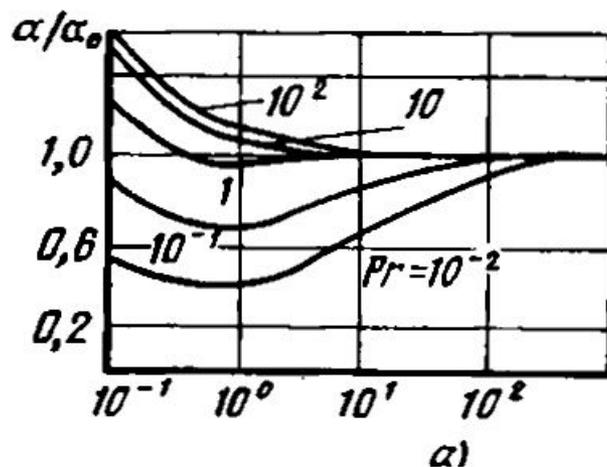
$$\overline{\delta}_0 = 3,3Gr^{1/5}$$

$$\left(\frac{\alpha}{\lambda}\right)\left(\frac{\nu^2}{g}\right)^{1/3} = 0,527Gr^{-1/5} \quad Re. < Re < Re_{кр} = 35Gr^{1/5}$$

$$\alpha = \alpha_0 \epsilon_v \epsilon_t$$

$$\epsilon_v = Re^{0,053}$$

$$\epsilon_t = \left[ \left( \lambda_{ст}/\lambda_s \right) \left( \mu_s/\mu_{ст} \right) \right]^{1/8} \quad 0,5 < \lambda_s/\lambda_{ст} < 2 \text{ и } 0,1 < \mu_s/\mu_{ст} < 1.$$



Влияние конвективного переноса тепла и сил инерции в пленке на теплоотдачу ламинарно стекающей пленки конденсата:

*a* — для вертикальной плоской поверхности; *b* — для горизонтальной круглой трубы;

$\alpha_0$  — коэффициент теплообмена, рассчитанный по формулам Нуссельта

$$r^* = r + \frac{2}{3} c'_p (T_s - T_{cr})$$

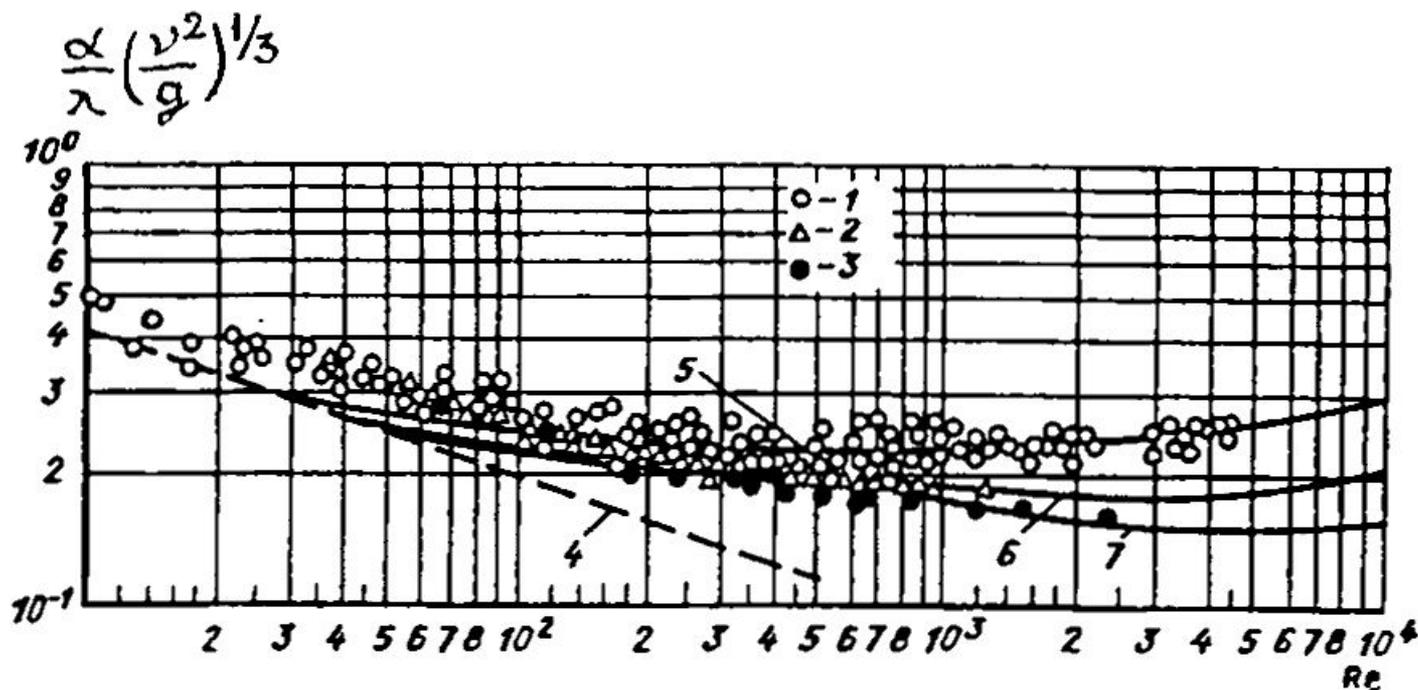
$$q = -(\lambda + \lambda_r) \frac{dt}{dy} = -\lambda \left( 1 + \frac{Pr}{Pr_r} \frac{\nu_r}{\nu} \right) \frac{dt}{dy}$$

$$\alpha = \left[ \int_0^{\delta} \frac{dy}{\lambda \left( 1 + \frac{Pr}{Pr_r} \frac{\nu_r}{\nu} \right)} \right]^{-1}$$

$$\frac{\bar{\alpha}}{\lambda} \left( \frac{v^2}{g} \right)^{1/3} = \text{Re} / \left[ 2300 + 41(\text{Re}^{3/4} - 89) \text{Pr}^{0.5} \left( \frac{\text{Pr}_x}{\text{Pr}_{ct}} \right) \right],$$

$$\text{Re} = qh/r\mu = \bar{\alpha}\Delta th/r\mu$$

$$\frac{\bar{\alpha}}{\lambda} \left( \frac{v^2}{g} \right)^{1/3} = 0,017 \text{Re}^{0.25} \text{Pr}^{0.5}$$



Интенсивность теплоотдачи при конденсации водяного пара (1, 2 — эксперименты; 5, 6 — расчет) и пара хладона-21 (3, 7): 1, 5 —  $\text{Pr}=3,5$ ; 2, 6 —  $\text{Pr}=1,7$ ; 3, 7 —  $\text{Pr}=1,1$ ; 4 — расчет по теории Нуссельта

$$\alpha = \alpha_{\text{всрн}} (\cos \varphi)^{0,25} \quad \bar{\alpha} = 0,7284 \sqrt[4]{\frac{\lambda^3 \rho^2 g r}{\mu \Delta t d}}$$

$$\overline{\text{Nu}} = \bar{\alpha} d / \lambda = 0,728 (\text{Ar Pr K})^{1/4}$$

$$\text{Re} > \text{Re}_* = \left( \frac{43}{\pi} \text{Ar}_*^{1/15} \right)^{1,06}, \text{ если } g d \rho / \sigma = \text{We}^{-0,5} > 4.$$

$$\overline{\text{Nu}} = \overline{\text{Nu}}_{\text{н}} \varepsilon_{\sigma},$$

где  $\overline{\text{Nu}}_{\text{н}} = 0,905 \text{Re}^{-1/3}$ ;  $\varepsilon_{\sigma} = 1 + \varepsilon_{\sigma,1} + \varepsilon_{\sigma,2}$ ;  $\varepsilon_{\sigma,1} = [1,35/\pi] \sqrt{2\text{We}(1+4\text{We})} \text{Re}^{0,05}$ ;  
 $\varepsilon_{\sigma,2} = 0,01(\text{Re Ar}_*^{2/11})^{1,2}$ ;  $\text{We} = (\sigma/\rho g d)^2$ .

$$\alpha_{\text{н.н}} = \alpha_s \sqrt[4]{1 + (c_p^* \delta t)/r}.$$

$$\alpha_{\text{вн}} \approx \alpha_s \sqrt[4]{\chi}.$$

$$\frac{\bar{\alpha}}{\alpha_0} = \left( 1 + 3,62 \chi^4 \frac{\text{Fr}}{\text{Pr K}} \right)^{0,25}, \quad \frac{\alpha_0}{\lambda} \left[ \frac{v^2}{g(1 - \rho''/\rho')} \right]^{1/3} = 0,95 \text{Re}^{-1/3};$$

$\text{Fr} = W'^2/gd$  — число Фруда;  $K = \frac{r}{c_p^* \Delta t}$  — число фазового перехода;

$\text{Re} = q \pi d / r \mu'$  — число Рейнольдса;  $\chi = 0,9 \left[ 1 + \text{Pr K} \left( \frac{\rho'' \mu''}{\rho' \mu'} \right)^{0,5} \right]^{1/3}$

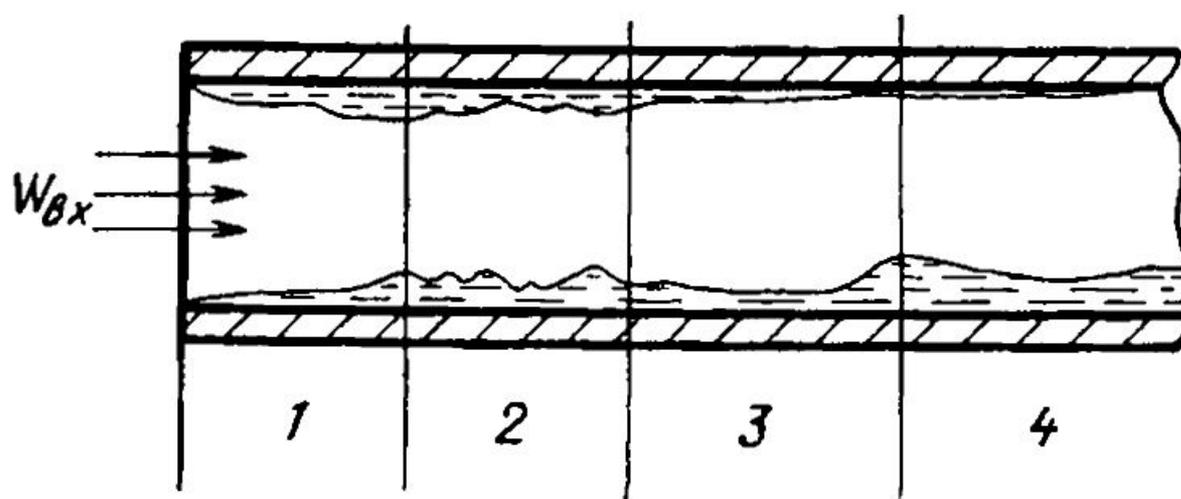


Схема процесса конденсации внутри горизонтальной трубы:

1 — начальный участок; 2 — участок с турбулентным движением пленки; 3 — участок с ламинарным движением пленки; 4 — ручей

$$W_{\text{вх}} = 4G'' / \rho'' \pi d^2; \quad W_0 = 4G_{\text{см}} / \rho' \pi d^2$$

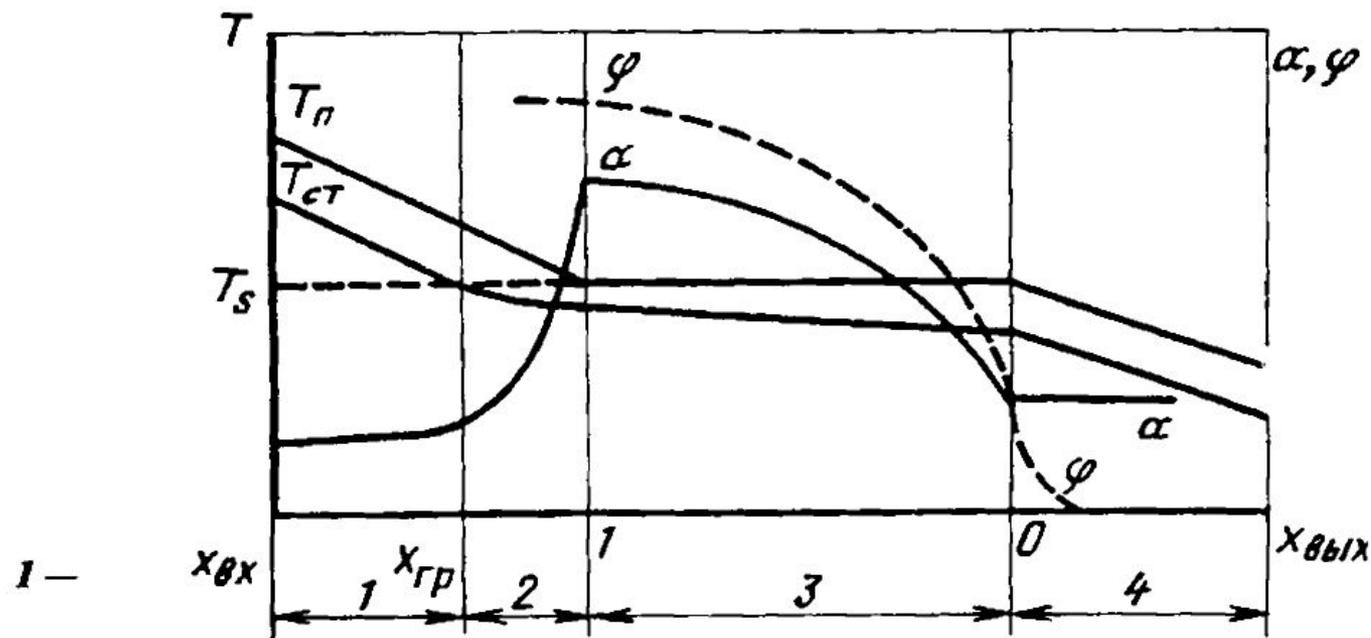


Рис. 7.13 Режимы и характеристики теплообмена при полной конденсации перегретого пара внутри трубы ( $\varphi$  — истинное паросодержание):

1 — охлаждение перегретого пара; 2 — конденсация перегретого пара; 3 — конденсация насыщенного пара; 4 — охлаждение конденсата

1 — охлаждение перегретого пара без конденсации:  $T_n > T_s$ ,  $T_{ct} \geq T_s$ ,  $x_{вх} \geq x > x_{гр}$ . В сечении, где  $T_{ct} = T_s$ ,  $x = x_{гр}$ .

2 — конденсация перегретого пара  $T_n \geq T_s$ ,  $T_{ct} \leq T_s$ ,  $x_{зр} \geq x \geq 1$ .

3 — конденсация насыщенного пара  $T_n = T_s$ ,  $T_{ct} < T_s$ ,  $1 \geq x \geq 0$ .

4 — охлаждение конденсата  $T_n < T_s$ ,  $T_{ct} < T_s$ ,  $x < 0$ .

Здесь  $x = (h_{см} - h') / r$  — относительная энтальпия потока,  $x_{гр}$  — относительная энтальпия, при которой начинается конденсация пара;  $h_{см}$ ,  $h'$  — энтальпия смеси и жидкости при  $T_s$ .

$$\overline{St} \cong 0,2 Re_0^{-0,8} (d/l)^{0,88}$$

$$\frac{\alpha}{\rho' c'_p W_0} = St$$

$$\overline{St} = 0,033 Re_0^{-0,17} Pr^{-0,09} K^{0,13} We^{0,35} (d/l)^{0,42}$$

Диапазон изменения безразмерных величин:  $l/d = 4 \div 180$ ;

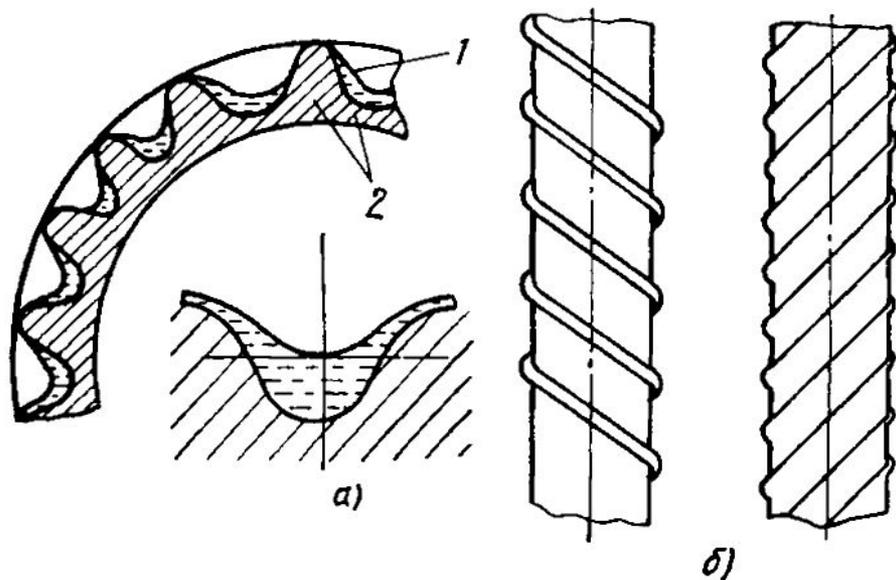
$$Re_0 = (1,5 \div 10) \cdot 10^4; \quad Pr = 1,8 \div 6,4; \quad K = \frac{r}{c'_p (t_s - t_0)} = 6 \div 50;$$

$$We = \frac{\rho' W_0^2 d}{\sigma} = 0,4 \div 5,5. \text{ Определяющей температурой является } t_0 \text{ для}$$

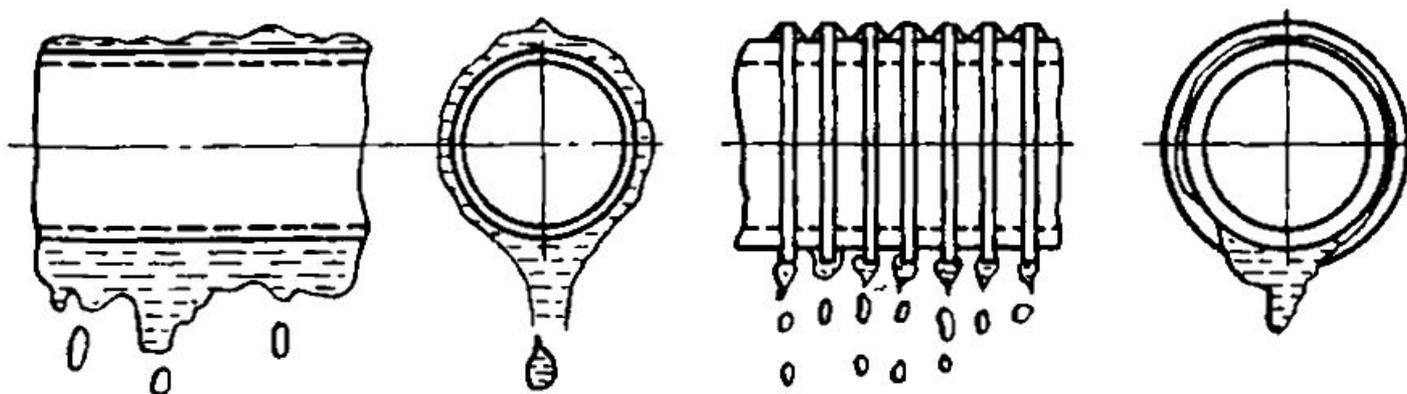
всех свойств, кроме  $r, \sigma, \rho'$ , которые относятся к  $t_s$ .

$$Nu'' = 2 + 0,74 Re''^{0,5} Pr''^{0,33},$$

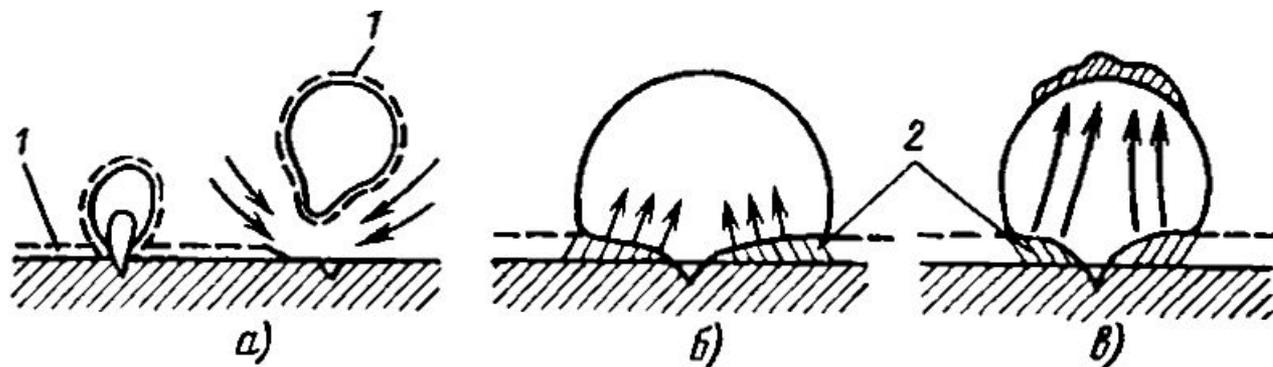
где  $Nu'' = \alpha'' 2R / \lambda''$ ,  $Re'' = W 2R / \nu''$ .



**Рис. 7.19** Ребристые и гофрированные трубы для интенсификации теплообмена:  
*a* — поперечное сечение ребристой трубы; 1 — пленка конденсата; 2 — стенка трубы;  
*б* — виды поверхностей труб



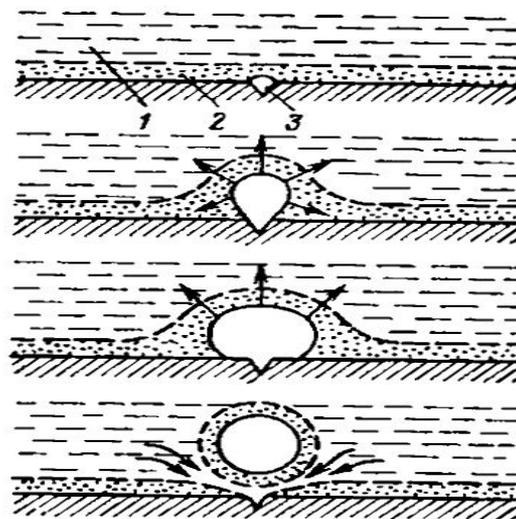
**Стеkanie пленки конденсата с горизонтальной гладкой и ребристой трубы**

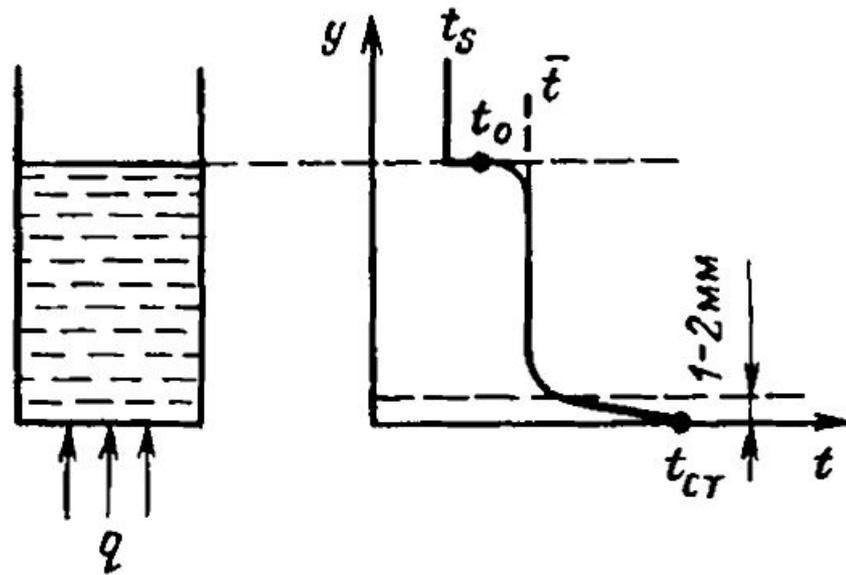


**Причины повышенной интенсивности теплообмена при кипении:**

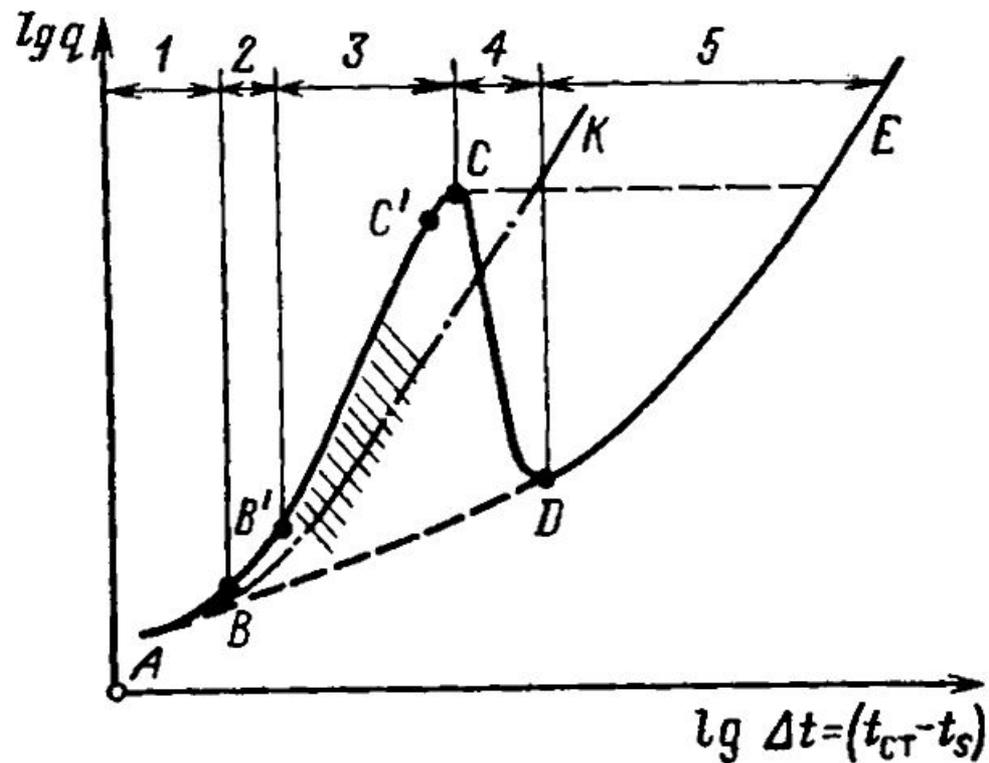
*a* — турбулизация пограничного слоя, оттеснение пограничного слоя растущим пузырем; *б* — испарение микрослоя под пузырем; *в* — перенос скрытой теплоты парообразования от основания к вершине пузыря за счет испарения жидкости у основания и конденсации в верхней части пузыря; *1* — слой перегретой жидкости; *2* — микрослой у основания пузыря

**Движение жидкости во время роста и отрыва парового пузыря:**  
**1** — жидкость при температуре насыщения; **2** — перегретая жидкость;  
**3** — центр парообразования





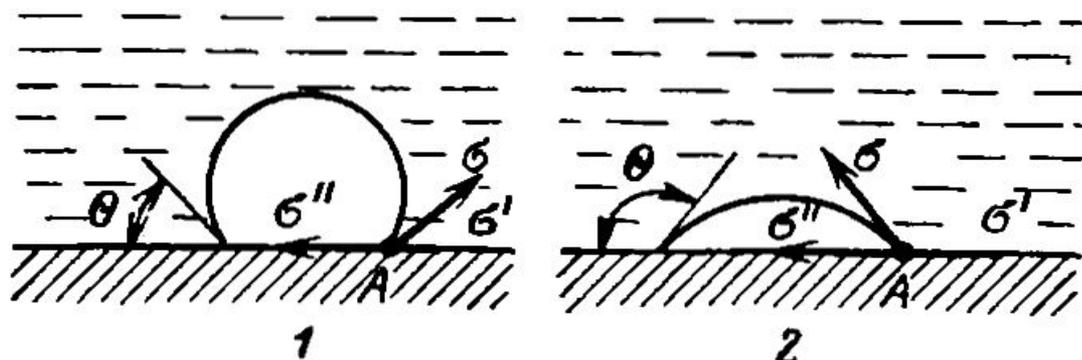
**Распределение температуры в жидкости при испарении со свободной поверхности без образования пузырей**



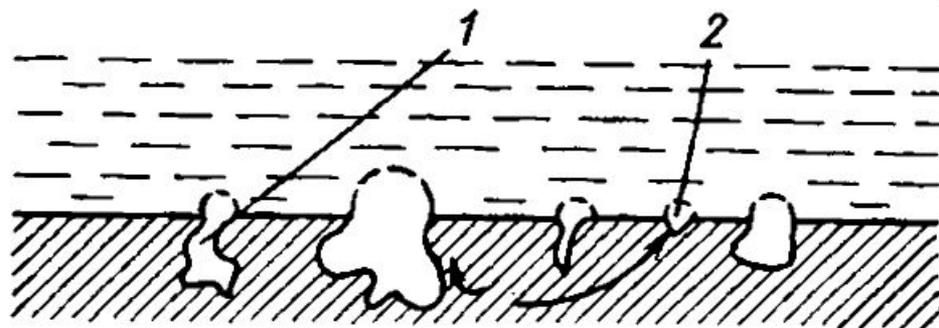
- Кривая кипения для большого объема. Области различных режимов теплообмена:
- 1 — свободная конвекция; 2 — неразвитое кипение;
  - 3 — развитое кипение; 4 — переходное кипение (от пузырькового к пленочному);
  - 5 — пленочное кипение. \\\\\\\ — Область неустойчивого кипения. Характерные режимы:
- $AB$  — свободная конвекция;  $B$  — начало пузырькового кипения;  $B'$  — начало развитого пузырькового кипения;
  - $C'$  — точка отклонения режима от пузырькового кипения;
  - $C$  — точка кризиса;  $D$  — точка Лейденфроста

$$L = -\Delta p V + \sigma(F - f) + \sigma'f - \sigma'f \quad \sigma'' = \sigma' + \sigma \cos \theta$$

$$L = -\Delta p V + \sigma F \left[ 1 - \frac{f}{F} (1 - \cos \theta) \right]$$



Силы поверхностного натяжения на границе фаз и краевой угол  $\theta$ :  
 1 — при смачивании поверхности; 2 — при несмачивании поверхности



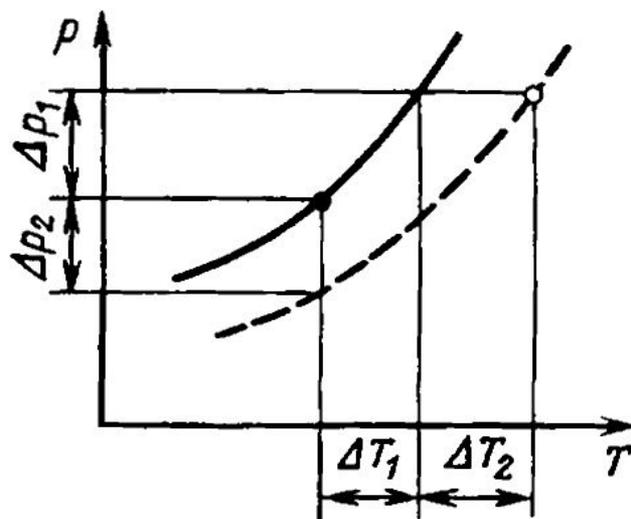
1 — первый центр парообразования, ( $f/F$  — максимально);  
 2 — последний центр парообразования, ( $f/F$  — минимально);  
 $F$  — полная площадь поверхности пузырька;  $f$  — площадь контакта с твердой стенкой

$$\Delta p_1 = 2\sigma/R \quad \Delta p_2 = \frac{2\sigma}{R} \frac{\rho''}{\rho' - \rho''}$$

$$\Delta p = \Delta p_1 + \Delta p_2 = \frac{2\sigma}{R} \cdot \frac{\rho'}{\rho' - \rho''}$$

$$\frac{dp}{dT} \approx \frac{\Delta p}{\Delta T} = \frac{r}{T(v'' - v')}, \quad \Delta T = \Delta T_1 + \Delta T_2$$

$$R_{\text{кр}} = \frac{2\sigma T(v'' - v')}{r\Delta T} \frac{\rho'}{\rho' - \rho''} \quad \Delta T \approx \frac{2\sigma T_s}{rp''R} = \frac{2\sigma RT_s^2}{rpR}$$



**Кривые упругости пара:**

— — над плоской поверхностью; --- — над  
вогнутой поверхностью

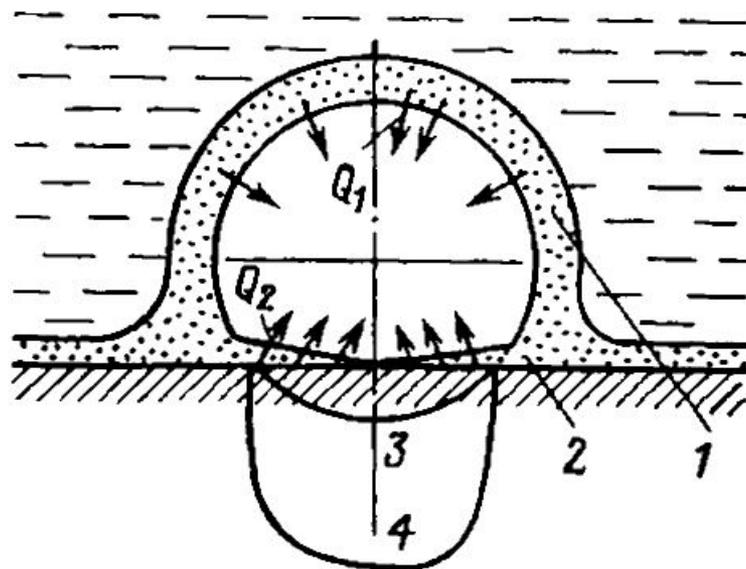
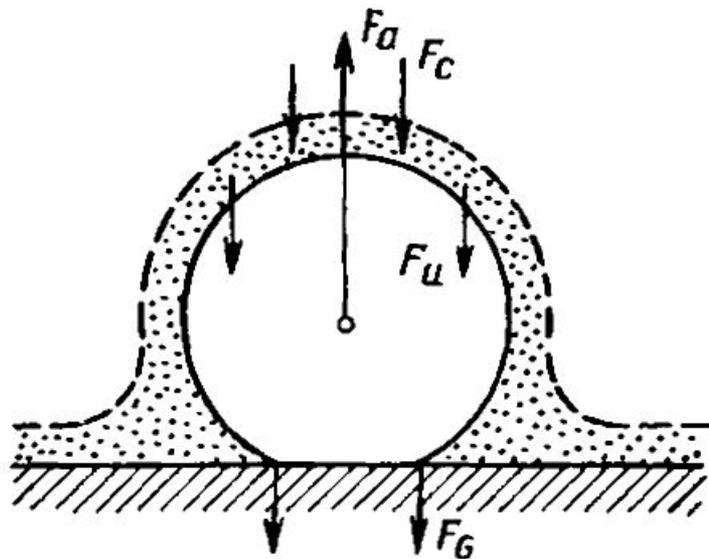


Схема подвода тепла к растущему паровому пузырю и фронт распространения температурного возмущения в твердом теле: 1 — перегретый слой жидкости; 2 — микро-слой у основания пузыря; 3 — изотерма для материала с низкими теплопроводящими свойствами; 4 — изотерма для материала с высокими теплопроводящими свойствами



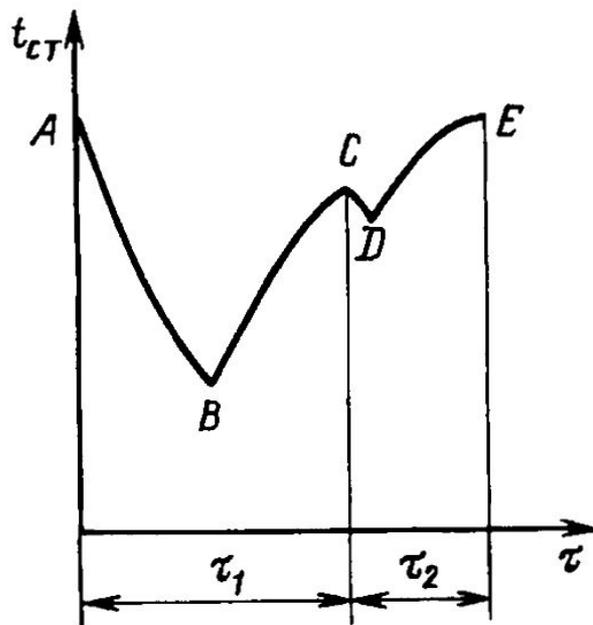
Силы, действующие на растущий  
паровой пузырь:

$F_a$  — подъемная (архимедова);  $F_c$  — сопротивление;  $F_u$  — инерции;  $F_o$  — поверхностного натяжения; ..... — оттесняемый перегретый слой

$$\frac{\pi d_0^3}{6} (\rho' - \rho'')g = \pi d_0 \sigma(\theta)$$

$$d_0 \sim F(\theta) \sqrt{\sigma / (\rho' - \rho'')g}$$

$$\sqrt{\sigma / (\rho' - \rho'')g}$$



**Характер изменения температуры поверхности под пузырем пара:**

$\tau_1$  — время роста пузыря до отрыва от поверхности;  $\tau_2$  — время от момента отрыва до момента зарождения нового пузыря (время осаждения); *A* — образование парового зародыша; *AB* — испарение микрослоя; *B* — полное испарение микрослоя; *BC* — рост температуры за счет ухудшения теплоотдачи кнару;

*C* — отрыв пузырька; *CD* — понижение температуры за счет поступления холодной жидкости; *DE* — образование перегретого слоя жидкости

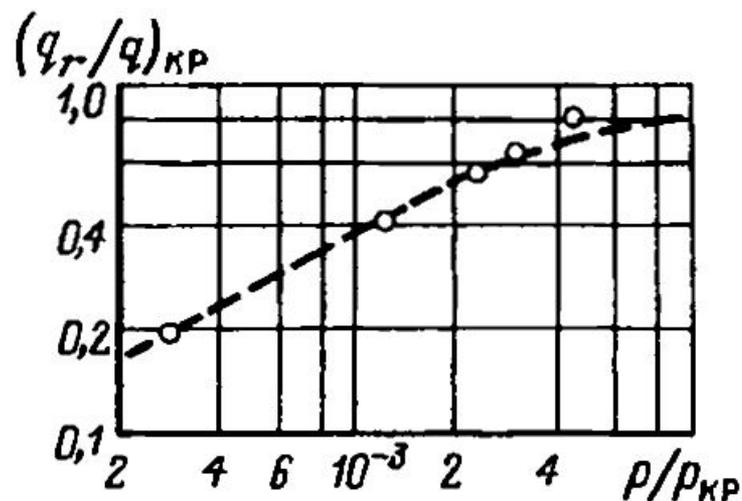
## КИПЕНИЕ В БОЛЬШОМ ОБЪЕМЕ

$$\sigma T_s / r p^n (t_{cr} - t_s)$$

$$w^n = q / r p^n$$

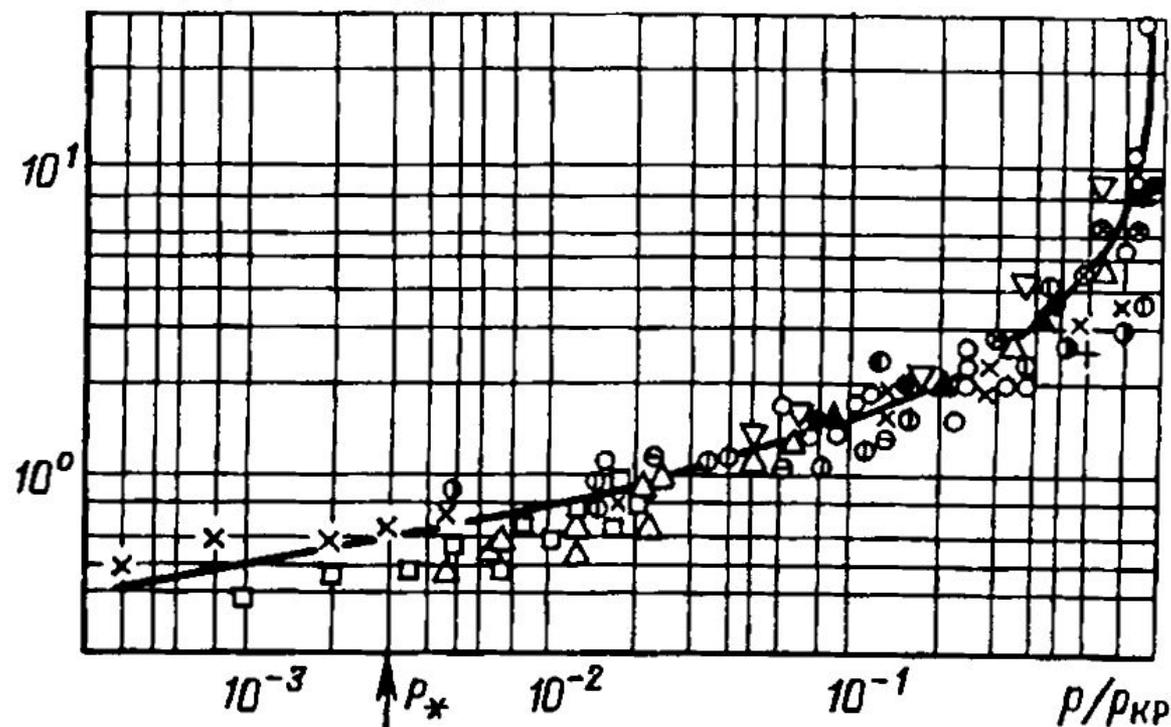
$$Q_i = V r p^n = \frac{\pi d_0^3}{6} r p^n$$

$$q_{исп} = \frac{\sum_1^N Q_i f_i}{F} = r p^n N \frac{\pi}{6} f d_0^{-3}$$



Зависимость количества тепла, переносимого паром при  $q \sim q_{кр}$ , от приведенного давления

$$(\alpha/q^{0,7})_p / (\alpha/q^{0,7})_{p_*}$$



Влияние давления на коэффициент теплообмена при пузырьковом кипении  
 ( $p_{кр}$  — критическое давление;  $p_*$  — условно выбранное давление,  $p_* = 0,03p_{кр}$ )

$$\alpha = 4,34q^{0,7} (p^{0,14} + 1,35 \cdot 10^{-2} p^2)$$

$$\alpha = 10,45q^{0,7} [3,3 - 0,0113(T_s - 373)]^{-1}$$

$$\alpha = 882 P_{кр}^{1/3} T_{кр}^{-5/6} M^{-1/6} \pi^{0,1} (1 + 4,56 \pi^{1,13}) q^{2/3},$$

где  $\pi = P/P_{кр}$ .

$$\alpha = A q^m p^n,$$

$$Nu = 8,7 \cdot 10^4 Re^{0,7} K_p^{0,7}$$

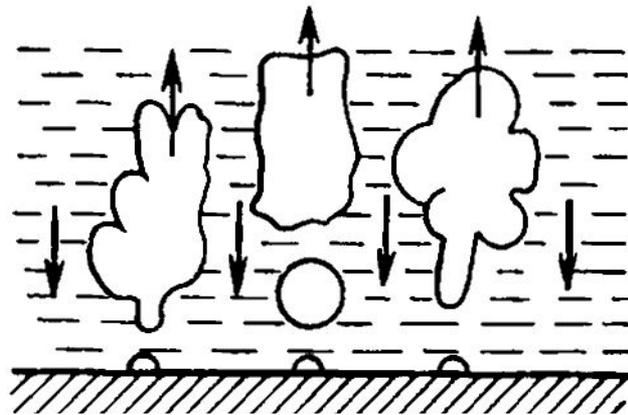
где  $A=3 \div 6$ ;  $m=0,7$ ;  $n=0,1 \div 0,15$ ;

$$\alpha = C q^{2/3} (\lambda' \rho' / \sigma T_s^2)^{1/3} (P/P_k)^n,$$

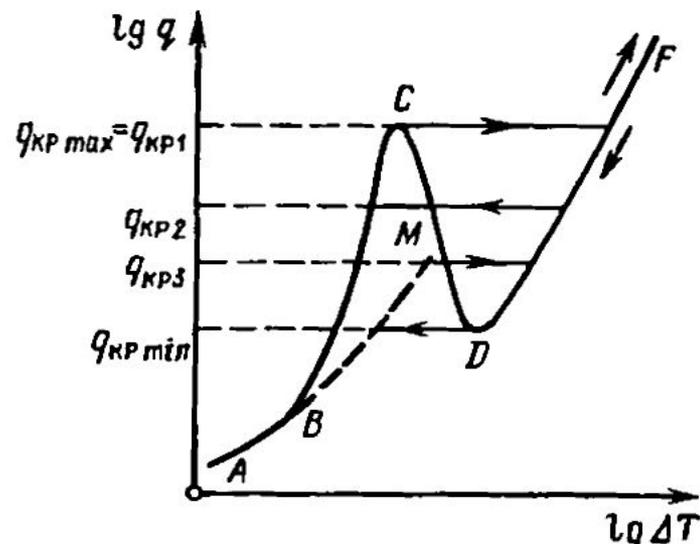
где  $C=9,3$ ;  $n=0,45$  для  $P/P_{кр}=4 \cdot 10^{-5} - 10^{-3}$ ;  $C=1,2$ ;  $n=0,15$  для  $P/P_{кр}=10^{-3} - 2 \cdot 10^{-2}$ ;  $q$  выражено в Вт/(м<sup>2</sup>К),  $\rho$  — в Дж/кг;  $\sigma$  — в Н/м = Дж/м<sup>2</sup>;  $\lambda$  — в Вт/(мК),  $\rho'$  — в кг/м<sup>3</sup>;  $T_s$  — в К.

$$Nu = 8,7 \cdot 10^4 Re^{0,7} K_p^{0,7},$$

где  $Nu = \alpha l / \lambda'$ ;  $Re = (q / \rho''') (c \rho' l / \lambda)$ ;  $K_p = p \sqrt{\sigma (\rho' - \rho'')}$ ;  $l = \sqrt{\sigma (\rho' - \rho'')}$ .

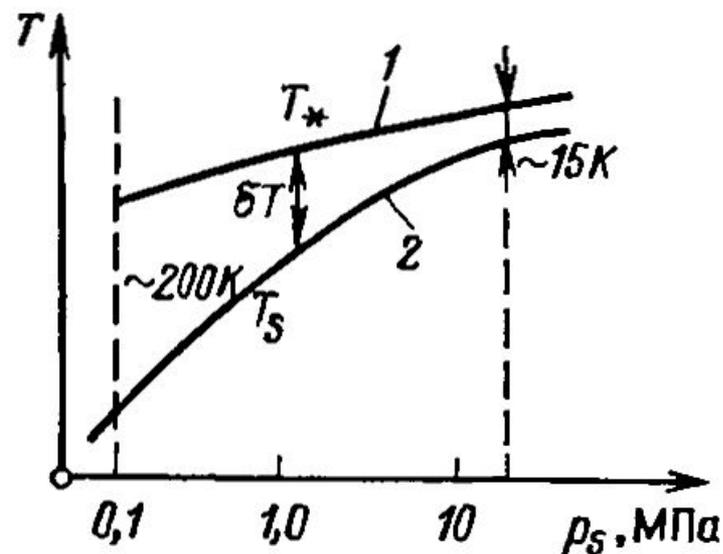


Движение пара и жидкости у поверхности нагрева в предкризисном состоянии



К определению различных видов кризиса теплообмена:

- AB* — свободная конвекция; *BC* — пузырьковое кипение; *CD* — переходное пленочное кипение;
- DF* — устойчивое пленочное кипение;
- BM* — затянутая свободная конвекция



Температура предельного перегрева  
жидкости

$$\frac{\rho'' w_{кр}^{*2}}{g(\rho' - \rho'')\delta} = \frac{\rho'' w_{кр}^{*2}}{\sqrt{g\sigma(\rho' - \rho'')}} = K \approx \text{const.}$$

$$q_{кр} \cong Kr \sqrt{\rho''^4 \sqrt{g\sigma(\rho' - \rho'')}}$$

(И.Г.Маленков, 1963):  $K = 30M_*^{2/3}$  при  $Ar_* \geq 10^4$ ;  $K = 5,7M_*^{2/3} Ar_*^{0,15}$

при  $Ar_* < 10^4$ . Здесь  $M_* = \left(\frac{\rho''}{P}\right)^{1/2} \sqrt[4]{\frac{g\delta}{\rho' - \rho''}}$ ;  $Ar_* = \frac{\sigma^{3/2} \rho'}{\mu'^2 \sqrt{g(\rho' - \rho'')}}.$

$$q_{кр} = 0,13r \sqrt{\frac{\rho' \rho''}{\rho' - \rho''}} \sqrt[4]{g\sigma(\rho' - \rho'')}.$$

$$q_{кр} = 0,38 p_{кр} \left( p/p_{кр} \right)^{0,35} \left( 1 - p/p_{кр} \right)^{0,9},$$

где  $q_{кр}$  — в МВт/м<sup>2</sup>,  $p_{кр}$  в МПа.

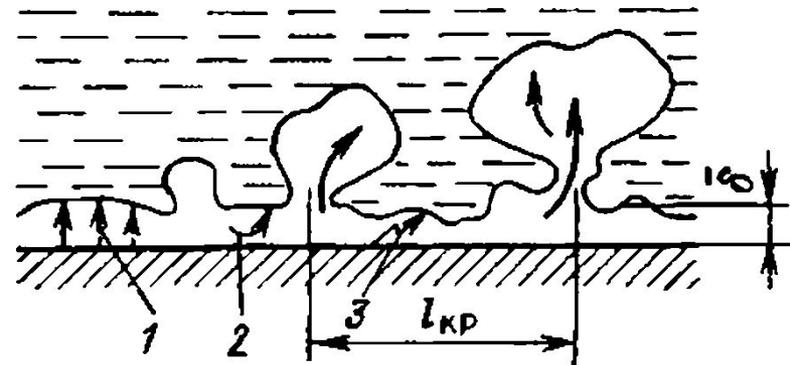
$$q_{кр} = 0,63 \lambda^{0,6} \left( p/p_{кр} \right)^{1/6}$$

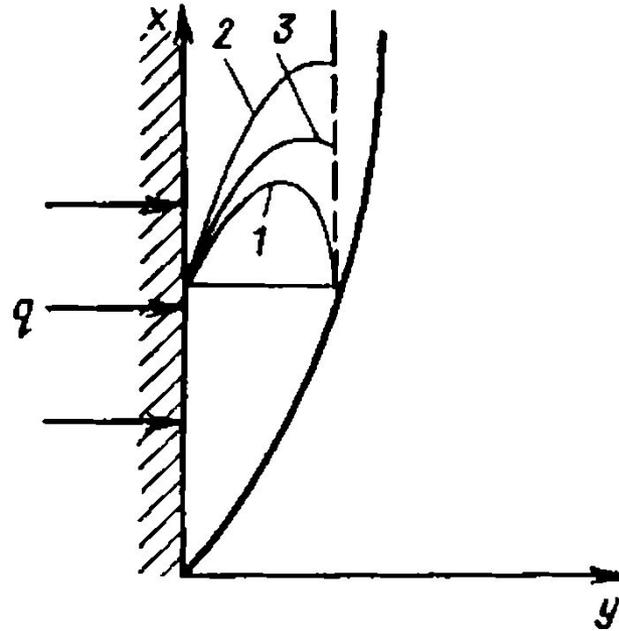
$$q_{кр} = Br (g \rho'' )^{0,5} \left[ \sigma (\rho' - \rho'') \right]^{0,25} \left[ 1 + \frac{C}{p_{кр}} \left( \frac{p_{кр}}{p} \right)^{0,4} \right],$$

где  $B=1,203$ ;  $C=4,5$  для развитого кипения;  $C=1,8$  для неустойчивого кипения;  $p_{кр}$  — критическое давление, МПа;  $\rho', \rho''$  — плотности жидкости и пара, кг/м<sup>3</sup>;  $\sigma$  — поверхностное натяжение, Н/м.

**Схема процесса пленочного кипения на горизонтальной поверхности:**

$1$  — теплопроводность;  $2$  — конвекция;  $3$  — излучение;  $\delta$  — средняя толщина паровой пленки;  $l_{кр}$  — критическая длина волны (колебания границы раздела фаз)





**Распределение скоростей в паровой пленке, движущейся при пленочном кипении на вертикальной поверхности:**

1 —  $W_{гр} = 0$ ; 2 —  $dW/dy=0$ ;  
3 —  $W$  — реальный случай

$$\frac{\partial W}{\partial \tau} + W \frac{\partial W}{\partial x} = -g - \frac{1}{\rho''} \frac{\partial p}{\partial x} + \frac{\mu''}{\rho''} \frac{\partial^2 W}{\partial y^2}$$

$$g(\rho' - \rho'') + \mu'' \frac{d^2 W}{dy^2} = 0.$$

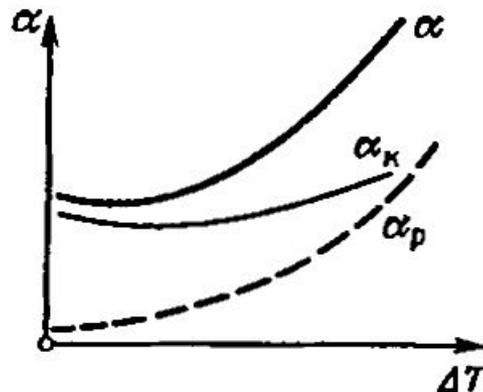
$$W = W_{\text{пр}} \frac{y}{\delta} + \frac{g(\rho' - \rho'')}{2\mu''} (\delta y - y^2).$$

$$q(x) = \rho'' \left[ r + \frac{c_p'' \Delta T}{2} \right] \int_0^{\delta(x)} W dy. \quad 1 + c_p'' \Delta T / 2r = \varphi$$

$$\delta(x) = \sqrt[3]{\frac{12\mu'' q x}{\varphi \rho'' g(\rho' - \rho'')}} \quad \text{при } W_{\text{пр}} = 0;$$

$$\delta(x) = \sqrt[3]{\frac{3\mu'' q x}{\varphi \rho'' g(\rho' - \rho'')}} \quad \text{при } \left. \frac{dW}{dy} \right|_{\delta} = 0.$$

$$\alpha_p = 5,67 \cdot 10^{-8} (T_{\text{ст}}^4 - T_s^4) / (1/\varepsilon_{\text{ст}} + 1/\varepsilon_s - 1)(T_{\text{ст}} - T_s);$$



$$\alpha(x) = \frac{\lambda'' \rho'' W_{\text{пр}} \varphi}{2q x}$$

Зависимость  $\alpha(\Delta t)$  для  
пленочного кипения  $\alpha = \alpha_k + \alpha_p$

**СПАСИБО ЗА ВНИМАНИЕ**