

энергомашиностроение.

6

Лекция №13

КОНВЕКТИВНЫЙ ТЕПЛООБМЕН ПРИ ВЫНУЖДЕННОМ ТЕЧЕНИИ ЖИДКОСТИ

- Теплообмен при вынужденном течении жидкости в трубах
- Теплообмен при поперечном обтекании труб
- Методы тепловой защиты тел от воздействия высокоэнтальпийного потока газа
- Теплообмен при течении разреженных газов

Теплообмен при вынужденном течении жидкости в трубах. Течение в каналах

Напорное (вынужденное) движение в трубах является основным в различного вида технических устройствах. В большинстве теплообменных аппаратов (котлах, пароперегревателях, конденсаторах, тепловыделяющих элементах атомных реакторов и т.п.) движение одного из теплоносителей осуществляется по цилиндрическим каналам. Поэтому знание основных закономерностей теплообмена при подобном течении теплоносителя необходимо для расчета и проектирования различных теплообменных аппаратов.

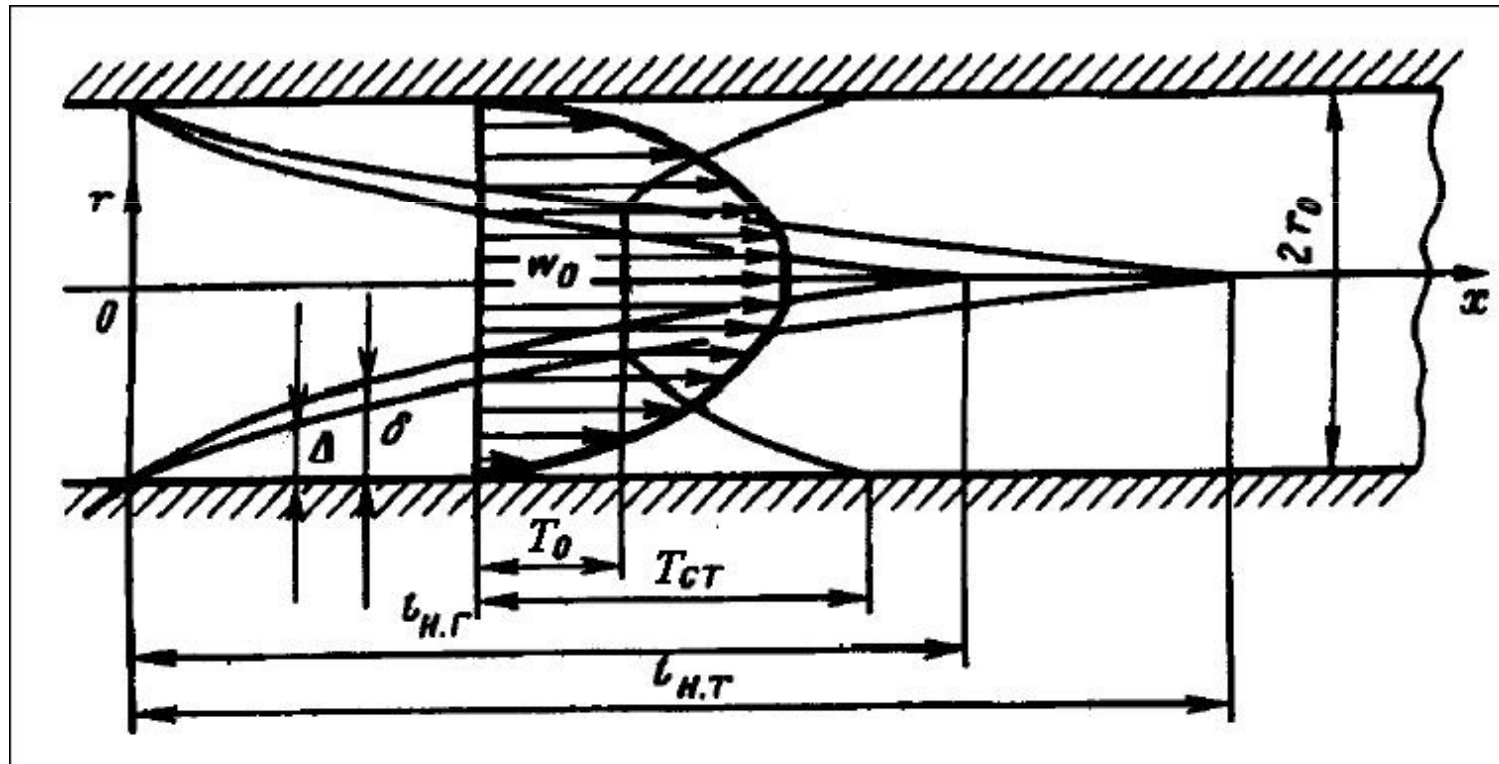


Рис. 34. Развитие динамического и теплового пограничных слоев в начальном участке трубы

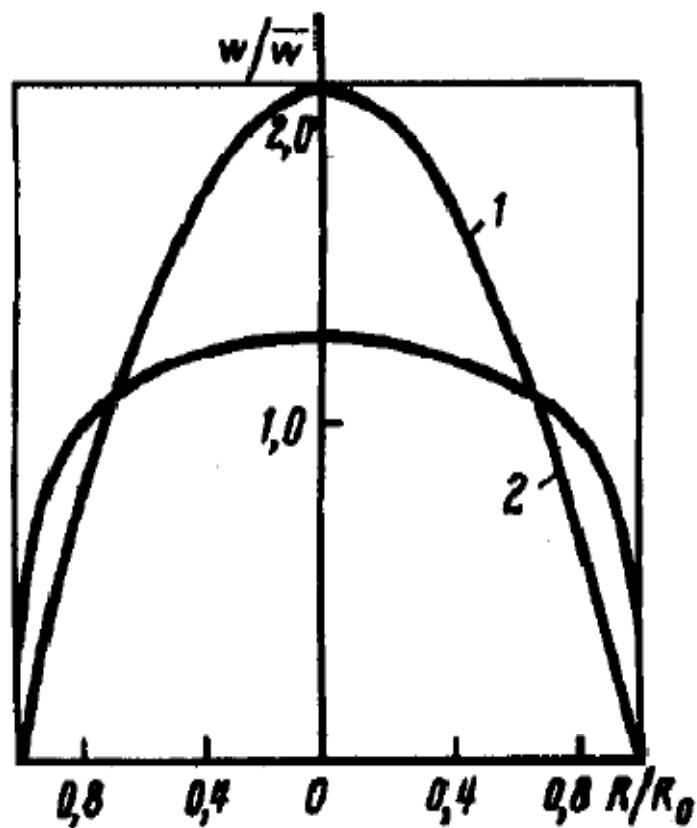


Рис. 35. Профили скоростей в трубе

$$\alpha_{cm} = \frac{q_{cm}}{t_0 - t_{cm}}$$

$$\text{при } \bar{t}_0 = \frac{2 \int_0^{r_0} c_p t w_x r dr}{c_p r_0^2 \bar{w}}$$

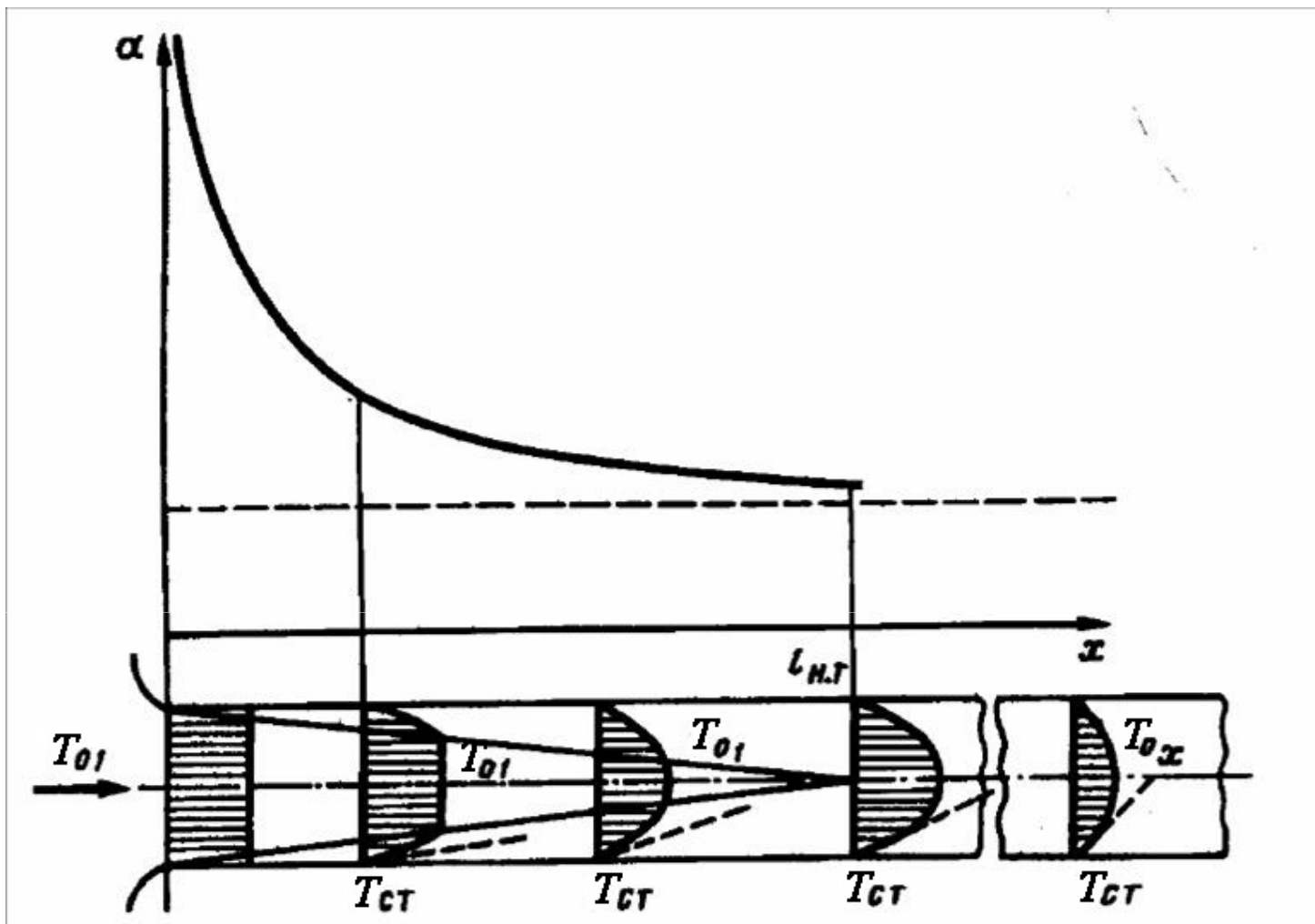


Рис. 36. Изменение коэффициента теплоотдачи по длине трубы

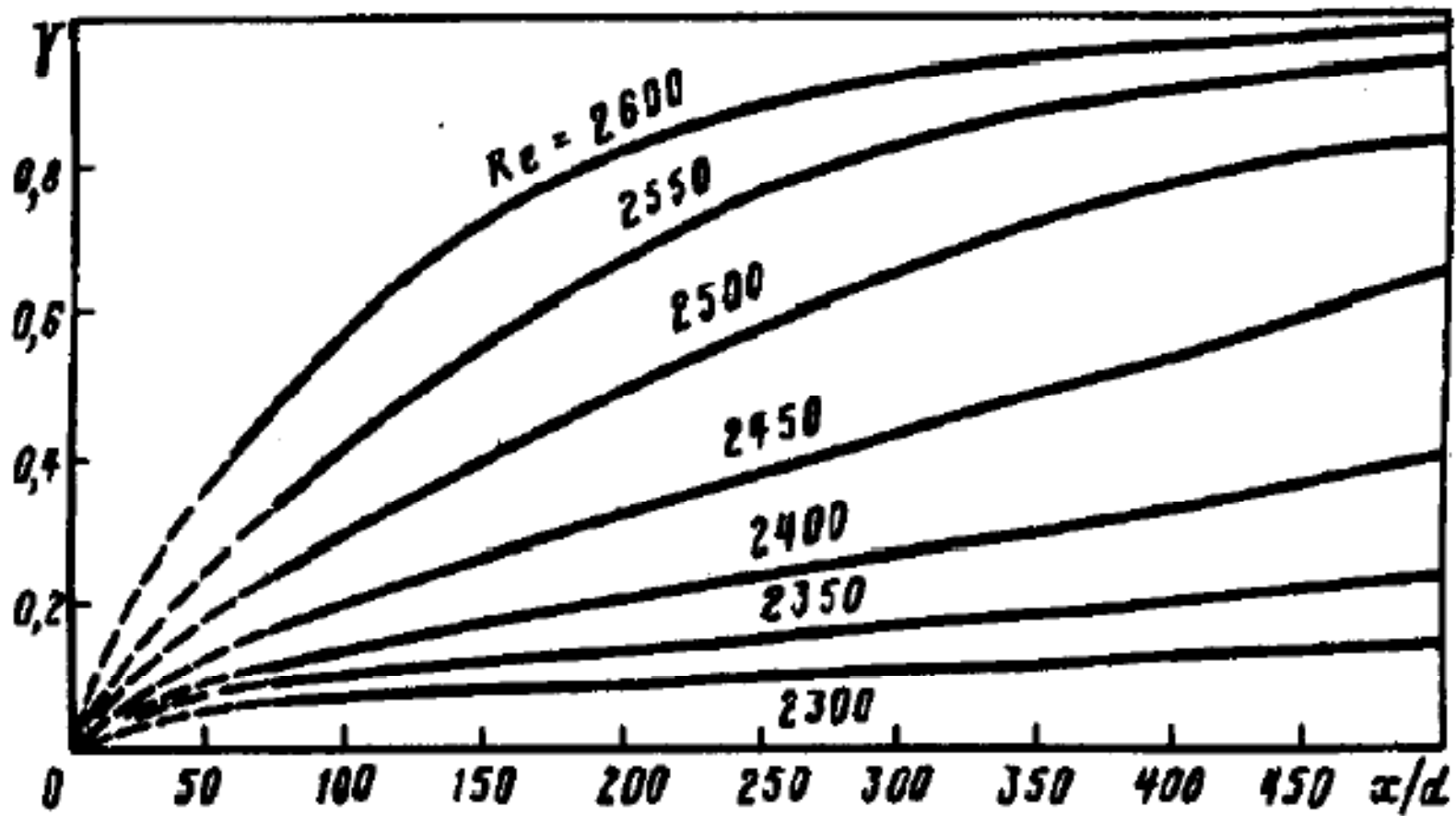


Рис. 37. Изменение коэффициента теплоотдачи по длине трубы

$$Re_{кр} = 1500(R / d)^{-0.3}$$

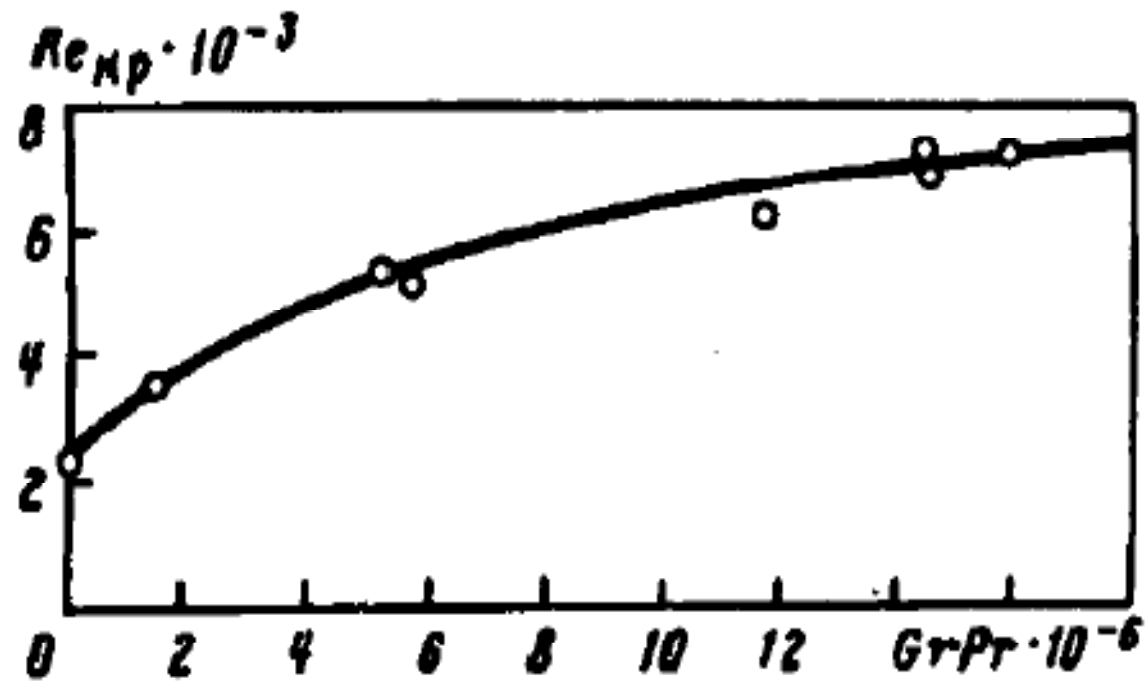


Рис. 38. Критическое число Рейнольдса в зависимости от числа Рэля при совпадении свободной и вынужденной конвекции

Теплообмен при вынужденном ламинарном течении жидкости в трубах

Изотермическое течение. Рассмотрим ламинарное течение жидкости с постоянными физическими свойствами в условиях гидродинамической стабилизации.

$$\frac{1}{r} \frac{d}{dr} \left(r \frac{dw_x}{dr} \right) = -\frac{1}{\mu} \frac{dp}{dx} \quad (284)$$

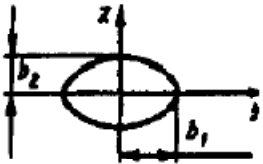
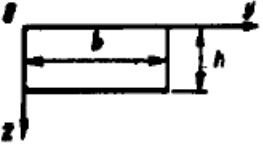
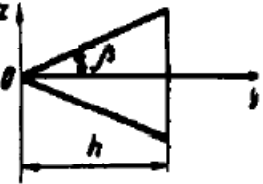
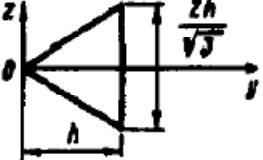
$$w_x = -\frac{1}{4\mu} \frac{dp}{dx} r^2 + C_1 \ln r + C_2 \quad (285)$$

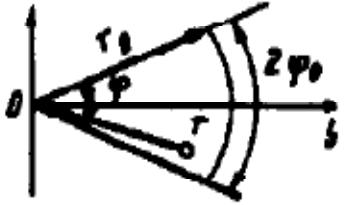
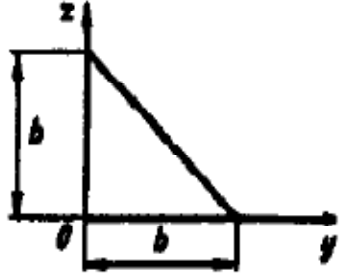
$$w_x = \frac{\Delta p}{4\mu l} (r_0^2 - r^2) \quad (286)$$

$$\bar{w} = \frac{1}{\pi r_0^2} \int_0^{r_0} 2\pi w r = -\frac{r_0^2}{8\mu} \frac{dp}{dx} \quad (287)$$

$$w = 2\bar{w} \left[1 - \left(\frac{r}{r_0} \right)^2 \right] \quad (288)$$

$$\frac{1}{r} \frac{\partial}{\partial r} (r\tau) = -\frac{dp}{dx} \quad (289)$$

Форма сечения	Уравнение
	$w_x = 2\bar{w} \left(1 - \frac{y^2}{b_1^2} - \frac{x^2}{b_2^2} \right)$
	$w_x = \frac{16\Delta p}{\pi^4 \mu l} \sum_{m=1,3,5}^{\infty} \sum_{n=1,3,5}^{\infty} \frac{\sin \frac{m\pi y}{b} \sin \frac{n\pi z}{h}}{mn \left(\frac{m^2}{b^2} - \frac{n^2}{h^2} \right)}$
	$w_x = 3\bar{w} \frac{(B+2)(x^2 - y^2 \operatorname{tg}^2 \beta)}{h^2 (B-2) \operatorname{tg}^2 \beta} \left[\left(\frac{y}{h} \right)^{B-2} - 1 \right]$ <p style="text-align: center;">где $B = \sqrt{4 + \frac{5}{2} \left(\frac{1}{\operatorname{tg}^2 \beta} - 1 \right)}$</p>
	$w_x = 45\bar{w} \left\{ \left(\frac{y}{h} - 1 \right) \left[\left(\frac{x}{h} \right)^2 - \frac{1}{3} \left(\frac{y}{h} \right)^2 \right] \right\}$

Форма сечения	Уравнение
	$w_x = -\frac{\Delta p}{4\mu l} \left\{ r^2 \left(1 - \frac{\cos 2\varphi}{\cos 2\varphi_0} \right) - \frac{16r_0^2 (2\varphi_0)^2}{\pi^3} \times \right.$ $\times \sum_{n=1,3,5}^{\infty} (-1)^{\frac{n+1}{2}} \left(\frac{r}{r_0} \right)^{\frac{n\pi}{2\varphi_0}} \frac{\cos \frac{n\pi}{2\varphi_0} \varphi}{n \left[n^2 - \left(\frac{4\varphi_0}{\pi} \right)^2 \right]} \left. \right\}$
	$w_x = \frac{16\Delta p b}{\pi^4 l \mu} \left[\sum_{m=1,3,5}^{\infty} \sum_{n=2,4,6}^{\infty} \frac{n \sin \frac{m\pi y}{b} \sin \frac{n\pi z}{b}}{m(n^2 - m^2)(n^2 + m^2)} + \right.$ $\left. + \sum_{m=2,4,6}^{\infty} \sum_{n=1,3,5}^{\infty} \frac{m \sin \frac{m\pi y}{l} \sin \frac{n\pi z}{b}}{n(m^2 - n^2)(m^2 + n^2)} \right]$

$$\mu \nabla^2 w = dp / dx$$

$$\tau_0 = C_f \rho \bar{w}^2 / 2$$

$$\frac{C_f}{C_{f_{id}}} = \left\{ 1 - \left[1 - \left(\frac{11.6}{\text{Re} \sqrt{r_0 / R}} \right)^{0.45} \right]^{2.22} \right\}^{-1} \quad (293)$$

Теплообмен в цилиндрической трубе при гидравлически стабилизированном течении.

Рассмотрим ламинарное стабилизированное течение жидкости в круглой трубе при постоянной температуре стенки по длине трубы. Заданными являются расход жидкости, температура стенки и температура на входе в трубу. В такой постановке задача была решена Нуссельтом. Задачу будем решать при следующих условиях:

- 1) процесс теплообмена принимаем стационарным ($dt/dT = 0$);
- 2) жидкость считаем несжимаемой и ее физические свойства принимаем постоянными, т.е. не зависящими от температуры;
- 3) считаем, что в потоке отсутствуют внутренние источники теплоты, а теплота трения пренебрежимо мала;
- 4) пренебрегаем тепловым потоком вдоль трубы вследствие теплопроводности жидкости по сравнению с конвективным тепловым потоком.

$$w_x \frac{\partial t}{\partial x} + w_r \frac{\partial t}{\partial r} + \frac{w_\varphi}{r} \frac{\partial t}{\partial \varphi} = a \left(\frac{\partial^2 t}{\partial x^2} + \frac{1}{r} \frac{\partial t}{\partial r} + \frac{\partial^2 t}{\partial r^2} + \frac{1}{r^2} \frac{\partial^2 t}{\partial \varphi^2} \right) \quad (294)$$

$$w_x = 2\bar{w}(1 - r^2 / r_0^2); w_r = w_x = 0$$

$$\frac{\partial^2 \vartheta}{\partial r^2} + \frac{1}{r} \frac{\partial \vartheta}{\partial r} = \frac{2\bar{w}}{a} \left[1 - \left(\frac{r}{r_0} \right)^2 \right] \frac{\partial \vartheta}{\partial x}$$

$$\frac{\partial^2 \theta}{\partial R^2} + \frac{1}{R} \frac{\partial \theta}{\partial R} = (1 - R^2) \frac{\partial \theta}{\partial X} \quad (295)$$

Граничные условия

$$\theta = 1 \quad \text{при} \quad X = 0, 0 \leq R \leq 1; \quad (296)$$

$$\frac{\partial \theta}{\partial R} = 0 \quad \text{при} \quad X \geq 0, R = 0; \quad (297)$$

$$\theta = 0 \quad \text{при} \quad X \geq 0, R = 1; \quad (298)$$

$$\theta(X, R) = \varphi(X) \psi(R)$$

$$\varphi \psi'' + \frac{1}{R} \varphi \psi' = (1 - R^2) \psi \varphi' \quad (299)$$

$$\frac{d\varphi}{dX} = -\varepsilon^2 \varphi$$

$$\varphi = A e^{-\varepsilon^2 X} \quad (300)$$

$$\frac{d^2 \psi}{dR^2} + \frac{1}{R} \frac{d\psi}{dR} + \varepsilon^2 (1 - R^2) \psi = 0 \quad (301)$$

$$\psi = \sum_{n=0}^{\infty} b_n \xi^n$$

$$\sum_{n=0}^{\infty} n(n-1) b_n \xi^{n-2} + \sum_{n=0}^{\infty} n b_n \xi^{n-2} + \left(1 - \frac{\xi^2}{\varepsilon^2}\right) \sum_{n=0}^{\infty} b_n \xi^n = 0$$

$$\sum_{n=0}^{\infty} n^2 b_n \xi^{n+2} + \sum_{n=0}^{\infty} b_n \xi^n - \sum_{n=0}^{\infty} \frac{b_n}{\varepsilon^2} \xi^{n+2} = 0$$

$$\sum_{n=0}^{\infty} (k+2) b_{k+2} \xi^k + \sum_{n=0}^{\infty} b_k \xi^k - \sum_{n=0}^{\infty} \frac{b_{k-2}}{\varepsilon^2} \xi^k = 0$$

$$b_1 \xi^{-1} + (4b_2 + b_0) + (9b_3 + b_1)\xi + \sum_{n=0}^{\infty} \left[(k+2)^2 b_{k+2} + b_k - \frac{b_{k-2}}{\varepsilon^2} \right] \xi^k = 0$$

$$b_1 = 0; b_2 = -b_0/4; b_3 = -b_1/9 = 0$$

$$b_{k+2} = \frac{1}{(k+2)^2} \left(\frac{b_{k-2}}{\varepsilon^2} - b_k \right) \quad (k \geq 2)$$

$$\psi(\varepsilon R) = \sum_{n=0}^{\infty} b_{2n} (\varepsilon R)^{2n} \quad (302)$$

$$b_2 = b_0/4 = -1/4 \quad (n=1)$$

$$b_{2n} = \frac{1}{(2n)^2} \left(\frac{1}{\varepsilon^2} b_{2n-4} - b_{2n-2} \right) \quad (n \geq 2)$$

$$\psi(R) = 1 - \frac{1}{4} (\varepsilon R)^2 + \frac{1}{16} \left(\frac{1}{\varepsilon^2} + \frac{1}{4} \right) (\varepsilon R)^4 + \dots \quad (303)$$

$$1 - \frac{1}{4}(\varepsilon)^2 + \frac{1}{16}\left(\frac{1}{\varepsilon^2} + \frac{1}{4}\right)(\varepsilon)^4 + \dots = 0 \quad (304)$$

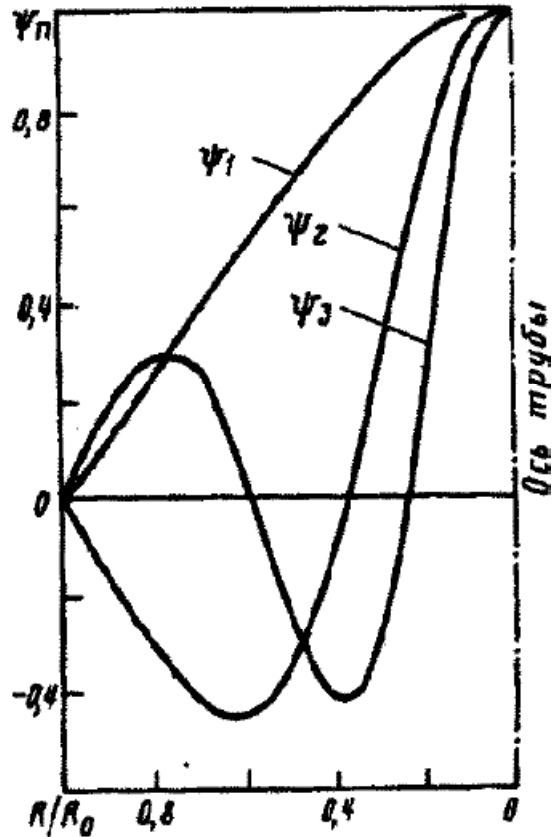


Рис. 39. Графики функций

$$\theta_n = A_n e^{-\varepsilon_n^2 X} \psi_n(R)$$

$$\theta = \sum_{n=0}^{\infty} A_n e^{-\varepsilon_n^2 X} \psi_n(R) \quad (305)$$

$$\theta_0(R) = \sum_{n=0}^{\infty} A_n \psi_n(R) \quad (306)$$

$$1 = A_0 \psi_0(R) + A_1 \psi_1(R) + \dots + A_n \psi_n(R) + \dots + A_m \psi_m(R) + \dots$$

$$\frac{d}{dR} \left(R \frac{d\psi_n}{dR} \right) + \varepsilon_n^2 R(1-R^2) \psi_n = 0 \quad (307)$$

$$\frac{d}{dR} \left(R \frac{d\psi_m}{dR} \right) + \varepsilon_m^2 R(1-R^2) \psi_m = 0$$

$$\psi_n \frac{d}{dR} \left(R \frac{d\psi_m}{dR} \right) - \psi_m \frac{d}{dR} \left(R \frac{d\psi_n}{dR} \right) = (\varepsilon_n^2 - \varepsilon_m^2) R(1-R^2) \psi_n \psi_m$$

$$\frac{d}{dR} \left[R \left(\psi_n \frac{d\psi_m}{dR} - \psi_m \frac{d\psi_n}{dR} \right) \right]$$

$$(\varepsilon_n^2 - \varepsilon_m^2) \int_0^1 \psi_n \psi_m R(1-R^2) dR = R \left(\psi_n \frac{d\psi_m}{dR} - \psi_m \frac{d\psi_n}{dR} \right) \Big|_0^1 \quad (308)$$

$$\psi_n(1) = \psi_m(1) = 0$$

$$\int_0^1 \psi_n \psi_m R(1-R^2) dR = 0$$

$$A_n = \frac{\int_0^1 \theta_0(R) \psi_n(R) (1-R^2) dR}{\int_0^1 \psi_n^2(R) R(1-R^2) dR} \quad (309)$$

$$\int_0^1 \psi_n(R) R(1-R^2) dR = -\frac{1}{\epsilon_n^2} \left(\frac{d\psi_n}{dR} \right)_{R=1} \quad (310)$$

$$\int_0^1 \psi_n^2(R) R(1-R^2) dR$$

$$N_n = \lim_{\varepsilon \rightarrow \varepsilon_n} \int_0^1 \psi_n \psi R(1-R^2) dR = \lim_{\varepsilon \rightarrow \varepsilon_n} \frac{R \left(\psi_n \frac{d\psi}{dR} - \psi \frac{d\psi_n}{dR} \right)}{\varepsilon_n^2 - \varepsilon^2}$$

$$N_n = \int_0^1 \psi_n^2 R(1-R^2) dR = \frac{1}{2\varepsilon_n} \left[\frac{d\psi_n}{dR} \left(\frac{d\psi}{d\varepsilon} \right)_{\varepsilon=\varepsilon_n} \right]_{R=1} \quad (311)$$

$$A_n = -\frac{2}{\varepsilon_n} \left(\frac{\partial \phi}{\partial \varepsilon} \right)_{\varepsilon=\varepsilon_n; R=1} \quad (312)$$

$$\frac{T - T_{\tilde{n}\dot{\delta}}}{T_0 - T_{\tilde{n}\dot{\delta}}} = \sum_{n=0}^{\infty} A_n \psi_n \left(\frac{r}{r_0} \right) \exp \left(-2\varepsilon_n^2 \frac{X}{Ped} \right) \quad (313)$$

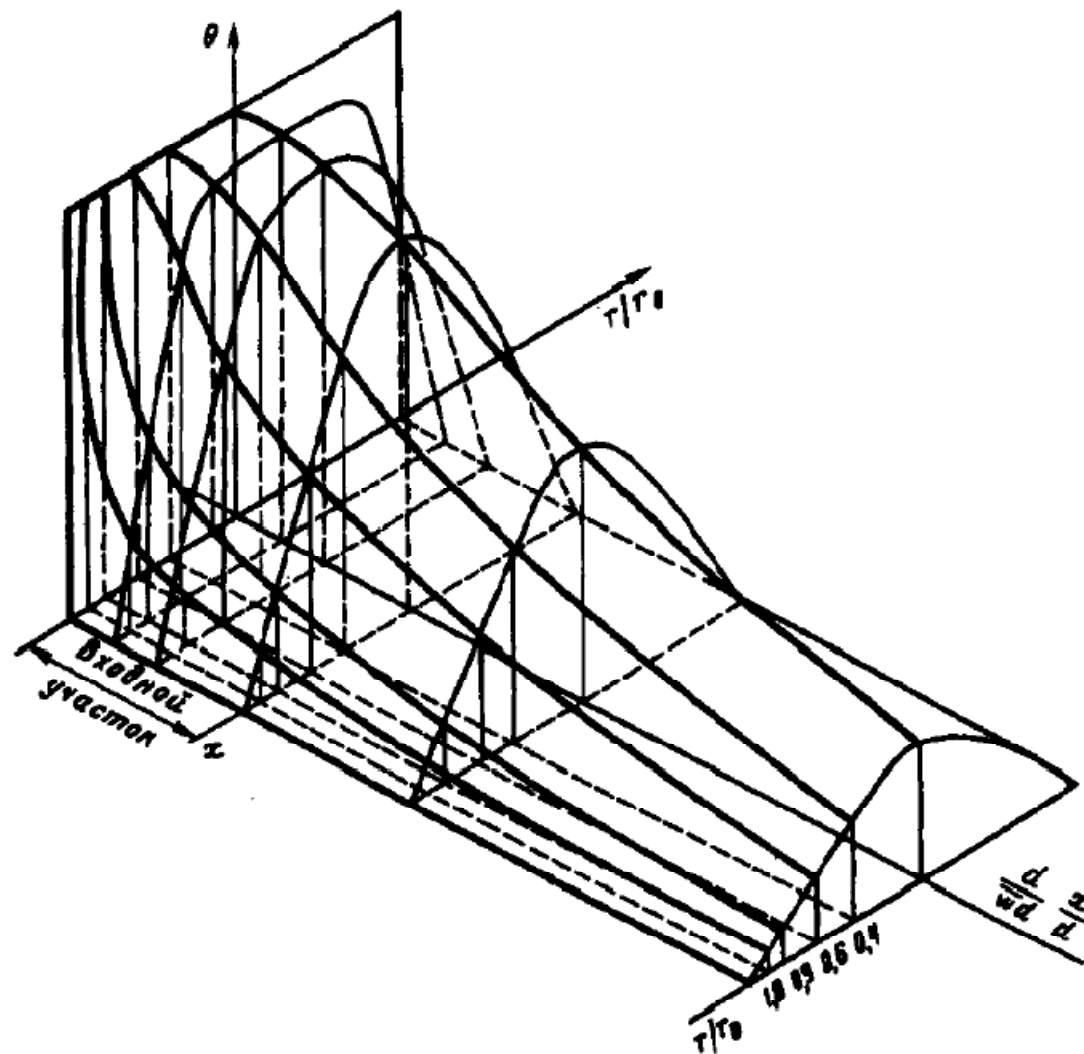


Рис. 40. Распределение температуры в трубе по Нуссельту

$$\varepsilon_n = 4n + 8/3 \quad (314)$$

$$A_n = (-1)^n 2.84606 \varepsilon_n^{-\frac{2}{3}} \quad (315)$$

$$\psi_n = f_0(\varepsilon_n R) \quad (316)$$

$$\psi_n(R) = \sqrt{\frac{2 \cos \left[\frac{\varepsilon_n}{2} R \sqrt{1-R^2} + \frac{\varepsilon_n}{2} \arcsin R - \frac{\pi}{4} \right]}{\pi \varepsilon_n R (2-R^2)^{1/4}}} \quad (317)$$

$$\psi_n(R) = \sqrt{\frac{2}{3}} (1-R) (-1)^{n'} J_{1/3} \left[\frac{\varepsilon_n \sqrt{8}}{3} (1-R)^{3/2} \right] \quad (318)$$

$$B_n = -\frac{1}{2} A_n \left(\frac{d\psi_n}{dR} \right)_{R=0} = 1.01276 \varepsilon_n^{-1/3} \quad (319)$$

$$\theta = A_0 \psi_0 \left(\frac{r}{r_0} \right) \exp \left(-2 \varepsilon_0^2 \frac{1}{Pe} \frac{1}{X} \right) \quad (320)$$

$$\bar{T} = \frac{1}{\pi r_0^2 w_0} = \int_0^{r_0} T w_x 2\pi r dr$$

$$\bar{\theta} = 2 \int_0^1 \theta w_x R dR = 4 \int_0^1 \theta (1 - R^2) R dR$$

$$\bar{\theta} = 4 \sum_{n=0}^{\infty} A_n \exp\left(-2\varepsilon_n^2 \frac{1}{Pe} \frac{X}{d}\right) \int_0^1 \psi_n(R) R (1 - R^2) dR$$

$$\bar{\theta} = 8 \sum_{n=0}^{\infty} \frac{B_n}{\varepsilon_n^2} \exp\left(-2\varepsilon_n^2 \frac{1}{Pe} \frac{X}{d}\right) \quad (321)$$

$$B_n = -\frac{1}{2} A_n \left(\frac{d\psi_n}{dR} \right)_{R=1}$$

$$\alpha = \frac{q_{cm}}{T_{cm} - \bar{T}} = \frac{\lambda \left(\frac{\partial T}{\partial r} \right)_{r=r_0}}{\bar{T} - T_{cm}}$$

$$Nu = \frac{\alpha d}{\lambda} = -\frac{2}{\theta} \left(\frac{\partial \theta}{\partial R} \right)_{R=1} = 2 \left[\frac{\partial}{\partial R} \left(\frac{T - T_{cm}}{T_0 - T_{cm}} \right) \right]_{R=1} =$$

$$= \frac{\sum_{n=0}^{\infty} B_n \exp \left(-2\varepsilon_n^2 \frac{1}{Pe} \frac{X}{d} \right)}{2 \sum_{n=0}^{\infty} \frac{B_n}{\varepsilon_n^2} \exp \left(-2\varepsilon_n^2 \frac{1}{Pe} \frac{X}{d} \right)} \quad (322)$$

при $X \rightarrow 0$ $Nu_0 \rightarrow \infty$ (323)

при $X \rightarrow \infty$ $Nu_{\infty} = \varepsilon_0^2 / 2 = 3.657$

$$l_{н.т.} / d = 0.055 Pe \quad (324)$$

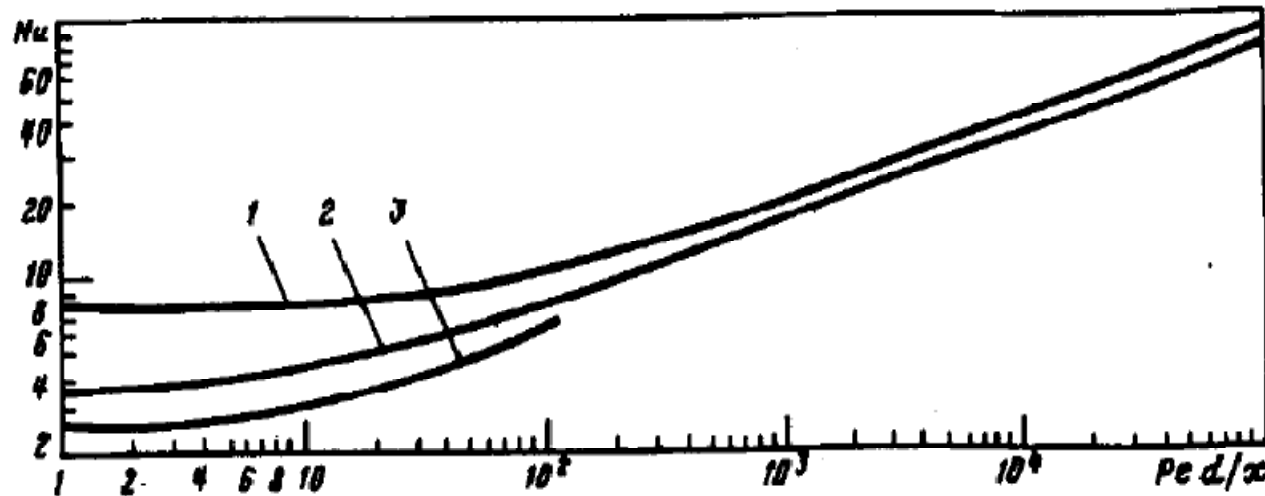


Рис. 41.
Зависимость числа
Nu от комплекса
 $Pe(d/x)$ при
ламинарном
течении:
1 - плоская щель; 2 -
круглая труба; 3 -
равносторонний
треугольник

при $\frac{1}{Pe d} \frac{x}{d} < 10^{-4}$

$$Nu = 1.077 \left(\frac{1}{Pe d} \frac{x}{d} \right)^{1/3} - 1.7 \quad (325)$$

а при $\frac{1}{Pe d} \frac{x}{d} \geq 10^{-3}$ с точностью $\pm 0.5\%$ (326)

$$Nu = 3.655 + 0.2355 / \left[\left(\frac{x}{Re d} \right)^{0.488} \exp \left(57.2 \frac{x}{Re d} \right) \right]$$

$$\bar{\alpha} = \frac{1}{l} \int_0^l \alpha dx$$

$$\alpha dx = - \frac{\bar{w} d \rho c_p}{4} \frac{d\bar{\vartheta}}{\bar{\vartheta}}$$

$$\bar{\alpha} = - \frac{\bar{w} d \rho c_p}{4} \int_{\bar{\vartheta}_0}^{\bar{\vartheta}_{x=1}} \frac{d\bar{\vartheta}}{\bar{\vartheta}} = - \frac{\bar{w} d \rho c_p}{4} \ln \frac{\bar{\vartheta}_{x=1}}{\bar{\vartheta}_0}$$

$$\overline{Nu} = \frac{\overline{\alpha d}}{\lambda} = -\frac{1}{4} \operatorname{Re} \frac{d}{l} \ln \overline{\theta}_{x=1}$$

$$Nu = -\frac{1}{4} \operatorname{Re} \frac{d}{l} \ln \left[8 \sum_{n=0}^{\infty} \frac{B_n}{\varepsilon_n^2} \exp \left(-2\varepsilon_n^2 \frac{1}{Pe} \frac{l}{d} \right) \right] \quad (327)$$

$$\overline{Nu} = 3.66 + \frac{0.668 Ped / l}{1 + 0.04(Ped / l)^{2/3}} \quad (328)$$

$$T_m = T_0 + \frac{2q_{cm}x}{\rho c_p w r_0}$$

$$\theta = \frac{T_m - T_0}{q_{cm} d / \lambda} = \frac{4}{Pe} \frac{x}{d} \quad (329)$$

$$\frac{\partial^2 \theta}{\partial R^2} + \frac{1}{R} \frac{\partial \theta}{\partial R} = (1 - R^2) \frac{\partial \theta}{\partial R} \quad (330)$$

$$\theta = 0 \quad \text{при} \quad X = 0, 0 < R < 1; \quad (331)$$

$$\frac{\partial \theta}{\partial R} = 0 \quad \text{при} \quad X \geq 0, R = 0;$$

$$\frac{\partial \theta}{\partial R} = \frac{1}{2} \quad \text{при} \quad X \geq 0, R = 1. \quad (332)$$

$$\theta = AX + f(R) \tag{333}$$

$$\frac{d}{dR} \left(R \frac{df}{dR} \right) = A(1 - R^2)R$$

$$df / dR = A(R / 2 - R^3 / 4)$$

$$f(R) = R^2 / 2 - R^4 / 4 + C$$

$$\theta = 2X + R^2 / 2 - R^4 / 8 + C \tag{334}$$

$$\bar{\theta} = 4 \int_0^1 \theta (1 - R^2) R dR$$

$$\theta = \frac{4}{Pe} \frac{x}{d} + \frac{1}{2} R^2 - \frac{1}{8} R^4 - \frac{7}{48} \tag{337}$$

$$\theta_{cm} = \theta_{R=1} = \frac{1}{Pe} \frac{x}{d} + \frac{11}{48} \tag{336}$$

$$Nu_d = \frac{q_{cm} d}{(T_{cm} - \bar{T}) \lambda} = (\theta_{cm} - \theta)^{-1} = \frac{48}{11} \cong 4.36 \quad (337)$$

$$\theta_1 = \theta - \theta_* \quad (338)$$

$$\frac{\partial^2 \theta_1}{\partial R^2} + \frac{1}{R} \frac{\partial \theta_1}{\partial R} = (1 - R^2) \frac{\partial \theta_1}{\partial R} \quad (339)$$

Граничные условия

$$\theta_1 = -(R^2 / 2 - R^4 / 8 - 7 / 48) \quad \text{при} \quad X = 0, 0 < R < 1$$

$$\frac{\partial \theta_1}{\partial R} = 0 \quad \text{при} \quad X \geq 0, R = 0, R = 1 \quad (341)$$

$$\theta_1 = \sum_{n=1}^{\infty} A_n \psi_n(R) \exp(-\varepsilon_n^2 X) \quad (342)$$

$$\theta = \theta_* + \theta_1 = \frac{4}{Pe d} \frac{x}{2} + \frac{1}{2} R^2 - \frac{1}{8} R^4 - \frac{7}{48} + \sum_{n=1}^{\infty} A_n \psi_n(R) \exp(-\varepsilon_n^2 \frac{1}{Pe d} \frac{x}{d})$$

$$\theta_{cm} = \frac{4}{Pe} \frac{x}{d} + \frac{11}{48} + \sum_{n=1}^{\infty} A_n \psi_n(1) \exp\left(-\varepsilon_n^2 \frac{1}{Pe}\right) \quad (343)$$

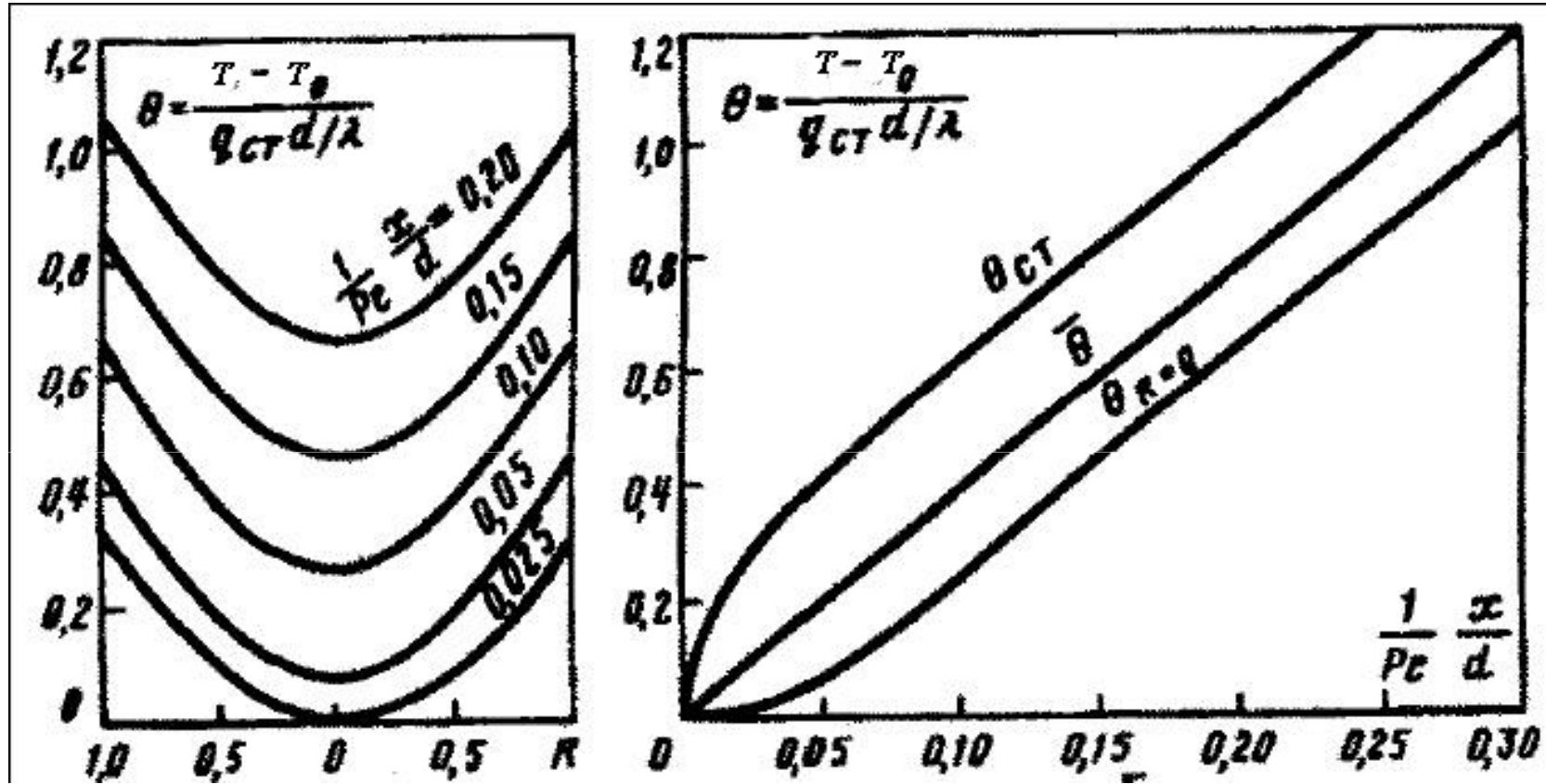


Рис. 42. Распределение температуры по радиусу (а) и длине трубы (б) при $q_{ст} = \text{const}$

$$Nu = \frac{q_{cm} d}{(T_{cm} - \bar{T}) \lambda} = (\theta_{cm} - \bar{\theta})^{-1}$$

$$Nu = 1 / \left[\frac{11}{48} + \sum_{n=1}^{\infty} A_n \psi_n(1) \exp\left(-\varepsilon_n^2 \frac{1}{Pe} \frac{x}{d}\right) \right] \quad (344)$$

$$l_{h.m.} / d = 0.07 Pe \quad (345)$$

$$Nu = 1.31 \left(\frac{1}{Pe} \frac{x}{d} \right)^{-1/3} \left(1 + 2 \frac{1}{Pe} \frac{x}{d} \right) \quad (346)$$

$$\frac{Nu}{Nu_{cm\delta}} = 0.35 \left(\frac{1}{Re} \frac{x}{d} \right)^{-1/6} \left[1 + 2.85 \left(\frac{1}{Re} \frac{x}{d} \right)^{0.42} \right] \quad (347)$$

$$\frac{1}{r} \frac{\partial}{\partial r} \left(r \frac{\partial T}{\partial r} \right) + \frac{1}{r^2} \frac{\partial^2 T}{\partial \varphi^2} = \frac{w}{a} \frac{\partial T}{\partial x} = \frac{w}{a} \frac{dT_m}{dx} \quad (348)$$

$$Nu(\varphi) = (1 + \cos \varphi) / \left(\frac{11}{48} + \frac{b}{2} \cos \varphi \right) \quad (349)$$

$$\vartheta = \frac{q_{cm_0} d}{\lambda} \theta^+(R, x) + \sum_{i=1}^{x/\Delta\xi} \frac{q_{cm_i} d}{\lambda} \theta^+(R, x - \xi_i)$$

$$\frac{1}{r} \frac{\partial}{\partial r} \left(r \frac{\partial T}{\partial r} \right) = \frac{w}{a} \left(\frac{dT_m}{dx} \right) \quad (354)$$

$$\frac{\mu}{r} \frac{\partial}{\partial r} \left(r \frac{\partial w}{\partial r} \right) = \frac{dp}{dx}$$

$$\frac{w}{M} = \frac{2}{M} \left[1 - \left(\frac{r}{r_1} \right)^2 + B \ln \frac{r}{r_1} \right] \quad (355)$$

$$\frac{\mu}{r} \frac{\partial}{\partial r} \left(r \frac{\partial w}{\partial r} \right) = \frac{2\bar{w}}{aM} \left[1 - \left(\frac{r}{r_1} \right)^2 + B \ln \frac{r}{r_1} \right] \frac{dT_m}{dx} \quad (356)$$

$$Nu = \frac{5.385}{1 - 0.346(q_2 / q_1)} \quad (357)$$

$$\nabla^2 T = \frac{\partial^2 T}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 T}{\partial T^2} = \frac{w}{a} \frac{\partial T}{\partial x}$$

$$\mu \nabla^2 w = \frac{dp}{dx}$$

Теплообмен стабилизированного участка трубы с учетом теплоты трения. Рассмотрим стабилизированное ламинарное течение в плоской щели. Движущая среда предполагается несжимаемой, а физические константы - независимыми от температуры. В этих условиях уравнение энергии для плоского стационарного течения имеет вид

$$\rho c_p \left(w_x \frac{\partial \vartheta}{\partial x} + w_y \frac{\partial \vartheta}{\partial y} \right) = \lambda \left(\frac{\partial^2 \vartheta}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 \vartheta}{\partial y^2} \right) + \mu \text{Diss} F(w_y, w_x)$$

$$\lambda \frac{\partial^2 \vartheta}{\partial y^2} = -\mu \left(\frac{\partial \vartheta}{\partial y} \right)^2 \quad (358)$$

$$w(y) = \frac{3}{2} \bar{w} \left(1 - \frac{y^2}{s^2} \right) \quad (359)$$

$$\lambda \frac{d^2 \vartheta}{dy^2} = -9 \frac{\mu \bar{w}^{-2}}{s^4} y^2$$

$$\vartheta(y) = \frac{1}{2}(\vartheta_1 + \vartheta_2) - \frac{1}{2}(\vartheta_1 - \vartheta_2)\frac{y}{s} + \frac{3}{4}\frac{\mu}{\lambda}\frac{\overline{w}}{w}\left(1 - \frac{y^4}{s^4}\right) \quad (361)$$

$$q_1 = \lambda \frac{\vartheta_2 - \vartheta_1}{2s} + 3\frac{\mu\overline{w}^{-2}}{s} \quad (362)$$

$$q_2 = \lambda \frac{\vartheta_2 - \vartheta_1}{2s} + 3\frac{\mu\overline{w}^{-2}}{s} \quad (363)$$

$$q = q_1 + q_2 = 6\frac{\mu\overline{w}^{-2}}{s} \quad (364)$$

$$6\frac{\mu\overline{w}^{-2}}{s} \geq (\vartheta_2 - \vartheta_1) \quad (365)$$

$$\vartheta_{\max} - \vartheta_2 = \frac{3}{4}\frac{\mu\overline{w}^{-2}}{s} \quad (366)$$

$$\vartheta(y) - \vartheta_2 = \frac{3}{4}\frac{\mu\overline{w}^{-2}}{s}\left(5 - 4\frac{y}{s} - \frac{y^4}{s^4}\right) \quad (367)$$

$$T_{a\partial} = T_{cm2} + 6\frac{\mu\overline{w}^{-2}}{\lambda} \quad (368)$$

Теплообмен в круглой трубе и влияние естественной конвекции. Рассмотрим стабилизированное течение жидкости в вертикальной круглой трубе при постоянной тепловой нагрузке по длине трубы

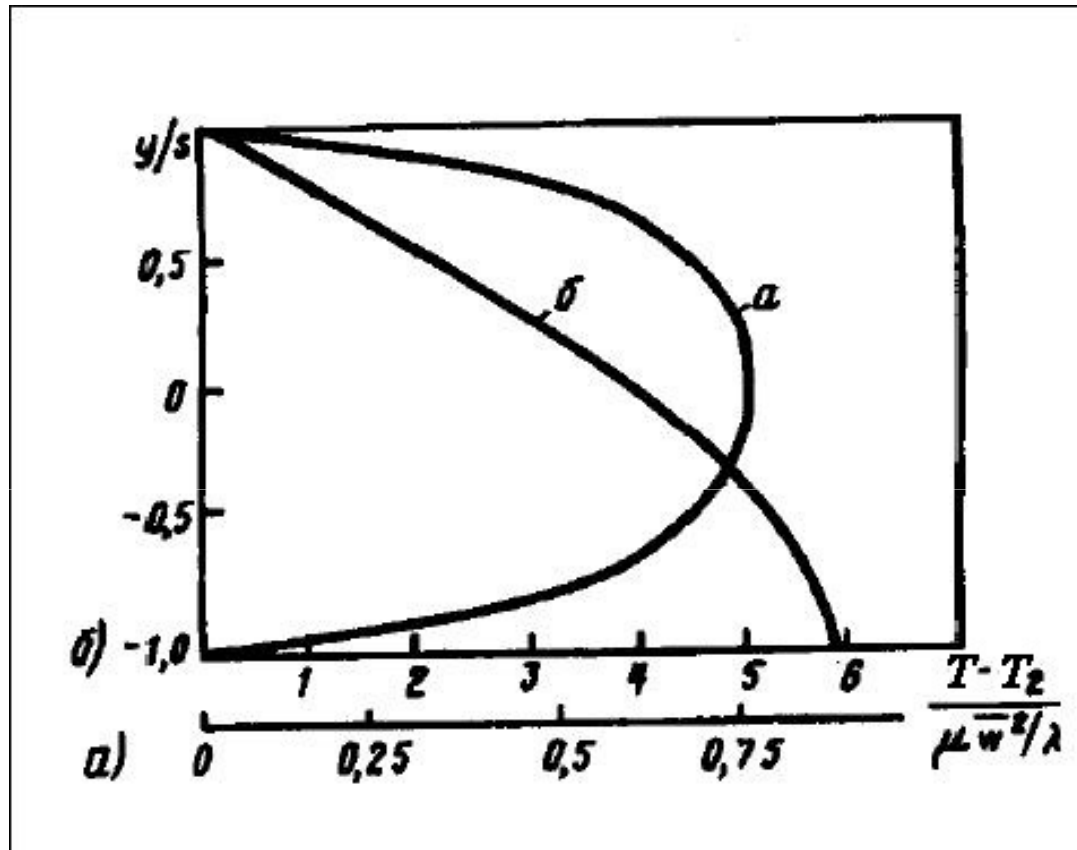


Рис. 44. Распределение температуры в плоской щели с учетом теплоты трения:
 а - теплопроводные стенки; б - нижняя стенка теплоизолирована

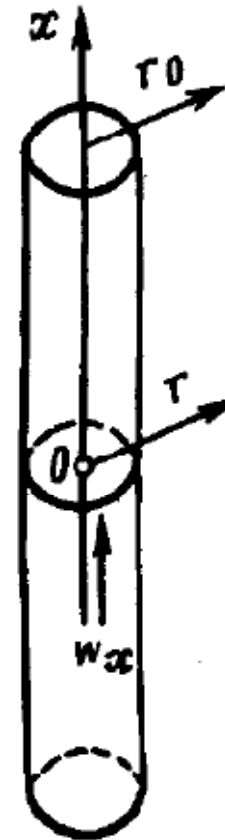


Рис 45. К задаче о теплообмене при совместном действии вынужденной и свободной конвекции

$$w_x \frac{\partial T}{\partial x} = a \left(\frac{\partial^2 T}{\partial r^2} + \frac{1}{r} \frac{\partial T}{\partial r} \right) \quad (369)$$

$$-\rho g - \frac{\partial p}{\partial x} + \mu \left(\frac{\partial^2 w_x}{\partial r^2} + \frac{1}{r} \frac{\partial w_x}{\partial r} \right) = 0 \quad (370)$$

$$\frac{\partial p}{\partial r} = 0 \quad (371)$$

$$\rho = \rho_{cm} [1 - \beta(T - T_{cm})] \quad (372)$$

$$\frac{\partial T}{\partial r} = 2q_{cm} / (\rho c_p \bar{w} r_0) = \text{const} = A \quad (373)$$

$$\frac{\partial^2 \vartheta}{\partial r^2} + \frac{1}{r} \frac{\partial \vartheta}{\partial r} = \frac{A}{a} w_x \quad (374)$$

$$\beta g \vartheta - \frac{1}{\rho_{cm}} \left(\frac{dp}{dx} + \rho_{cm} g \right) + \nu \left(\frac{d^2 w_x}{dr^2} + \frac{1}{r} \frac{dw_x}{dr} \right) = 0 \quad (375)$$

Граничные условия

$$w_x = 0 \quad \text{при} \quad r = r_0, \vartheta = 0 \quad (376)$$

$$\frac{dw_x}{dr} = 0 \quad \text{при} \quad r = 0, \frac{d\vartheta}{dr} = 0$$

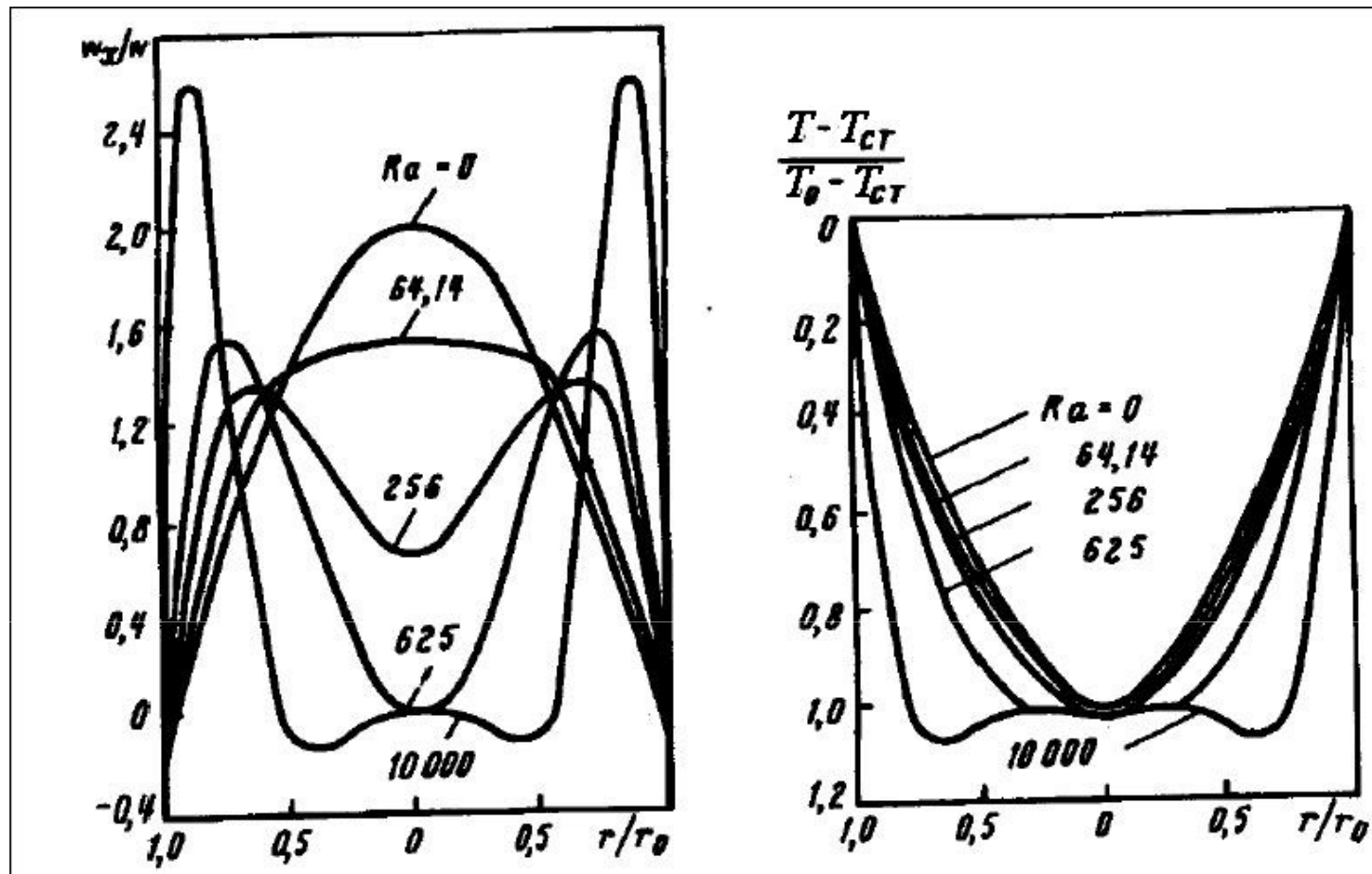


Рис. 46. Распределение скорости и температуры по радиусу трубы при различных числах Рэлея

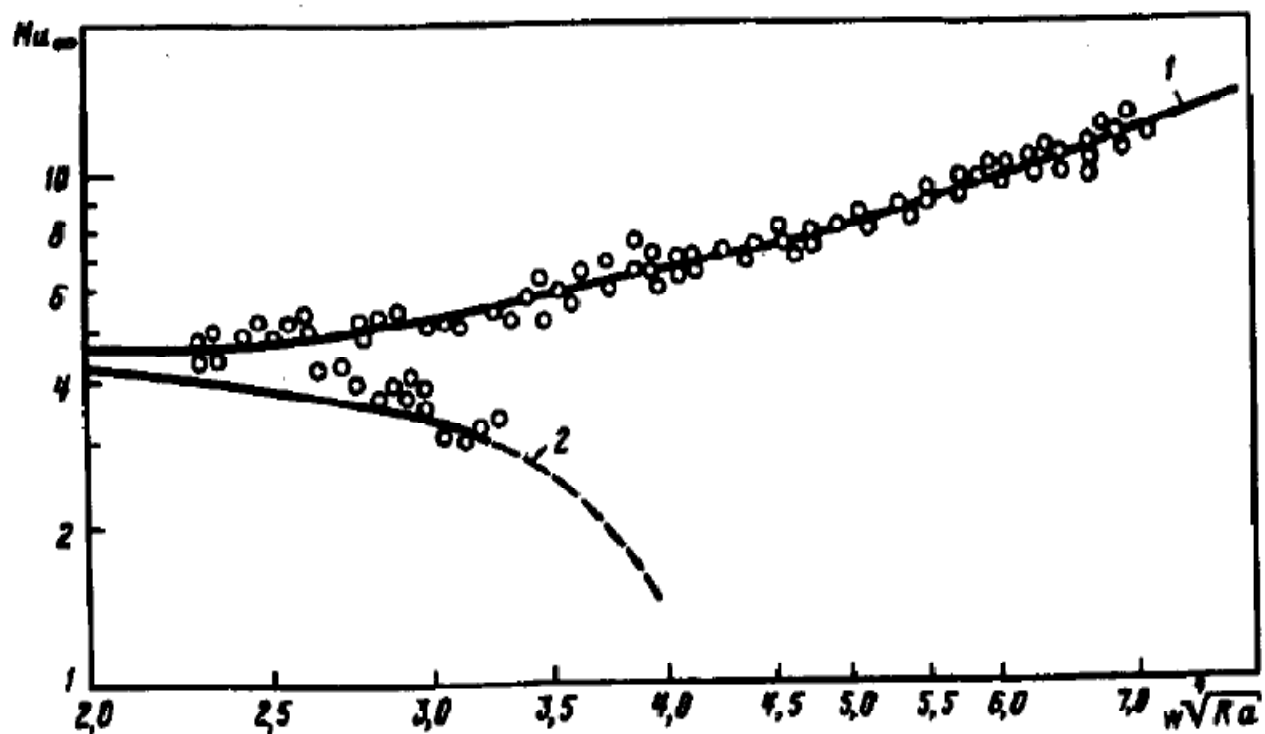


Рис. 47. Зависимость числа Nu от числа Ra при совместной действии вынужденной и естественной конвекции

$$\frac{Nu}{Nu_0} = \left(1 + \frac{Ra}{B} \right)^{0.27} \quad (377)$$

$$B = \begin{cases} \frac{1.35}{x} + 78x^{\frac{1}{4}} & \text{при } X < 0.07 \\ 60 & \text{при } X \geq 0.07 \end{cases}$$

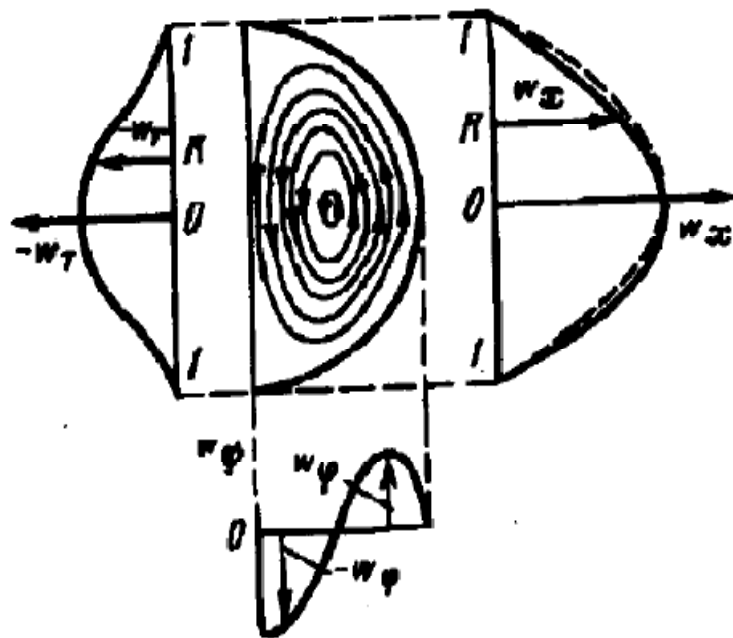


Рис. 48. Линии тока в сечении горизонтальной трубы при совместном действии свободной и вынужденной конвекции

$$X = \frac{1}{Pe} \frac{x}{d}; Pe = \frac{\bar{w}d}{a}$$

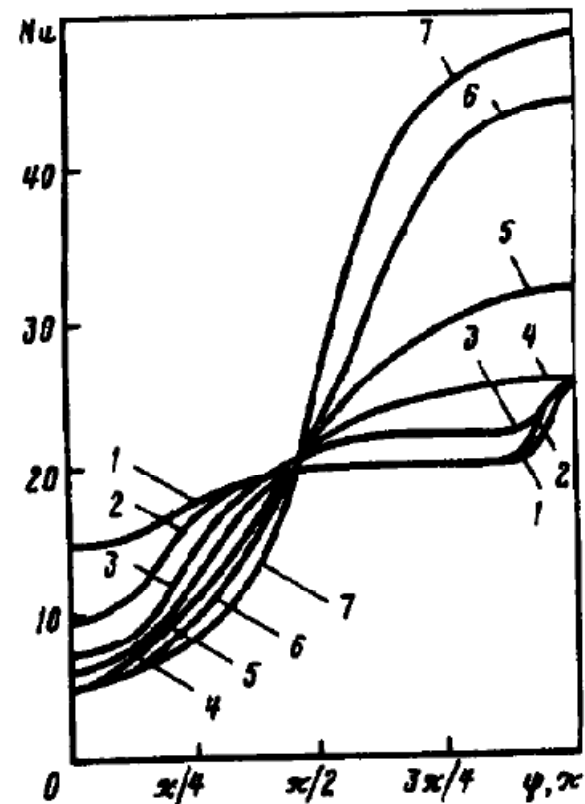


Рис. 49. Изменение местного числа Nu по периметру трубы

$$\overline{Nu} = 4.36 \left[1 + \left(\frac{Ra}{1.8 \cdot 10^4} \right)^4 \right]^{0.045}$$

при $Ra = g \beta q_{cm} d^4 / \nu a \lambda$

Теплообмен при турбулентном течении жидкости в трубах

При $Re > 2300$ ламинарное течение жидкости в трубе становится неустойчивым и переходит в турбулентное. При этом интенсивность переносов импульса, теплоты и массы по радиусу трубы существенно увеличивается. Поэтому при расчетах процессов тепло- и массообмена при течении жидкости в трубах следует в первую очередь определить режим течения.

Силы, действующие на жидкость. Рассматривая силы, действующие на элементарный цилиндр радиусом R при стабилизированном течении жидкости в области развитого течения, из условия равновесия получаем

$$-\pi R^2 dp / dx = 2\pi R \tau \quad (379)$$

$$\tau_{cm} = -\frac{R_0}{2} \frac{dp}{dx} = \xi \rho \frac{w^2}{8} \quad (380)$$

$$\frac{\Delta p}{L} = \frac{\xi}{d} \rho \frac{w^2}{2} \quad (381)$$

$$\xi = 0.3164(\text{Re}_d)^{-1/4} \quad (382)$$

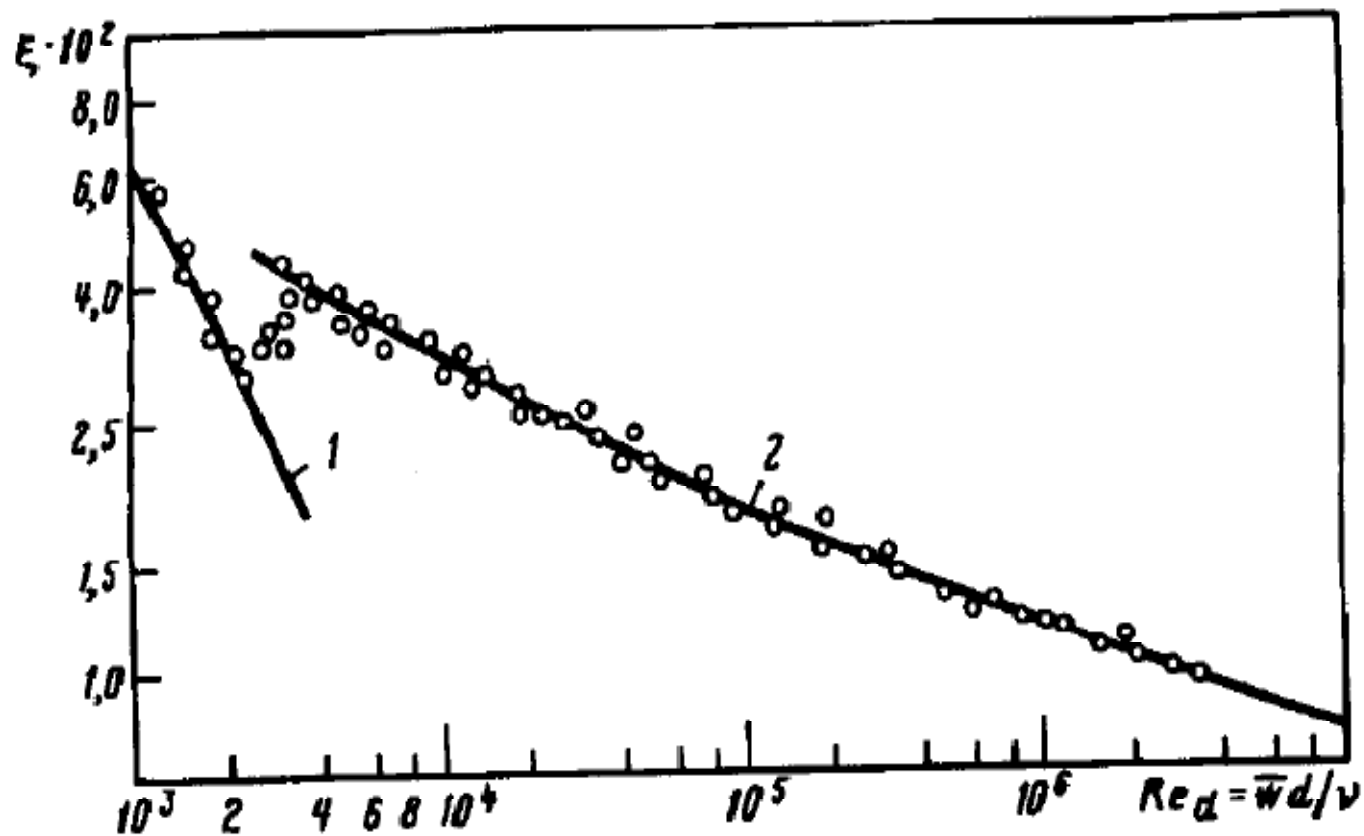


Рис. 50. Закон сопротивления для ламинарного (1) и турбулентного (2) течения в гладкой трубе

$$\frac{w}{w_0} = \left(\frac{y}{r_0} \right)^{1/n} \quad (383)$$

$$\frac{\bar{w}}{w_0} = 2 \int_0^1 \frac{w}{w_0} R dR = \frac{2n^2}{(n+1)(2n+1)}$$

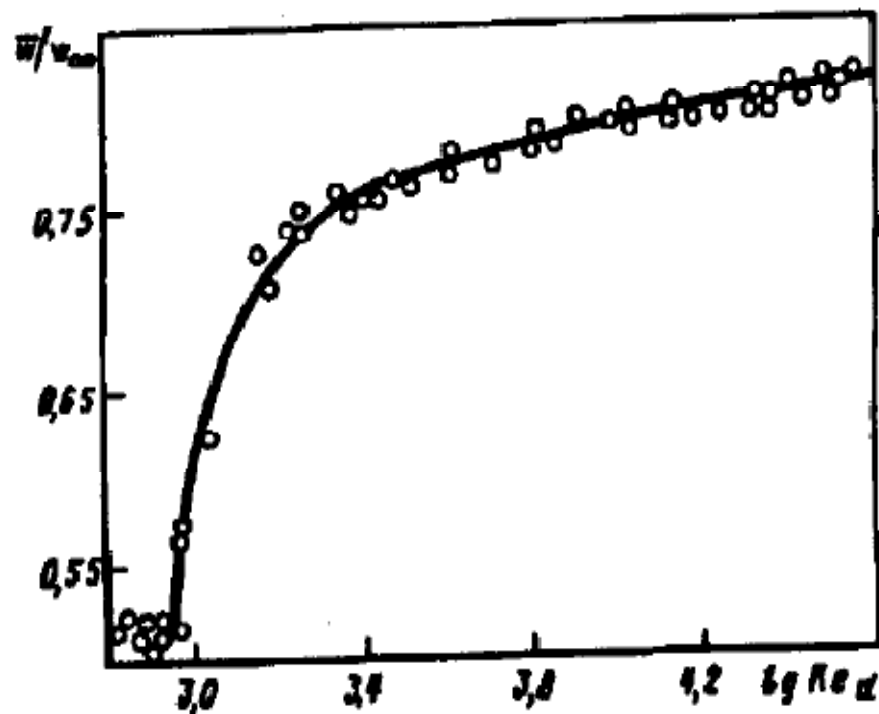


Рис. 51. Точки - эксперимент; кривая - расчет по формуле 383

$$\tau_{cm} = 0.03325 \rho \bar{w}^{-7/4} \nu^{1/4} r^{-1/4} \quad (384)$$

$$\bar{w}_0 / \nu_* = 8.74 (r_0 \nu_* / \nu)^{1/7} \quad (385)$$

$$w / \nu_* = 8.74 (y \nu_* / \nu)^{1/7}$$

$$\varphi = 8.74 \eta^{1/7} \quad (386)$$

$$\varphi = 2.5 \ln \eta + 5.5 \quad (387)$$

$$\bar{w} = \frac{\vartheta_*}{\pi R_0^2} \int_0^{R_0-y} 2\pi R \left[5.5 + 2.5 \ln \frac{\vartheta_*}{\nu} (R_0 - R) \right] dR = \quad (388)$$

$$= \vartheta_* \left(1.74 + 2.5 \ln \frac{\vartheta_* R_0}{\nu} \right) \quad (389)$$

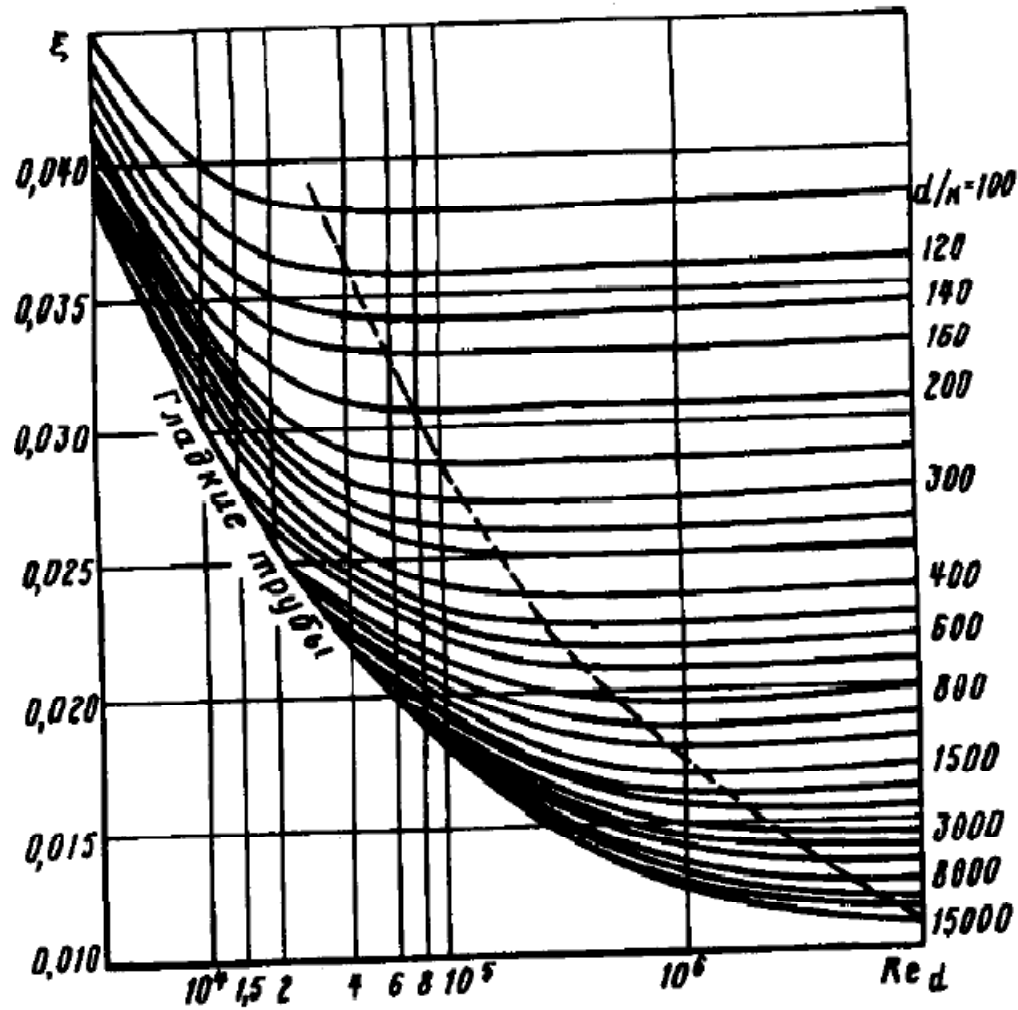


Рис. 52. Коэффициент сопротивления технических стальных труб

$$v_* = \sqrt{\tau_{cm} / \rho} = \bar{w} \sqrt{\xi / 8} \quad (391)$$

$$1 / \sqrt{\xi} = 2.1 \lg(Re \sqrt{\xi}) - 0.8 \quad (392)$$

$$\varphi = \eta \quad (393)$$

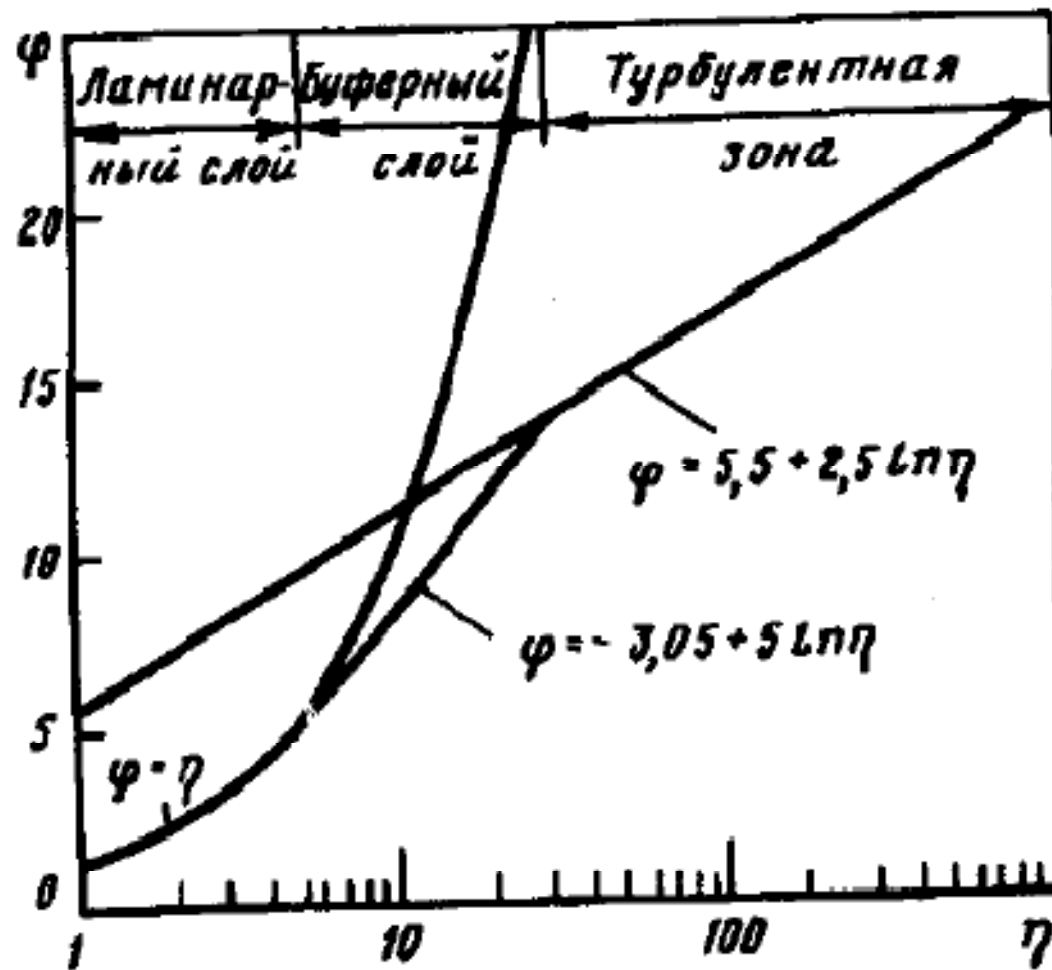


Рис. 53. Распределение скорости при турбулентном течении жидкости в трубе

$$\varphi = 5 \ln \eta - 3.05 \quad (394)$$

$$\varphi = 5 \ln \left[(1 + 0.4\eta) \frac{1.5(1+R)}{1+2R^2} \right] + 7.8 \left[1 - \exp\left(-\frac{\eta}{11}\right) - \frac{\eta}{11} \exp(-0.33\eta) \right] \quad (395)$$

Конвективный теплообмен в области стабилизированного течения жидкости в круглой трубе

$$\rho c_p w_x \frac{\partial T}{\partial x} = \frac{1}{r} \frac{\partial}{\partial r} (r q) \quad (396)$$

$$q = \rho c_p (a + \varepsilon_q) \frac{\partial T}{\partial r} \quad (397)$$

$$\bar{T} = T_0 + \frac{4q_{cm}}{\rho c_p r_0 w} x$$

$$\frac{d\bar{T}}{dx} = \frac{4q_{cm}}{\rho c_p r_0 w} \quad (398)$$

$$T(x, R) = T_1(x) + T_2(R) \quad (399)$$

$$\frac{\partial T_1}{\partial x} = \frac{1}{w_x} \left\{ \frac{1}{R} \frac{\partial}{\partial R} \left[R(a + \varepsilon_q) \frac{\partial T_2}{\partial R} \right] \right\}$$

$$\frac{\partial T_1}{\partial x} = \frac{\partial T}{\partial x} = \text{const}$$

$$\frac{\partial T_1}{\partial x} = \frac{\partial T_{cm}}{\partial x} = \frac{\partial \bar{T}}{\partial x} = \frac{2q_{cm}}{\rho c_p p w r_0} \quad (400)$$

$$2 \frac{w_x}{w} R = \frac{d}{dR} \left(R \frac{q}{q_{cm}} \right) \quad (401)$$

$$\frac{q}{q_{cm}} = \frac{2}{R} \int_0^R \frac{w_x}{w} R dR \quad (402)$$

$$\frac{\partial T}{\partial R} = \frac{q_{cm} d \int_0^R \left(\frac{w_x}{w} \right) R dR}{\lambda (1 + \varepsilon_q / a) R} \quad (403)$$

$$T_{cm} - T = \frac{q_{cm} d}{\lambda} \int_R^1 \frac{\int_0^R \left(\frac{w_x}{w} \right) R dR}{\left(1 + \frac{\text{Pr}}{\text{Pr}_m} \frac{\varepsilon}{\nu} \right) R} dR \quad (404)$$

$$\alpha = q_{cm} / (T_{cm} - \bar{T})$$

$$T_{cm} - \bar{T} = 2 \int_0^1 (T_{cm} - \bar{T}) \frac{w_x}{w} R dR \quad (405)$$

$$T_{cm} - \bar{T} = \frac{2q_{cm}d}{\lambda} \int_0^1 u d\Omega \quad (406)$$

$$u = \int_R^1 \frac{\int_0^R \frac{w_x}{w} R dR}{\left(1 + \frac{\text{Pr} \ \varepsilon}{\text{Pr}_m \ \nu}\right) R} dR; d\Omega = \left(\frac{w_x}{w}\right) R dR$$

$$\Omega = \int_0^R \frac{w_x}{w} R dR$$

$$T_{\tilde{n}\delta} - \bar{T} = \frac{2q_{\tilde{n}\delta} d}{\lambda} \left[(u\Omega)\Big|_0^1 - \int_0^1 \Omega du \right]$$

$$T_{\tilde{n}\delta} - \bar{T} = \frac{2q_{\tilde{n}\delta} d}{\lambda} \int_0^1 \frac{\left(\int_0^R \frac{w_x}{w} R dR \right)^2}{\left(1 + \frac{\text{Pr}}{\text{Pr}_\delta} \frac{\varepsilon}{\nu} \right) R} dR \quad (407)$$

$$\frac{1}{Nu} = 2 \int_0^1 \frac{\left(\int_0^R \frac{w_x}{w} R dR \right)^2}{\left(1 + \frac{\text{Pr}}{\text{Pr}_\delta} \frac{\varepsilon}{\nu} \right) R} dR \quad (408)$$

$$Nu \approx \frac{2}{\int_0^1 \frac{R^3 dR}{\left(1 + \frac{\text{Pr}}{\text{Pr}_\delta} \frac{\varepsilon}{\nu} \right)}} \quad (409)$$

1) Для турбулентного ядра:

$$0 \leq \xi \leq \xi_2; \mu_{\delta} \gg \mu; w = v_* \left(C_* + \frac{1}{\alpha} \ln \frac{v_* y}{\nu} \right)$$

$$\tau = \tau_{\delta} = \tau_{\tilde{n}\delta} \left(1 - \frac{y}{R_0} \right) = \tau_{\tilde{n}\delta} \xi$$

$$\mu_{\delta} = \frac{\tau_{\delta}}{dw/dy} = \rho \alpha v_* y \xi$$

$$\frac{\mu_{\delta}}{\mu} = \alpha Re \sqrt{\frac{\xi}{32}} (1 - \xi) \xi$$

2) Для промежуточного слоя

$$\xi_2 \leq \xi \leq \xi_1 \quad w = v_* \left(C_* + \frac{1}{\alpha} \ln \frac{v_* y}{\nu} \right)$$

$$\tau = \tau_\delta + \mu \frac{dw}{dy} = \tau_{\bar{n}\delta} \xi \approx \tau_{\bar{n}\delta}$$

$$\mu_\delta = \frac{\tau}{dw/dy} - \mu \approx \rho \alpha v_* y - \mu$$

$$\frac{\mu_\delta}{\mu} \cong \alpha \text{Re} \sqrt{\frac{\xi}{32}}$$

3) Для вязкого слоя

$$\xi_1 \leq \xi \leq 1; \mu_\delta \ll \mu; w = \frac{v_*^2}{\nu} y$$

$$\int_0^{\xi_2} \frac{\xi^3 d\xi}{\text{Pr} \mu_\delta / \mu} = \int_0^{\xi_2} \frac{\xi^2 d\xi}{\text{Pr} \alpha \text{Re} \sqrt{\frac{\xi}{32}} (1-\xi)} =$$

$$= \frac{1}{\text{Pr} \alpha \text{Re} \sqrt{\frac{\xi}{32}}} \left[\ln \frac{\text{Re} \sqrt{\frac{\xi}{32}}}{\eta^2} - \frac{1}{2} \left(1 - \frac{\eta \sqrt{\frac{\xi}{32}}}{\text{Re} \sqrt{\frac{\xi}{32}}} \right)^2 - 1 + \frac{\eta^2 \sqrt{\frac{32}{\xi}}}{\text{Re} \sqrt{\frac{\xi}{32}}} \right]$$

$$\int_0^{\xi_2} \frac{\xi^3 d\xi}{\text{Pr} \mu_m / \mu} = \frac{1}{\text{Pr} \alpha \text{Re} \sqrt{\xi/32}} \left(\ln \frac{\text{Re} \sqrt{\xi}}{\eta_2} \sqrt{\frac{\xi}{32}} - \frac{3}{2} \right) \quad (413)$$

$$\begin{aligned} \int_0^{\xi_1} \frac{\xi^3 d\xi}{1 + \text{Pr} \mu_m / \mu} &= \int_{\xi_2}^{\xi_1} \frac{\xi^3 d\xi}{\text{Pr} \alpha' \text{Re} \sqrt{\xi/32} (1 - \xi) - (\text{Pr} - 1)} = \\ &= \frac{\xi^3 d\xi}{\text{Pr} \alpha' \text{Re} \sqrt{\xi/32}} \left[z^3 \ln \frac{1 + \text{Pr}(\alpha' \eta_2 - 1)}{1 + \text{Pr}(\alpha' \eta_1 - 1)} + \frac{\eta_2 - \eta_1}{\text{Re} \sqrt{\xi/32}} (1 - z + z^2) \right] \end{aligned}$$

где $z = 1 - \frac{\text{Pr} - 1}{\text{Pr} \alpha' \text{Re} \sqrt{\xi/32}}$

$$\int_{\xi_2}^{\xi_1} \frac{\xi^3 d\xi}{1 + \text{Pr} \mu_m / \mu} = \frac{1}{\text{Pr} \alpha' \text{Re} \sqrt{\xi/32}} \ln \frac{1 + \text{Pr}(\alpha' \eta_2 - 1)}{1 + \text{Pr}(\alpha' \eta_1 - 1)} \quad (412)$$

$$Nu = \frac{\xi}{8} \text{Re} f(\text{Pr}, \text{Re}) \quad (413)$$

$$f(\text{Pr}, \text{Re}) = \frac{\alpha \sqrt{8/\xi} \text{Pr}}{\ln \frac{\text{Re}}{4.5\eta_2} \sqrt{\frac{\xi}{32}} + \frac{\alpha}{\alpha'} \ln \frac{1 + \text{Pr}(\alpha' \eta_2 - 1)}{1 + \text{Pr}(\alpha' \eta_1 - 1)} - \alpha \text{Pr} \text{Re} \sqrt{\frac{\xi}{32}} \int_{\xi_1}^1 \frac{d\xi}{1 + \text{Pr} \mu_m / \mu}}$$

при $\text{Pr} = 1$

$$\int_{\xi_1}^1 \frac{d\xi}{1 + \text{Pr} \mu_m / \mu} = 1 - \xi_1 = \frac{\eta_1}{\text{Re}} \sqrt{\frac{32}{\xi}} \quad (414)$$

$$f(\text{Pr}, \text{Re}) = \frac{0.4 \text{Pr} \sqrt{8/\xi}}{\ln \frac{\text{Re}}{270} \sqrt{8/\xi} + 2 \ln \frac{1 + 5 \text{Pr}}{1 + 0.2 \text{Pr}} + 2.4 \text{Pr}} \quad (415)$$

$$\begin{aligned}
\int_{\xi_1}^1 \frac{d\xi}{1 + \text{Pr} \mu_{\delta} / \mu} &= \frac{1}{\text{Re}} \sqrt{\frac{32}{\xi}} \int_0^{\eta_1} \frac{d\eta}{(1 + \text{Pr} \beta / \eta_1^3 \eta^4)} = \\
&= \frac{\alpha}{\text{Re} \sqrt{\xi}} \left(\ln \frac{\eta_1^2 + \alpha \eta_1 \sqrt{2} + \alpha^2}{\eta_1^2 - \alpha \eta_1 \sqrt{2} + \alpha^2} + 2 \text{arctg} \frac{\alpha \eta_1 \sqrt{2}}{\alpha^2 - \eta_1^2} \right) \\
&\quad \text{при } \alpha = \sqrt{\eta_1^3 / (\beta \text{Pr})}
\end{aligned} \tag{416}$$

$$f(\text{Pr}, \text{Re}) = \frac{\alpha \text{Pr} \sqrt{8/\xi}}{\ln \frac{\text{Re}}{4.5 \eta_2} \sqrt{\frac{\xi}{32}} + \frac{\alpha}{\alpha'} \ln \frac{1 + \text{Pr}(\alpha' \eta_2 - 1)}{1 + \text{Pr}(\alpha' \eta_1 - 1)} + \alpha \eta_1 \text{Pr} \varphi(\text{Pr})}$$

$$Nu = \frac{0.14 \sqrt{\xi} \text{Pr} \text{Re}}{\ln \frac{\text{Re} \sqrt{\xi}}{760} + 2 \ln \frac{1 + 5 \text{Pr}}{1 + 0.2 \text{Pr}} + 2.4 \text{Pr} \varphi(\text{Pr})}$$

(417)

$$\varphi(\text{Pr}) = 4 \frac{1}{\sqrt{1024 \beta \eta_1 \text{Pr}}} \left(\ln \frac{\eta_1^2 + \alpha \eta_1 \sqrt{2} + \alpha^2}{\eta_1^2 - \alpha \eta_1 \sqrt{2} + \alpha^2} + 2 \arctg \frac{\alpha \eta_1 \sqrt{2}}{\alpha^2 - \eta_1^2} \right) \quad (418)$$

$$Nu = \frac{0.14 \sqrt{\xi} \text{Pr Re}}{\ln \text{Re} \sqrt{\xi} / 290 + 4.6 \text{Pr}} \quad (419)$$

$$\varphi(\text{Pr}) \rightarrow 2\pi (1024 \beta \eta_1 \text{Pr})^{-1/4} \quad (420)$$

$$Nu = 0.035 \text{Pr}^{1/4} \text{Re} \sqrt{\xi}$$

$$\ln(\text{Re} \sqrt{\xi}) = 1.13 / \sqrt{\xi} + 1 \quad (421)$$

$$Nu = \frac{\xi \text{Pr Re}}{40 \sqrt{\xi} [f(\text{Pr}) - 1] + 8} \quad (422)$$

$$f(\text{Pr}) = 0.356 \ln \frac{1 + 5 \text{Pr}}{1 + 0.2 \text{Pr}} + 0.426 \text{Pr} \varphi(\text{Pr}) \quad (423)$$

$$\text{Nu} = \frac{(\xi/8) \text{Re Pr}}{1.07 + 12.7 \sqrt{\xi/8} (\text{Pr}^{2/3} - 1)} \varepsilon_T \quad (424)$$

$$\varepsilon_T = (\mu / \mu_T) \quad (425)$$

$$\text{Nu} = 0.023 \text{Pr}^{0.4} \text{Re}^{0.8} \quad (426)$$

$$\text{Nu} \cong 2 \left(\int_0^{\xi_1} \frac{\xi^3 d\xi}{1 + P(1-\xi)\xi} + \int_{\xi_1}^1 \xi^3 d\xi \right)^{-1} \quad (427)$$

$$\text{Nu} = 2 \left(\int \xi^3 d\xi \right)^{-1} = 9 \quad (428)$$

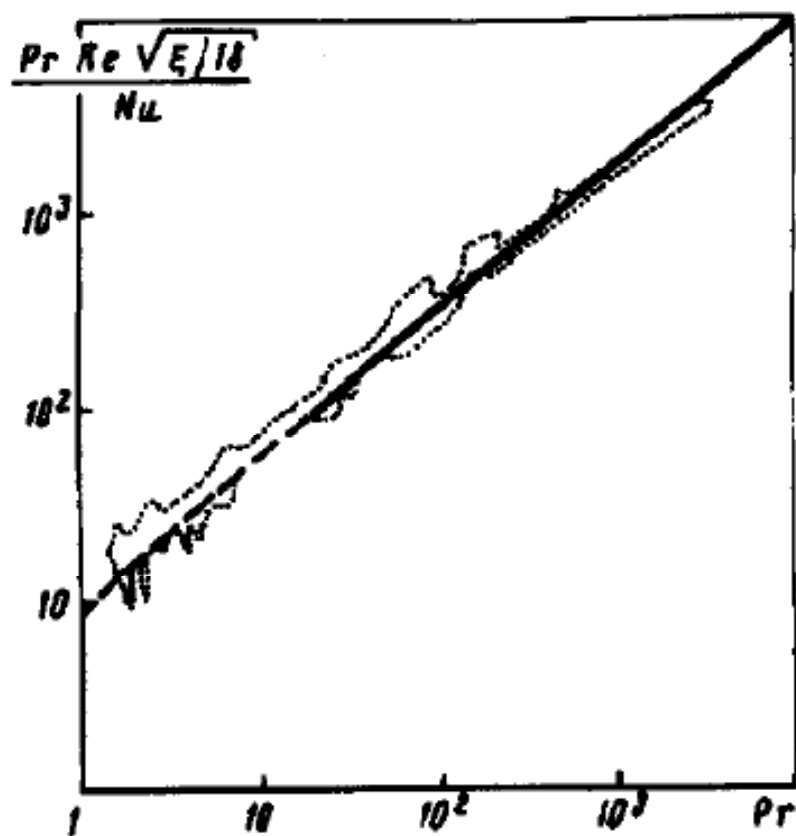


Рис. 54. Влияние числа Прандтля на теплоотдачу при турбулентном течении жидкости

$$Nu = \left[2 \int_0^1 \frac{1}{\bar{R}} \left(1.22 \int_0^{\bar{R}} \bar{R}^{-8/7} d\bar{R} \right) d\bar{R} \right]^{-1} = 6.8 \quad (429)$$

$$Nu = 5.0 + 0.025 Pe^{0.8} \quad (430)$$

Теплообмен и сопротивление при турбулентном течении в трубах жидкости с переменными физическими свойствами. Рассмотрим конвективный теплообмен при турбулентном течении несжимаемой жидкости в круглой трубе при тех же условиях, за исключением допущения о постоянстве физических параметров.

$$\rho w_x \frac{\partial h}{\partial x} = \frac{1}{R} \frac{\partial}{\partial R} Rq \quad (431)$$

$$\frac{\partial}{\partial x} (p + \rho w_x^2) = -\frac{1}{R} \frac{\partial}{\partial R} R\tau \quad (432)$$

где $q = (\lambda + \rho c_p \varepsilon_q) \frac{\partial T}{\partial R}$; $\tau = -(\mu + \beta_\varepsilon) \frac{\partial w_x}{\partial R}$

$$T_{cm} - T = \frac{q_{cm}}{\lambda_{cm}} \int_0^1 \frac{\int_0^R \frac{\rho w_x}{\rho w_x} R dR}{\frac{\lambda}{\lambda_{cm}} \left(1 + \frac{\text{Pr}}{\text{Pr}_m} \frac{\varepsilon}{\nu} \right) R} dR \quad (433)$$

$$w_x = \frac{\tau_{cm} R_0}{\mu_{cm}} \int_0^1 \frac{R}{(\mu / \mu_{cm})(1 + \varepsilon / \nu)} dR \quad (434)$$

$$\frac{1}{Nu_{cm}} = 2 \frac{c_{p_{cm}}}{c_p} \int_0^1 \frac{\int_0^R \frac{\rho w_x}{\rho w_x} R dR}{\frac{\lambda}{\lambda_{cm}} \frac{c_{p_{cm}}}{c_p} \left(1 + \frac{\text{Pr}}{\text{Pr}_m} \frac{\varepsilon}{\nu} \right) R} dR \quad (435)$$

$$\frac{1}{\xi_{cm}} = \frac{\text{Re}_{cm}}{8} \int_0^1 \frac{\rho}{\rho_{cm}} \left(\int_0^1 \frac{R}{(\mu / \mu_{cm})(1 + \varepsilon / \nu)} dR \right) R dR \quad (436)$$

где

$$Nu_{cm} = \frac{\alpha d}{\lambda_{cm}} = \frac{q_{cm} d}{(T_{cm} - \bar{T}) \lambda_{cm}} = \frac{q_{cm} \bar{c}_p d}{(h_{cm} - \bar{h}) \lambda_{cm}}$$

$$\overline{c_p} = \frac{h_{cm} - \overline{h}}{T_{cm} - \overline{T}} = \frac{1}{T_{cm} - \overline{T}} \int_T^{T_{cm}} c_p dT; \xi_{cm} = \frac{8\tau_{cm}\rho_{cm}}{(\overline{\rho w_x})^2}$$

$$Nu / Nu_0 = (\mu_{cm} / \mu_{жс})^n \quad (437)$$

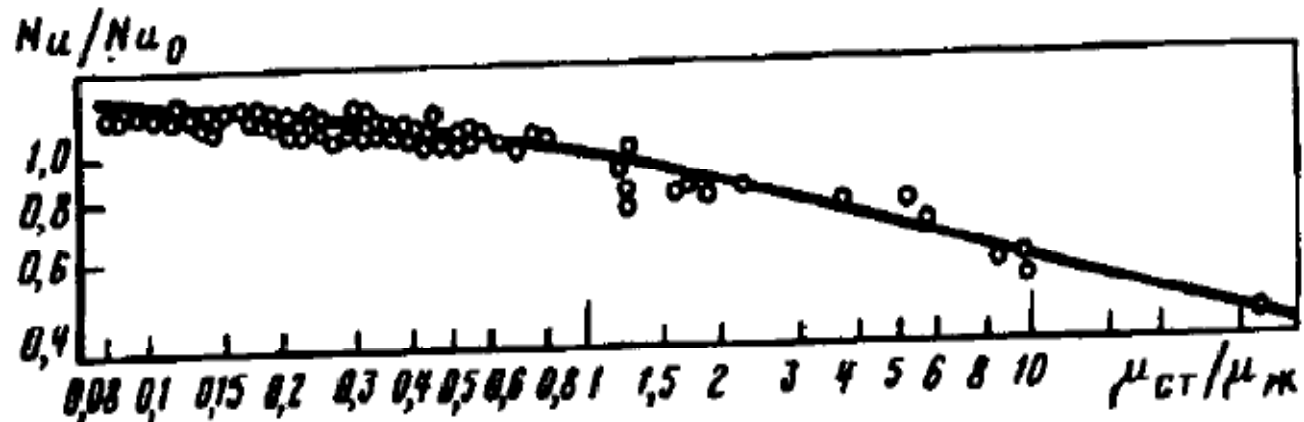


Рис. 55. Влияние переменной вязкости на турбулентный конвективный теплообмен

$$\lambda / \lambda_0 = (T / T_0)^{n_\lambda}; \mu / \mu_0 = (T / T_0)^{n_\mu}; c_p / c_{p_0} = (T / T_0)^{n_c}$$

$$\overline{Nu} = 0.012 \overline{Re}^{0.8} \overline{Pr}^{0.4} \overline{\psi}^{-0.37} \quad (438)$$

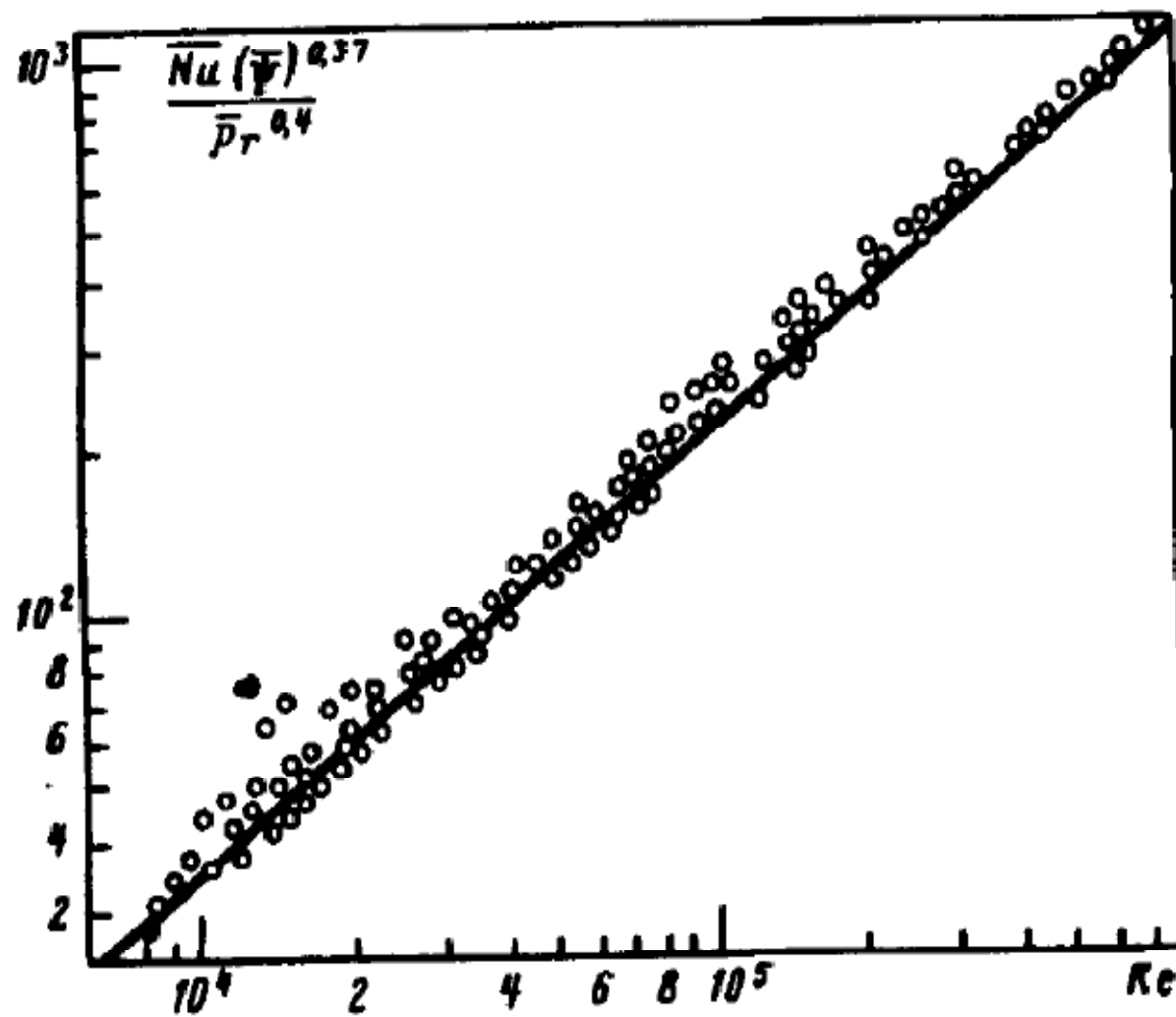


Рис. 56. Влияние неизотермичности на коэффициент теплоотдачи при стабилизированном течении газа в цилиндрической трубе: ЛИНИЯ - расчет по формуле 438; точки - эксперимент

$$\overline{Nu}_d = 0.023 \overline{Re}_d^{0.8} \overline{Pr}^{0.4} \left(\frac{2}{\sqrt{\rho / \rho_{cm}} + 1} \right)^2 \quad (439)$$

$$\overline{Nu} = Nu_0 (\overline{\mu} / \mu_{cm})^{0.11} (\lambda / \lambda_{cm})^{-0.33} (c_p / \overline{c}_p)^{0.35} (\rho_{cm} / \overline{\rho})^m (\overline{c}_p / c_p)^n \quad (440)$$

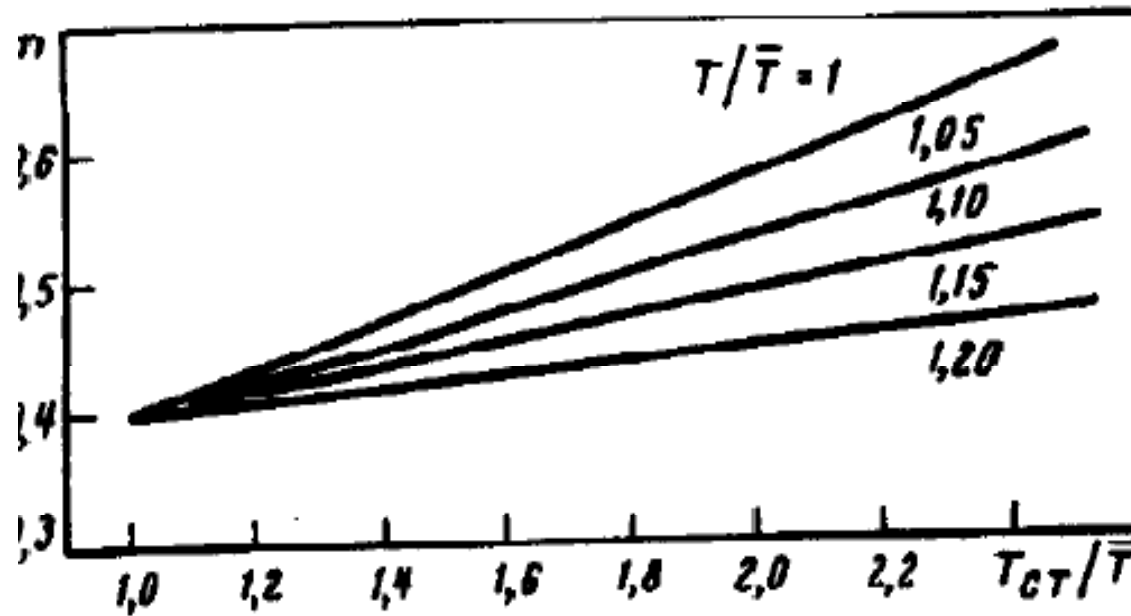


Рис. 57. Зависимость показателя степени n от температуры

Влияние шероховатости поверхности на теплообмен при турбулентном течении жидкости в трубах, в изогнутых трубах и трубах некруглого поперечного сечения. Под шероховатой поверхностью понимают такую поверхность, у которой размеры неровностей поверхности значительно меньше толщины пограничного слоя или радиуса трубы (при стабилизированном течении). В этом случае шероховатость поверхности оказывает непосредственное влияние лишь на течение жидкости в вязком и переходном слое. В различных "турбулизаторах" (специальных ребрах, вставках, шнеках, завихрителях и т.п.) возникают возмущения всего потока.

$$\eta = \frac{Nu_{ш} / Nu_2}{\xi_{ш} / \xi_2} \quad (441)$$

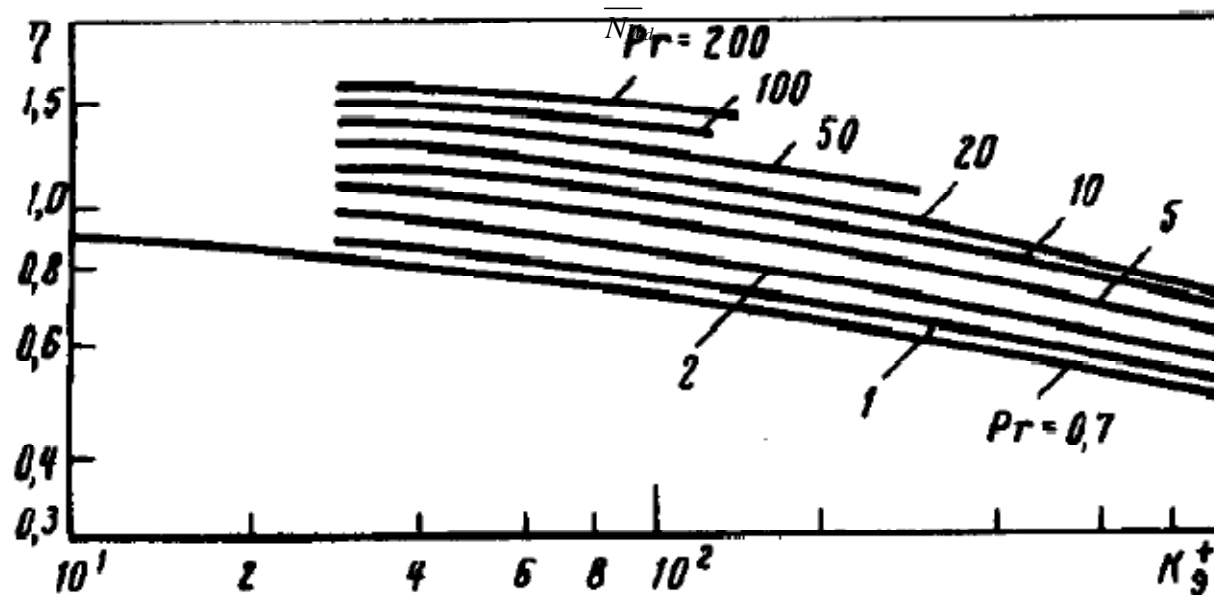


Рис. 58. Зависимость коэффициента эффективности шероховатых труб от K_g^+ при различных значениях числа Pr

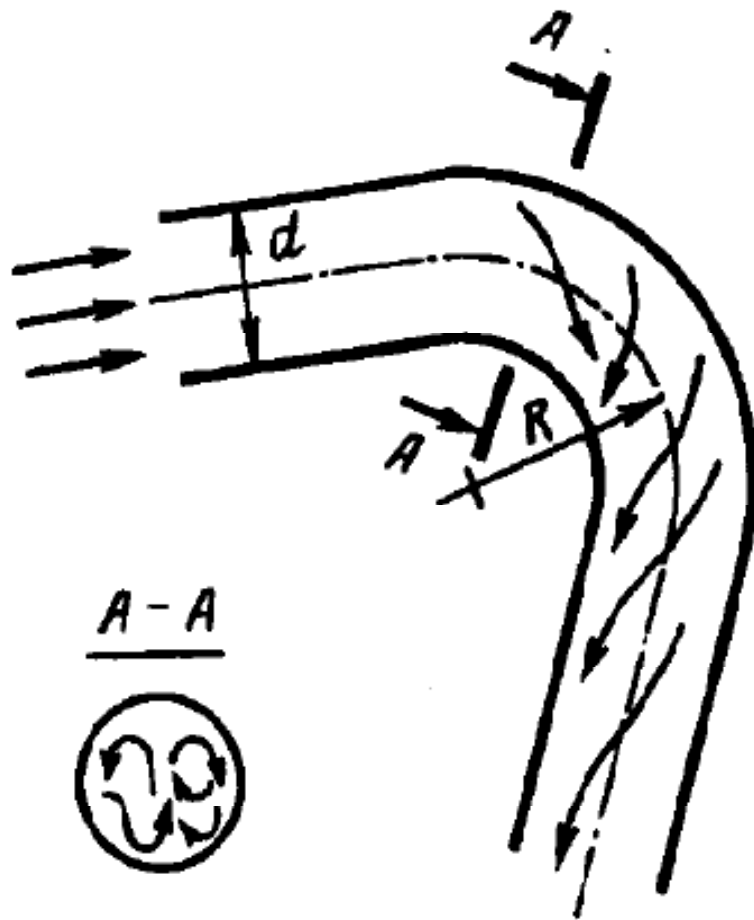


Рис. 59. Течение в изогнутом канале

$$St Pr^{0.6} = \xi / 8 \quad (442)$$

$$\xi = \xi_{HD} \left[\text{Re}(r/R)^2 \right]^{0.06} \quad (443)$$

$$d_s = 4f / P$$

$$Nu_{d_s} = 0.017 \text{Re}_{d_s} \text{Pr}^{0.04} \left(\frac{\text{Pr}}{\text{Pr}_{cm}} \right)^{0.25} \left(\frac{d_2}{d_1} \right)^{0.18} \quad (444)$$

Теплообмен при турбулентном течении жидкости в начальном участке трубы. Переход от ламинарного режима течения в пограничном слое к турбулентному на начальном участке трубы происходит таким же образом, как и на плоской пластине. Если турбулентный пограничный слой начинает нарастать от начального сечения трубы, то расчет развития динамического и теплового пограничного слоя в начальном участке трубы производят по формулам, полученным в VI.3 для внешнего обтекания тел. Различие заключается в том, что при внешнем обтекании тел скорость жидкости на внешней границе пограничного слоя является заданной величиной, а в рассматриваемых условиях начального участка трубы она является искомым параметром. Для ее определения имеется дополнительное уравнение постоянства расхода жидкости по длине трубы.

$$\rho_{01} w_{01} = 2 \int_0^{R_0} \rho w R dR = \text{const} \quad (445)$$

$$\delta^* = \int_0^{\delta} \left(1 - \frac{\rho w}{\rho_0 w_0} \right) \left(1 - \frac{y}{R_0} \right) dy \quad (446)$$

$$\rho_{01} w_{01} = \rho_0 w_0 (1 - 2\delta^* / R_0) \quad (447)$$

$$\text{Re}^{**} = \text{Re}_{01} (\bar{w} - 1) / 5.2 \quad (448)$$

$$\bar{w} = \frac{w_0}{w_{01}} = 1 + 0.185 \left[\frac{\bar{X}}{\text{Re}_{0.1}^{0.25}} \right]^{0.75} \quad (449)$$

$$C = 0.0256 / (\text{Re}^{**})^{0.25} \quad (450)$$

$$\bar{w}_i = (1 - 2\delta^* / R_0)^{-1} = 1.24 \quad (451)$$

$$\bar{X} \cong 1.4 \text{Re}_{0.1}^{0.25} \quad (452)$$

$$St = 0.0288 \text{Re}_x^{-0.2} \text{Pr}^{-0.6}$$

$$\text{Re}_x = \frac{\delta_0 w_0 x}{\mu_0} = \text{Re}_{01} \bar{w} \left(\frac{x}{d} \right)$$

$$Nu_d = 0.0288 \text{Re}_{01}^{0.8} \left[1 + 0.185 \left(\frac{\bar{X}}{\text{Re}_{d_1}^{0.25}} \right)^{0.75} \right]^{0.8} \left(\frac{x}{d} \right)^{-0.2} \quad (453)$$

Теплообмен при поперечном обтекании труб

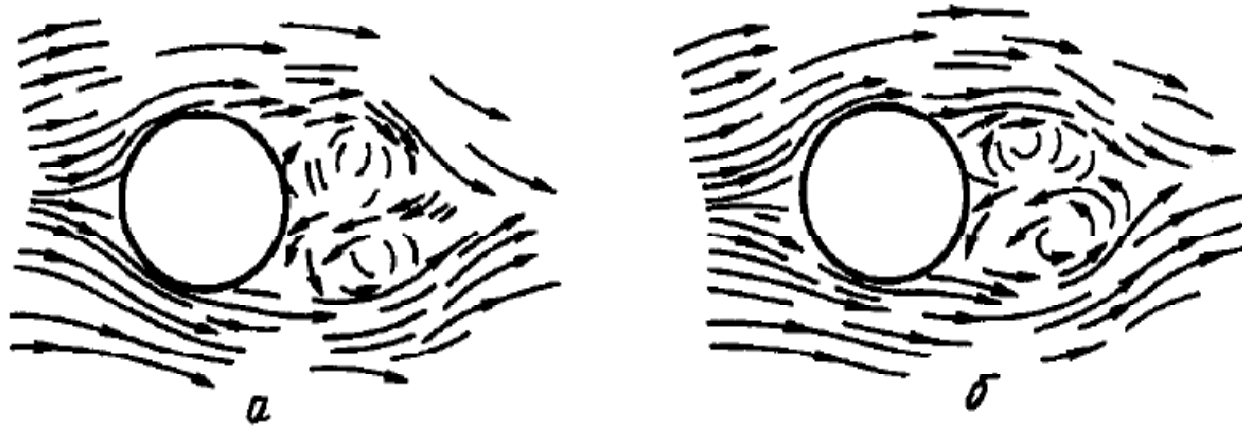


Рис. 60. Обтекание цилиндра при отрыве ламинарного (а) и турбулентного пограничного слоя (б)

$$\overline{Nu}_{\text{жсд}} = 0.5 Re_{\text{жсд}}^{0.5} Pr_{\text{жс}}^{0.38} (Pr_{\text{жс}} / Pr_{\text{ст}})^{0.25} \quad (454)$$

при $Re = 5 \dots 10^3$

$$\overline{Nu}_{\text{жсд}} = 0.25 Re_{\text{жсд}}^{0.6} Pr_{\text{жс}}^{0.43} (Pr_{\text{жс}} / Pr_{\text{ст}})^{0.25} \quad (455)$$

при $Re = 10^3 \dots 2 \cdot 10^5$

$$\overline{Nu}_{\text{жсд}} = 0.23 Re_{\text{жсд}}^{0.8} Pr_{\text{жс}}^{0.37} (Pr_{\text{жс}} / Pr_{\text{ст}})^{0.25} \quad (456)$$

при $Re = 2 \cdot 10^5 \dots 2 \cdot 10^6$

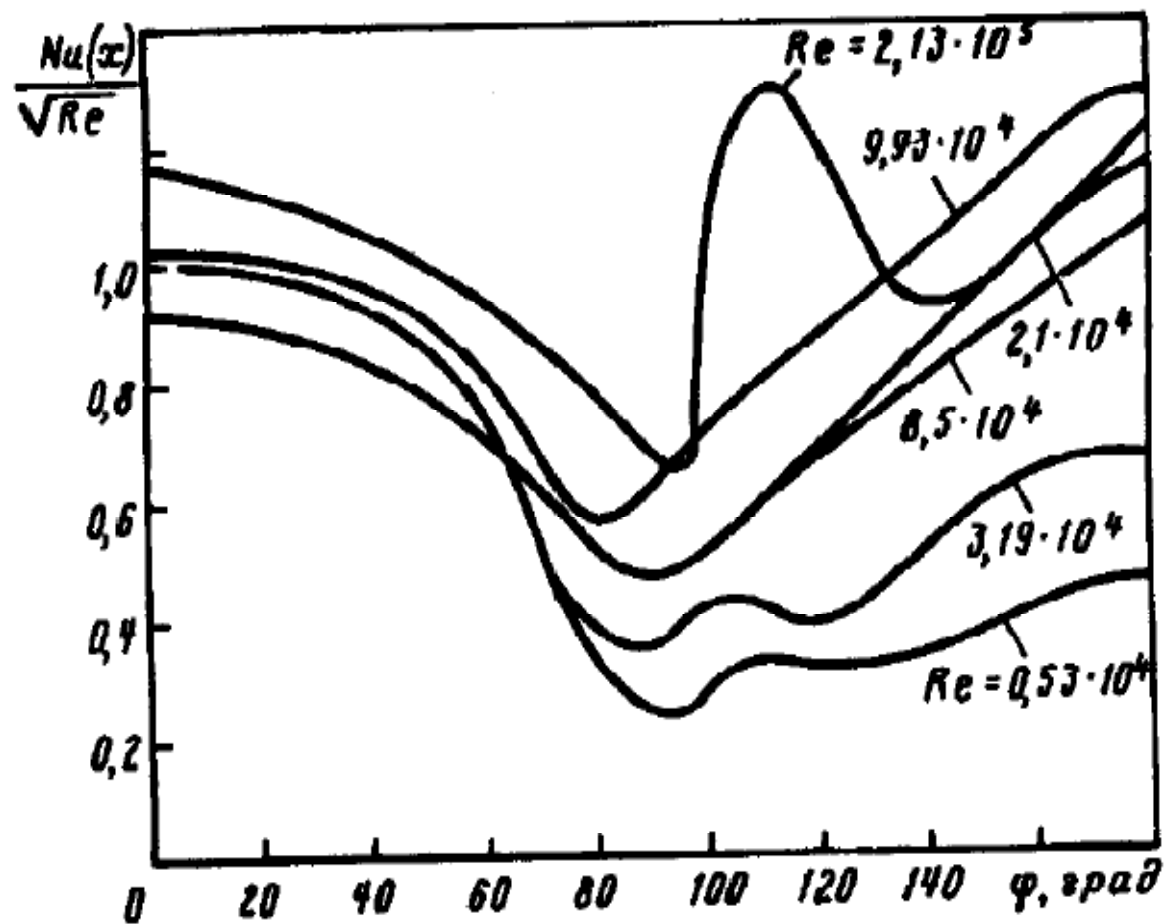


Рис. 61. Изменение теплоотдачи по окружности трубки при различных числах Re

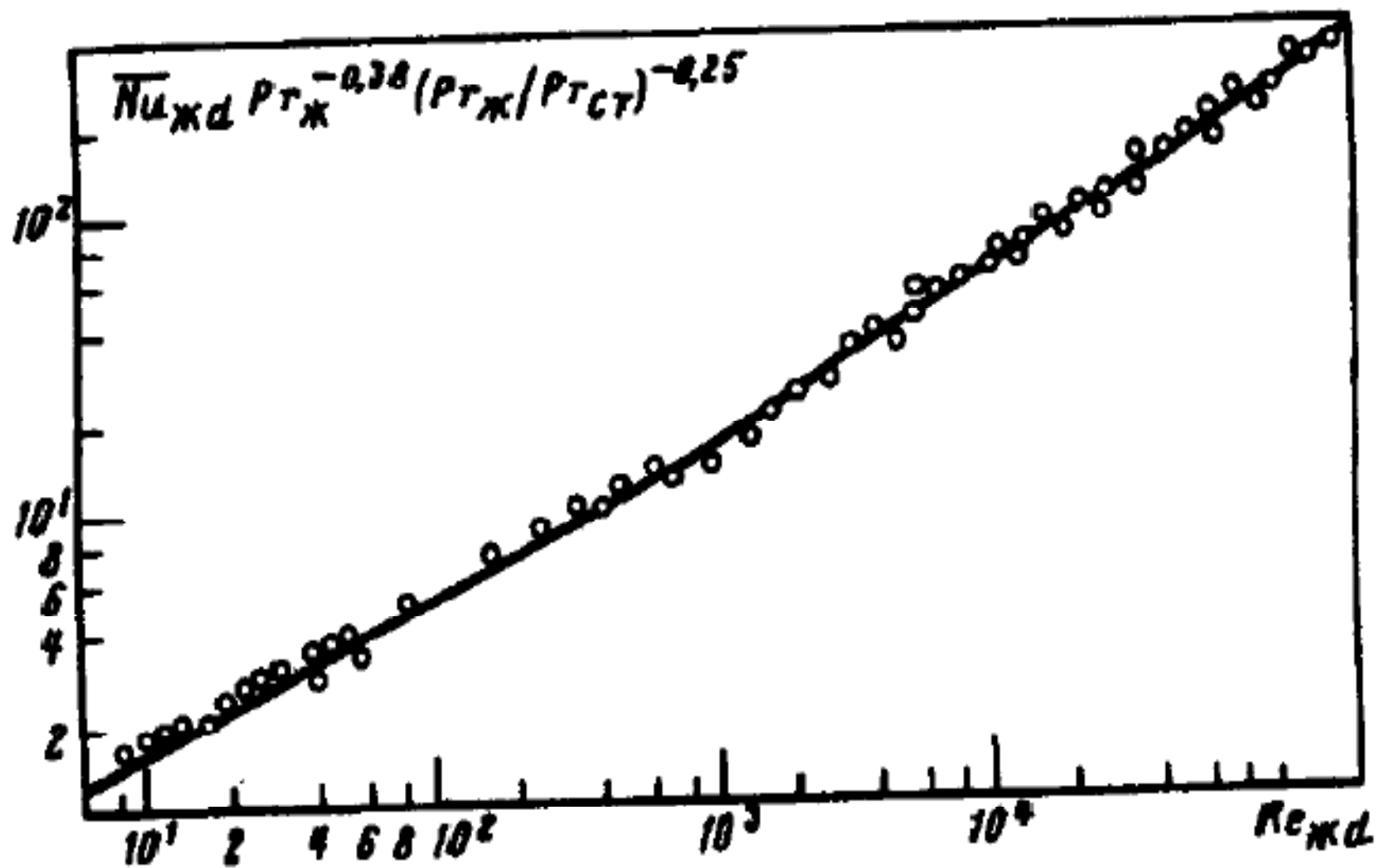


Рис. 62. Средняя теплоотдача поперечно омываемого цилиндра: линия - расчет по формулам 454, 456; точки - эксперимент

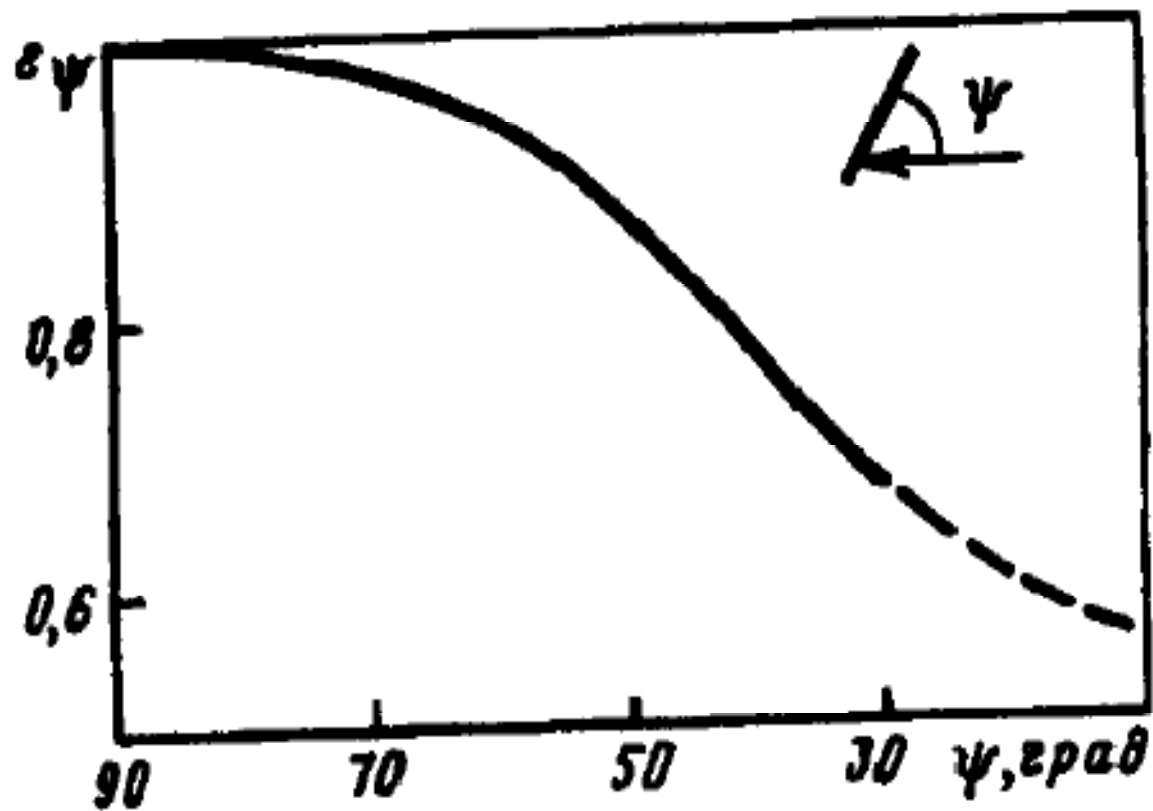


Рис. 63. Влияние угла атаки на теплоотдачу цилиндра

$$\epsilon_\psi = 1 - 0.54 \cos^2 \psi$$

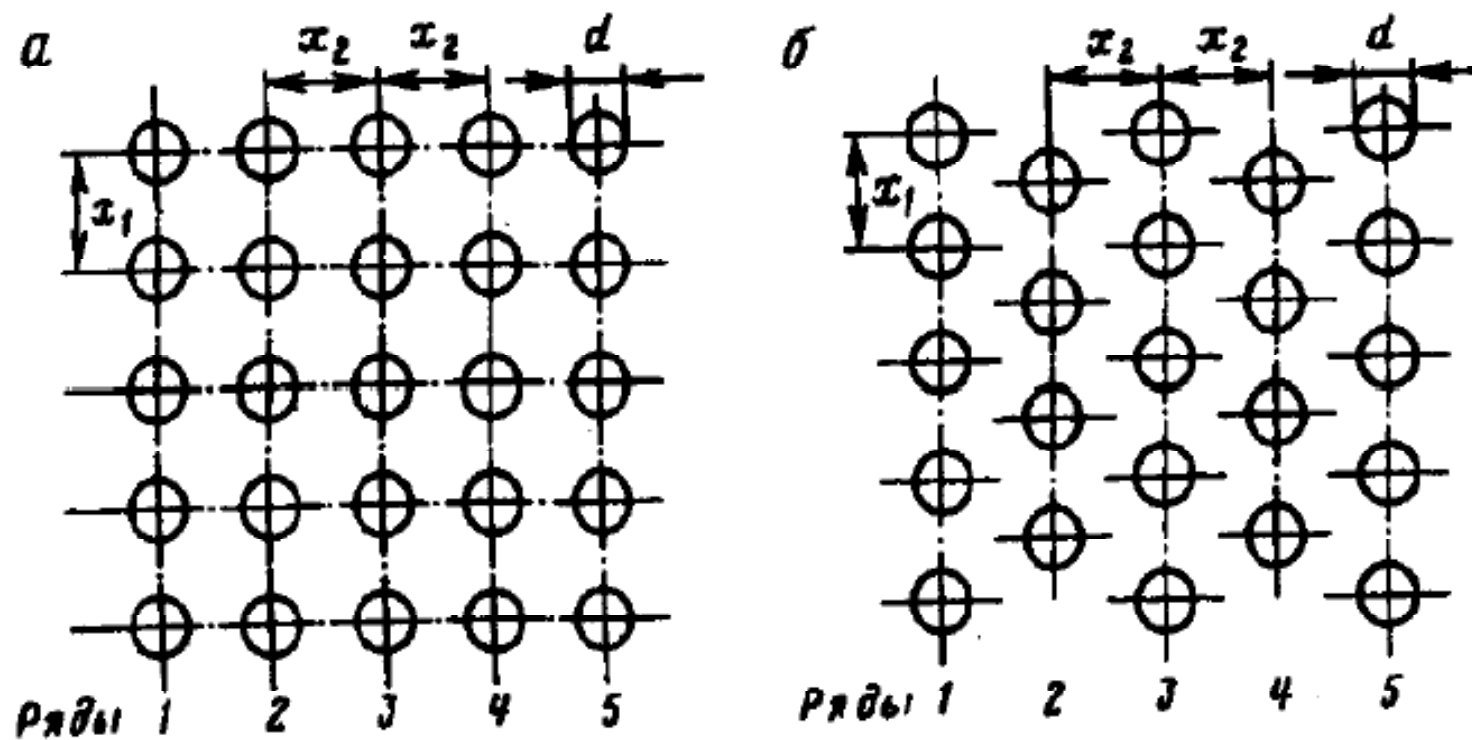
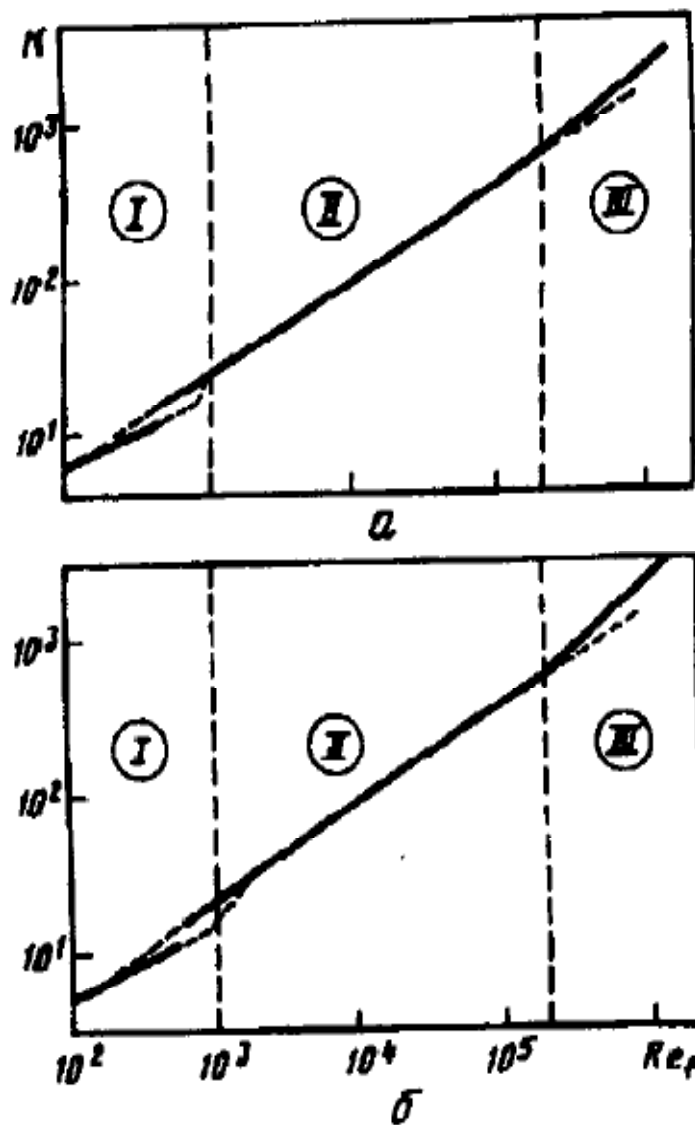


Рис. 64. Коридорное (а) и шахматное (б) расположение труб в пучке



Для пучков с числом рядов менее 20 необходимо учитывать уменьшение коэффициента теплоотдачи в первых рядах по сравнению с глубинными рядами

$$Nu_z = C_z Nu_{z>20}$$

Рис. 65. Теплоотдача при поперечном обтекании при шахматном (а) и коридорном (б) расположении пучков труб

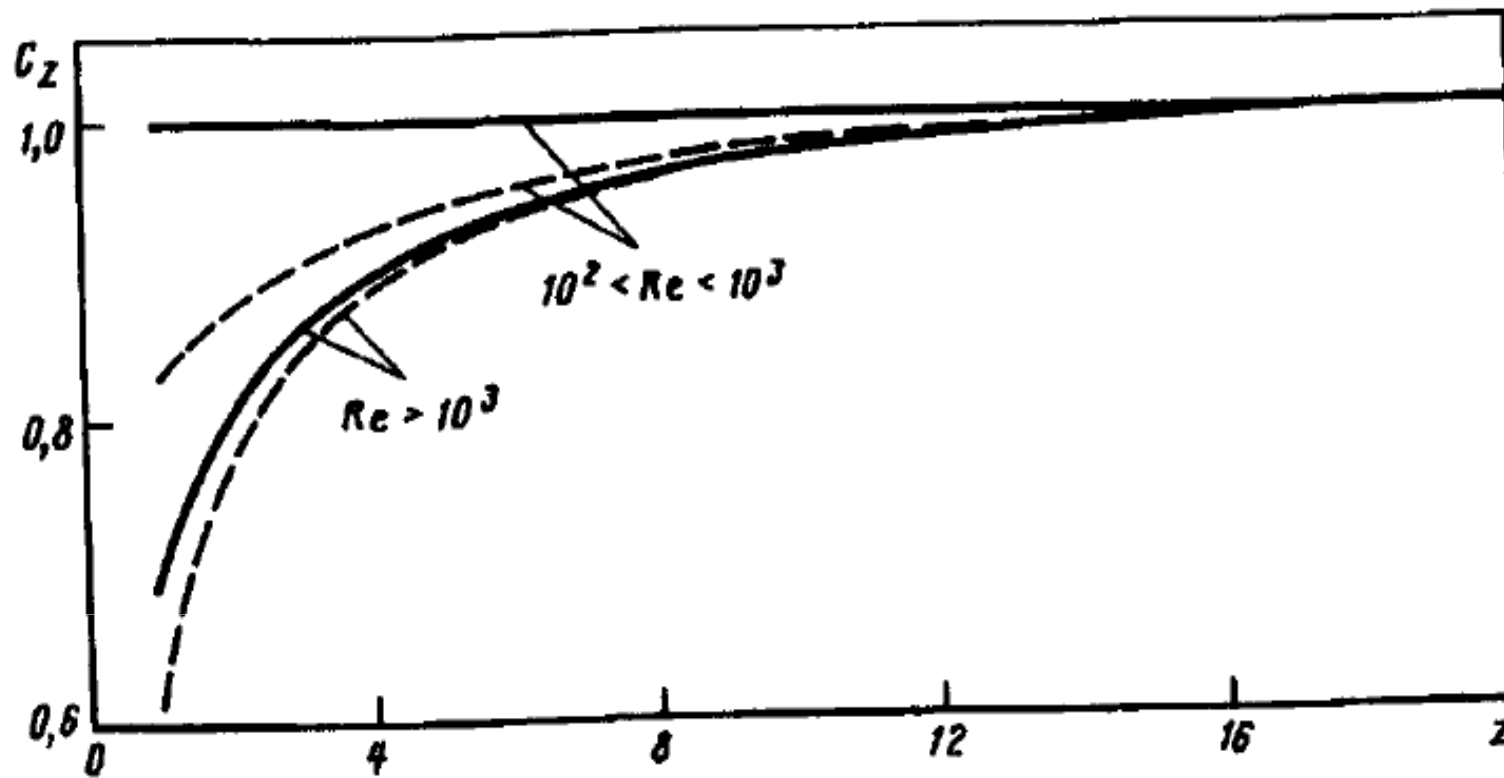


Рис. 66. Поправка на число рядов при расчете теплоотдачи пучка: сплошные кривые - коридорное расположение труб; штриховые кривые - шахматное

$$E = \frac{\alpha F \Delta T}{Q_v \Delta p}, \quad E = \frac{\alpha F}{f w \Delta p} = \frac{\alpha}{\varepsilon} \quad (457)$$

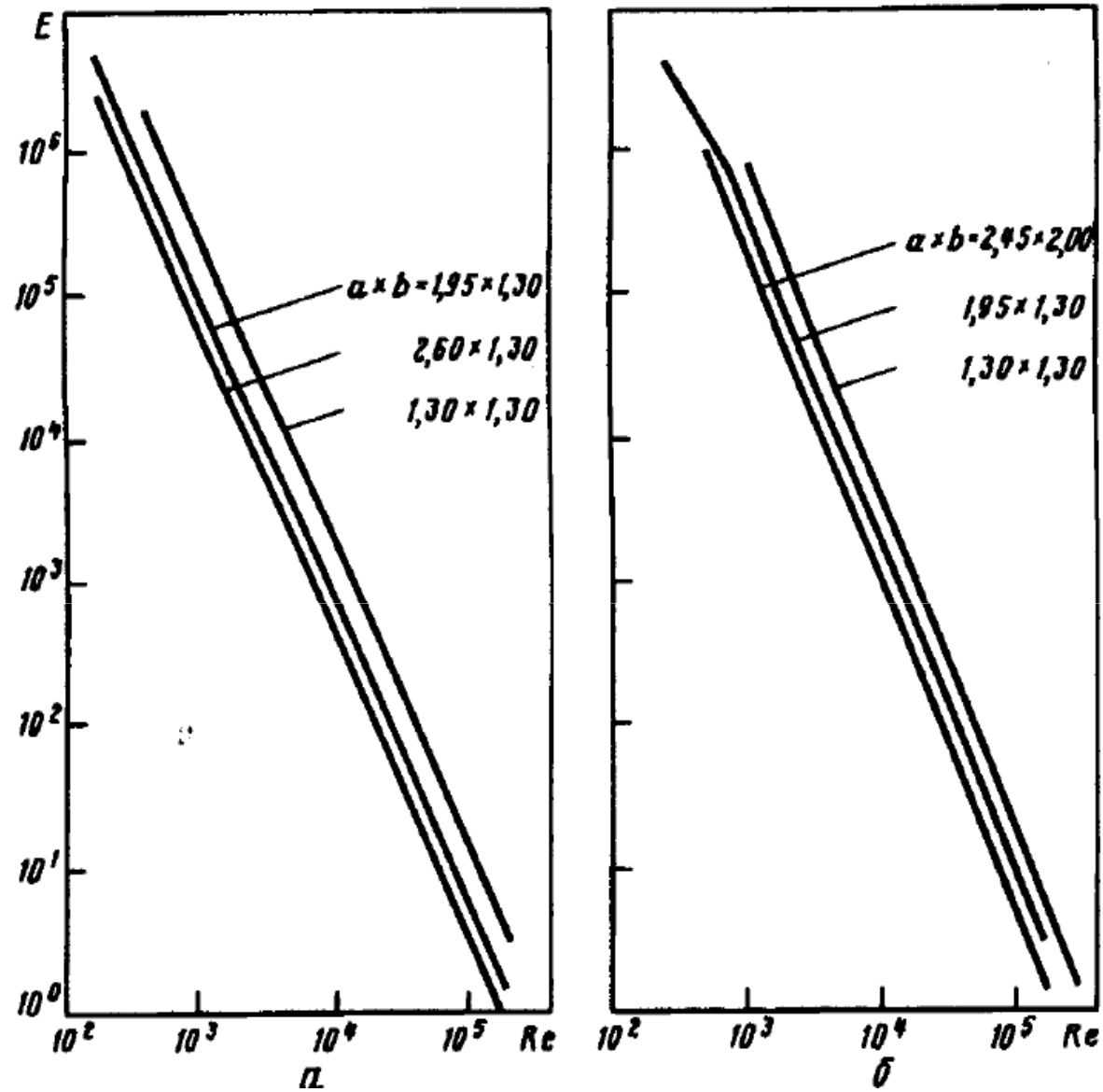


Рис. 67. Эффективность E теплоотдачи шахматного (а) и коридорного (б) пучка труб в зависимости от числа Re и расстояния между трубами

Методы тепловой защиты тел от воздействия высокоэнтальпийного потока газа.

Конвективный теплообмен при наличии газовых завес

Основной тенденцией развития энергетической техники является увеличение максимальных температур и давлений теплоносителей и рабочих тел. Максимальные температуры газа в энергетических установках намного превышают допустимые температуры материалов, из которых изготовлены элементы проточной части тепловых машин. В этих условиях существенное значение для надежной работы теплонапряженных деталей машины имеет система охлаждения. Все более широкое применение в технике находят системы охлаждения, использующие пленочное и пористое охлаждение.

В современной технике для защиты поверхности тел от теплового воздействия высокоэнтальпийного потока газа широко используются газовые завесы. Охлаждающий газ подается на поверхность теплообмена и, распространяясь вдоль этой поверхности, создает тепловую завесу. В некоторых случаях газовая завеса является как тепловой, так и химической защитой поверхности тела. На рис.68 показаны некоторые схемы применения пористого и пленочного охлаждения в современной технике

$$\theta = \frac{T_0 - T_{cm}}{T_0 - T_{cm_1}} \quad (458)$$

$$T_{cm} = T_0 - \theta(T_0 - T_{cm_1}) \quad (459)$$

$$\theta = \frac{h_0 - h_{cm}}{h_0 - h_{cm_1}} \quad (460)$$

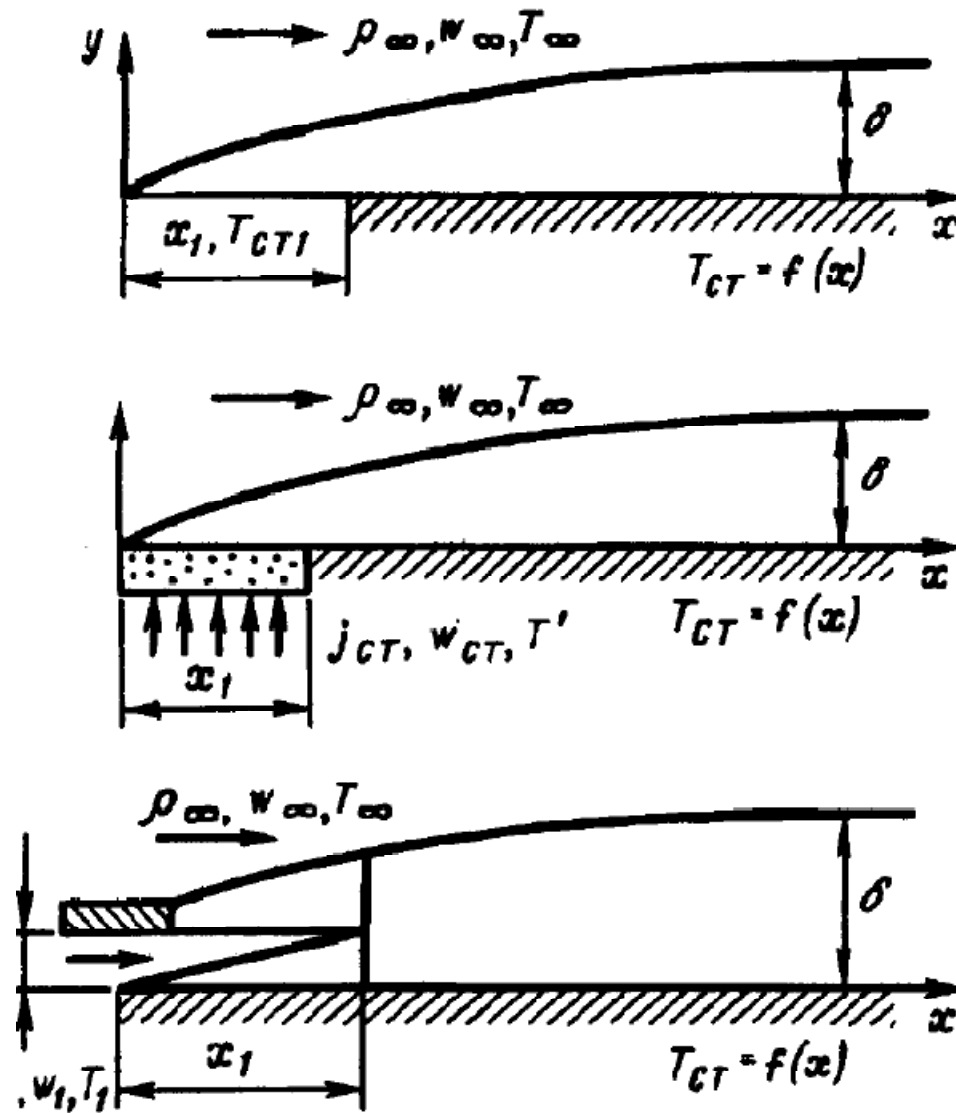


Рис. 68. Схемы возможных конструктивных вариантов газовых завес

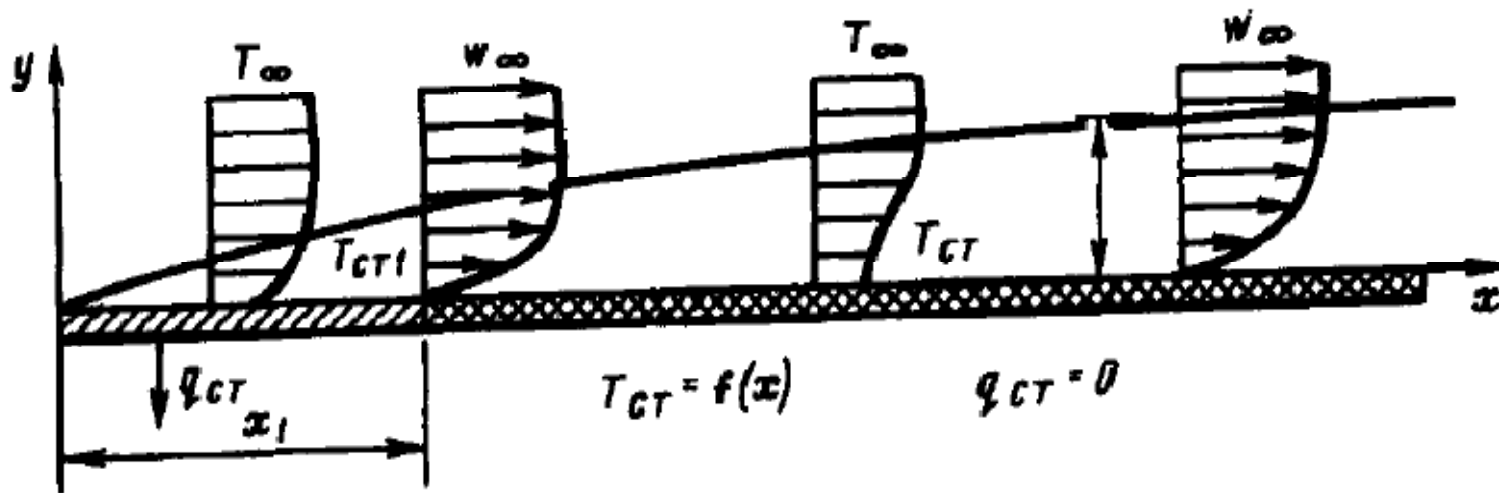


Рис. 69. Развитие теплового слоя при тепловой завесе

$$\frac{d \text{Re}_T^{**}}{dx} + \frac{\text{Re}_T^{**}}{\Delta T} \frac{d \Delta T}{dx} = 0 \quad (465)$$

$$\text{Re}_T^{**} \Delta T = \text{Re}_{T_1}^{**} \Delta T_1 \quad (466)$$

$$\delta_T^{**} \rightarrow \int_0^{\infty} \frac{w_x}{w_{\infty}} dy \quad (467)$$

$$\beta_{\max} = \frac{\int_0^{\infty} \frac{\rho w_x}{\rho_{\infty} w_{\infty}} dy}{\int_0^{\infty} \frac{\rho w_x}{\rho_{\infty} w_{\infty}} \left(1 - \frac{T - T_{\tilde{n}\delta}}{T_{\infty} - T_{\tilde{n}\delta}}\right) dy} \quad (468)$$

$$w = w_x / w_{\infty} = 2(\xi - \xi^3) + \xi^4$$

$$\xi = y / \delta, \quad \beta_{\max} = 6.0 \quad \beta_{\max} = 9$$

$$\theta = \left[1 + \frac{m+1}{2} B \left(\frac{\beta_{\max}}{\text{Re}_{T_1}^{**}} \right)^{m+1} \int_{x_1}^{\bar{x}} \text{Re}_L d\bar{x} \right]^{-\frac{1}{m+1}} \quad (469)$$

$$\theta = \left[1 + \frac{10.6}{(\text{Re}_{T_1}^{**})^2} \int_{x_1}^{\bar{x}} \text{Re}_L d\bar{x} \right]^{-0.5} \quad (470)$$

$$\theta = \left[1 + \frac{0.254}{(\text{Re}_{T_1}^{**})^{1.25}} \int_{x_1}^{\bar{x}} \text{Re}_L d\bar{x} \right]^{-0.8} \quad (471)$$

$$\theta = \left[1 + \frac{10.6}{\left(\text{Re}_{T_1}^{**}\right)^2} \text{Re}_{\Delta x} \right]^{-0.5} \quad (472)$$

$$\theta = \left[1 + \frac{0.254}{\left(\text{Re}_{T_1}^{**}\right)^{1.25}} \text{Re}_{\Delta x} \right]^{-0.8} \quad (473)$$

$$\text{Re}_{\Delta x} = \rho_{\infty} w_{\infty} (x - x_1) / \mu_0$$

$$\text{Re}_{\Delta x}^* = \text{Re}_{L_1} \left(\bar{x}^{-n+1} - 1 \right) / (n + 1) \quad (474)$$

где $\bar{x} = x / x_1$

$$\theta = \left[1 + \frac{10.6}{\left(\text{Re}_{T_1}^{**}\right)^2} \text{Re}_{L_1} \frac{\left(\bar{x}\right)^{n+1} - 1}{n + 1} \right]^{-0.5} \quad (475)$$

$$\theta = \left[1 + \frac{0.254}{(\text{Re}_{T_1}^{**})^{1.25}} \text{Re}_{L_1} \frac{(\bar{x})^{n+1} - 1}{n+1} \right]^{-0.8} \quad (476)$$

$$\theta = \left[1 + \frac{B}{2} (1+m) \beta_{\max}^{m+1} \int_{\bar{x}_1}^{\bar{x}} \frac{\psi \text{Re}_L d\bar{x}}{(\text{Re}_{T_{01}}^{**})^{m+1}} \right]^{-\frac{1}{m+1}} \quad (477)$$

$$\psi = \left[\frac{2 \arctg(M_0 \sqrt{0.5r(k-1)})}{(\sqrt{\psi} + 1) M_0 \sqrt{0.5r(k-1)}} \right]^2 \left(\frac{\mu_{cm}}{\mu_{00}} \right)^m \quad (478)$$

$$\bar{\psi} = T_{cm} / T_{cm}^* \quad (479)$$

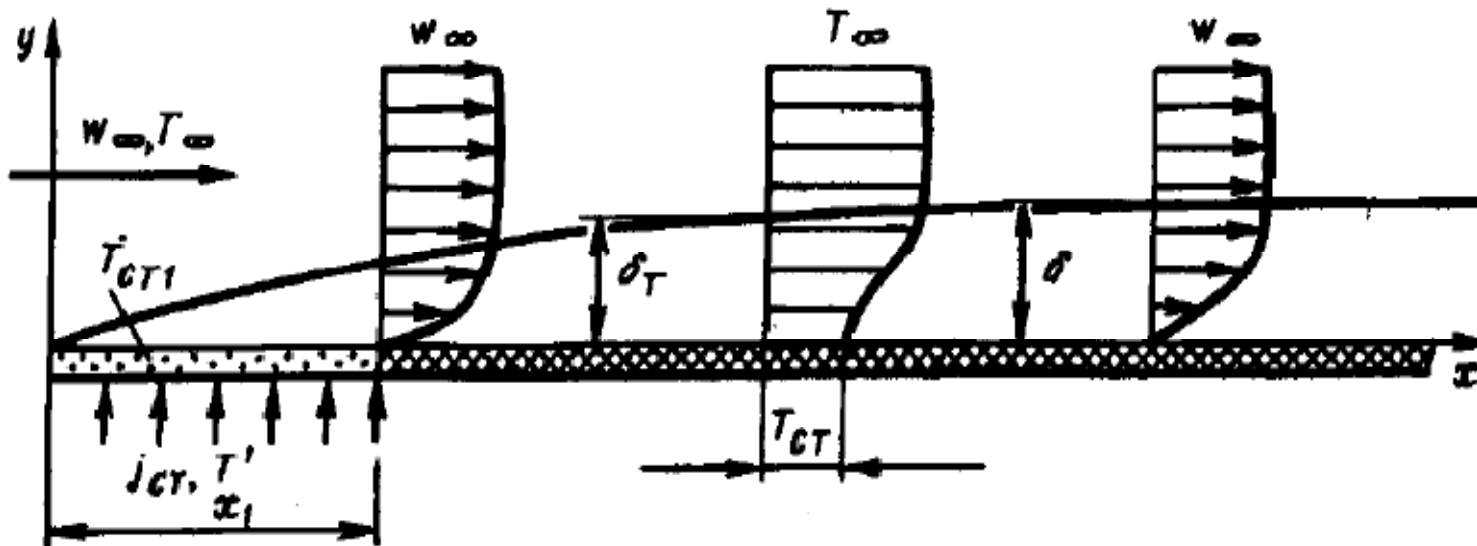


Рис. 70. Развитие теплового слоя при газовой завесе со вдувом газа через пористую поверхность

$$\frac{d \operatorname{Re}_T^{**}}{d \operatorname{Re}_x} = St + j_{cm} \quad (481)$$

$$\frac{d \operatorname{Re}_T^{**}}{d \operatorname{Re}_x} = \frac{j_{cm}}{\rho_{\infty} w_{\infty}} (1 + K_1) \quad (482)$$

$$\text{Re}_T^{**} = \text{Re}_{cm_1} (1 + K_1)$$

$$\theta = \left[1 + \frac{10.6}{\left[\text{Re}_{cm_1} (1 + K_1) \right]^2} \int_1^{\bar{x}} \text{Re}_{x_1} d\bar{x} \right]^{-0.5} \quad (483)$$

$$\theta = \left[1 + \frac{0.254}{\left[\text{Re}_{cm_1} (1 + K_1) \right]^{1.25}} \int_1^{\bar{x}} \text{Re}_{x_1} d\bar{x} \right]^{-0.8} \quad (484)$$

$$\theta = \left[1 + \frac{0.25 \text{Re}_\infty \psi_{T_1} \left(\frac{\mu_{cm_1}}{\mu_{00}} \right)^{0.25}}{(1 - K_1)^{1.25} \text{Re}_{cm_1}^{1.25}} \int_1^{\bar{x}} \psi_M u (1 - u)^{\frac{1}{k-1}} d\bar{x} \right] \quad (485)$$

$$\theta = \frac{d_1 \operatorname{Re}_{T_1}^{**}}{d \operatorname{Re}_T^{**}} \quad (486)$$

$$d_1^2 u_1 (1 - u_1^2)^{\frac{1}{k-1}} = d^2 u (1 - u^2)^{\frac{1}{k-1}} \quad (487)$$

$$\theta = \left[1 + \frac{0.25 \operatorname{Re}_{00} \psi_{T_1} \left(\frac{\mu_{cm_1}}{\mu_{00}} \right)^{0.25}}{(1 + K_1)^{1.25} \operatorname{Re}_{cm_1}^{1.25} \bar{d}^{1.25}} \int_{\frac{\bar{x}_1}{x_1}}^{\frac{\bar{x}}{x}} \psi_M \bar{d}^{m-1} d\bar{x} \right] \quad (488)$$

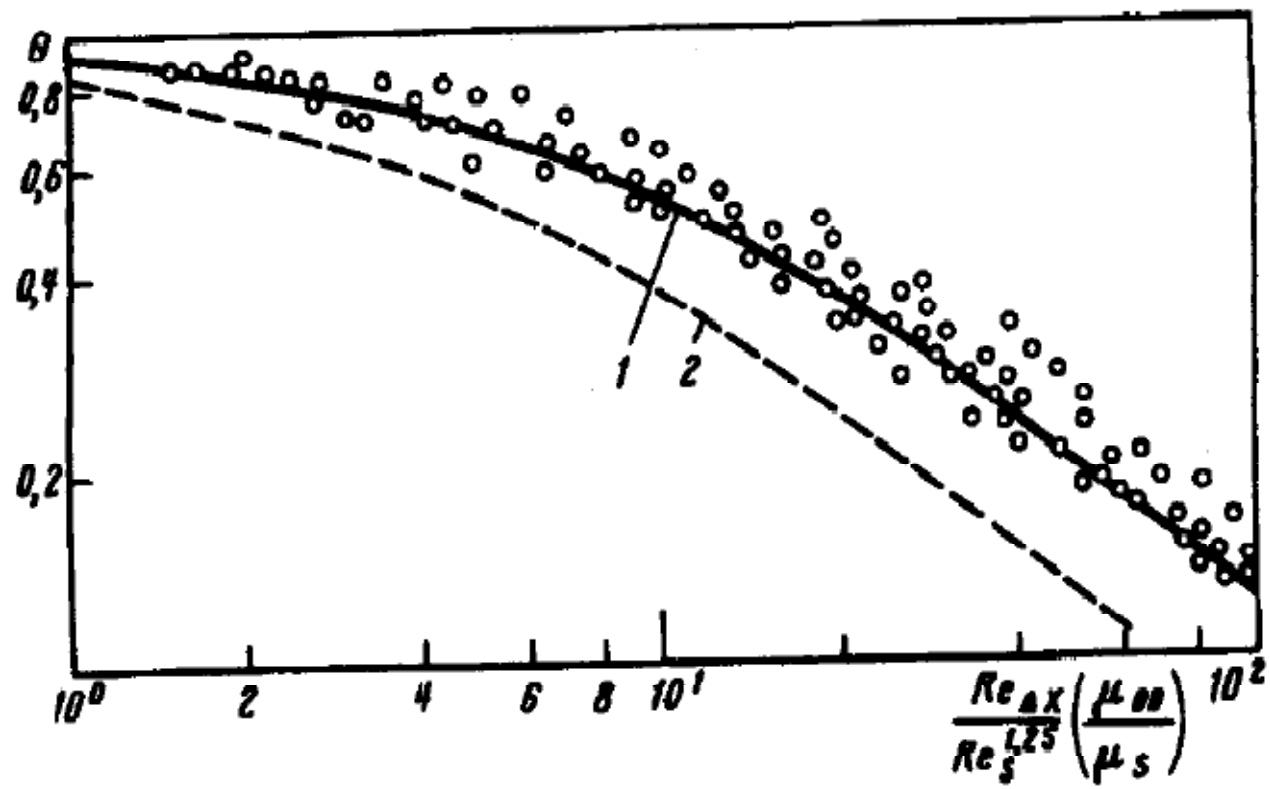


Рис. 72. Эффективность газовой завесы в сверхзвуковом потоке газа

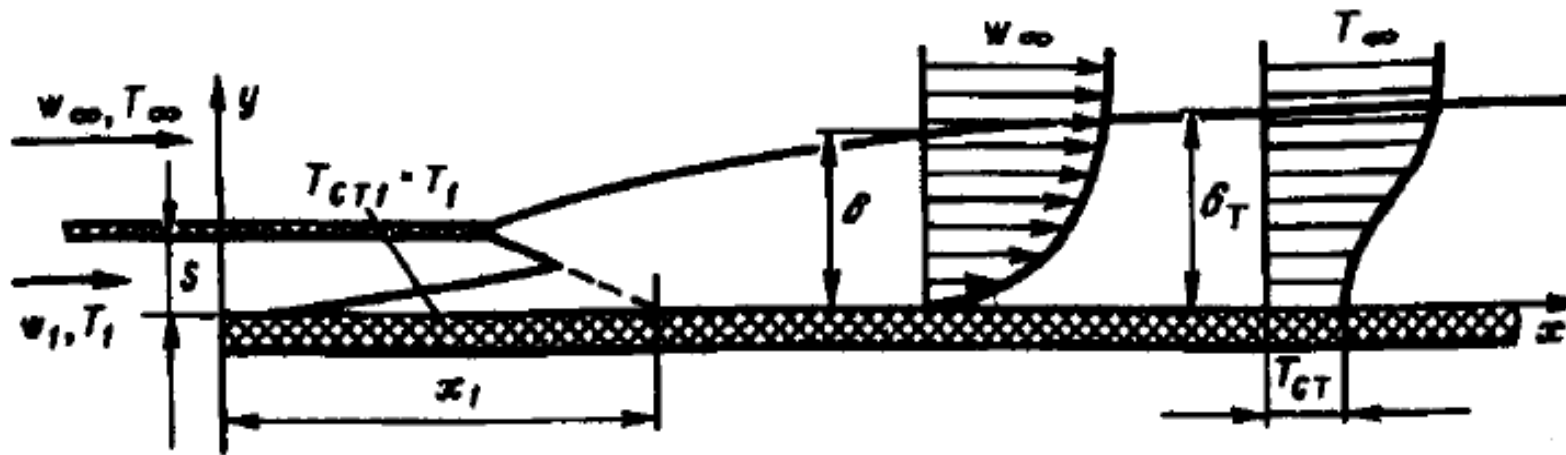


Рис. 73. Схема щелевой газовой завесы

$$x/S = (0.107 + 0.037w_1/w_0)^{-1} (w_0 + w_1)/(w_0 + w_1) \quad (489)$$

$$\int_0^{\delta} c_p \rho w T dy = c_p \rho_1 w_1 T_1 \delta + c_p \rho_{\infty} w_{\infty} T_{\infty} (\delta - S) \quad (490)$$

$$\int_0^{\delta} \rho w dy = \rho_1 w_1 S + \rho_{\infty} w_{\infty} (\delta - S) \quad (491)$$

$$\delta_T^{**} = \int_0^{\delta} \frac{\rho w}{\rho_{\infty} w_{\infty}} \left(1 - \frac{T - T_{\tilde{n}\delta}}{T_{\infty} - T_{\tilde{n}\delta}} \right) dy$$

$$\begin{aligned} \rho_{\infty} w_{\infty} \Delta T_1 \delta_{T_1}^{**} &= \int_0^{\delta} \rho w (T_{\infty} - T) dy = T_0 \rho_1 w_1 S + T_{\infty} \rho_{\infty} w_{\infty} (\delta - S) - \\ &- T_{\infty} \rho_{\infty} w_{\infty} (\delta - S) - \rho_1 w_1 S T_1 = (T_{\infty} - T_1) \rho_1 w_1 S \end{aligned} \quad (492)$$

$$\text{Re}_{T_1}^{**} = \rho_1 w_1 S / \mu_{\infty} = \text{Re}_S$$

Для ламинарного пограничного слоя

(493)

$$\theta = \left[1 + \frac{10.6}{(\text{Re}_S)^2} \text{Re}_{\Delta x}^* \right]^{-0.5} \quad (494)$$

Для турбулентного пограничного слоя

$$\theta = \left[1 + \frac{0.254}{(\text{Re}_s)^{1.25}} \text{Re}_{\Delta x}^* \right]^{-0.8} \quad (495)$$

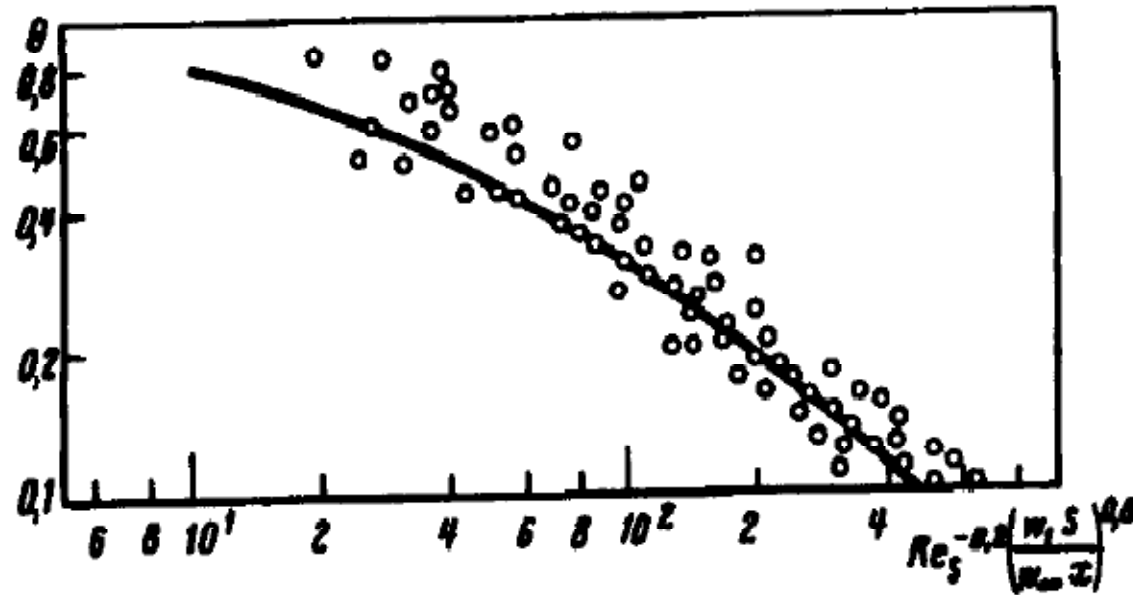


Рис. 74. Эффективность газовой завесы при щелевом вдуве: линия - расчет по формуле 495; точки - опытные данные

$$\theta = \left[1 + \frac{0.016 \beta^{1.25} \psi_{t_1} \left(\frac{\mu_{cm}}{\mu_{00}} \right)^{0.25} \text{Re}_{00} \int_{\bar{x}_1}^{\bar{x}} \psi_M u (1-u^2)^{\frac{1}{k-1}} d\bar{x}}{(\text{Re}_{S_{00}})^{1.25}} \right]^{-0.8} \quad (496)$$

$$\theta_h = (h_0 - h_{cm}^*) / (h_0 - h_{cm_1}) = (C_\infty - C_{cm}^*) / (C_\infty - C_{cm_1}) \quad (498)$$

$$C_{cm}^* = C_\infty - \theta_h (C_\infty - C_{cm_1})$$

$$\frac{d}{dx} \left[(T_{cm} - T_{cm}^*) \delta_T^{**} + (T_{cm}^* - T_\infty) \delta_{T_1}^{**} \right] = \frac{q_{cm}}{g c_p \rho_\infty w_\infty} \quad (499)$$

$$\delta_T^{**} = \int_0^{\delta_T} \frac{\rho w}{\rho_\infty w_\infty} \left(\frac{T - T'}{T_{cm} - T_{cm}^*} \right) dy \quad (500)$$

(501)

$$\delta_T^{**} = \int_0^{\delta_T} \frac{\rho w}{\rho_\infty w_\infty} \left(\frac{T' - T_\infty}{T_{cm}^* - T_\infty} \right) dy \quad (502)$$

$$\frac{d}{dx} \left[(T_{cm}^* - T_\infty) \delta_{T_1}^{**} \right] = 0 \quad (503)$$

$$\frac{d \text{Re}_T^{**}}{dx} + \frac{\text{Re}_T^{**}}{\Delta T^*} \frac{d \Delta T^*}{dx} = \text{Re}_L St_0 \quad (504)$$

$$St_0 = \frac{B}{2} (\text{Re}_T^{**})^{-m} \text{Pr}^{-n} \quad (505)$$

$$\text{Re}_T^{**} = \frac{1}{\left(1 - \frac{T_0 - T_{cm}}{T_0 - T_{cm_1}} \right)} \left[\frac{(m+1)B}{2 \text{Pr}^{0.75}} \int_{x_1}^{\bar{x}} \text{Re}_L \left(\theta - \frac{T_\infty - T_{cm}}{T_\infty - T_{cm_1}} \right)^{m+1} d\bar{x} + (\text{Re}_T^{**})_{x=x_1}^{m+1} \right]^{\frac{1}{m+1}} \quad (506)$$

$$q_{cm} = c_{p\infty} \rho_{\infty} w^{\infty} (T_{cm}^* - T_{cm}) St_0 \quad (507)$$

Пористое охлаждение

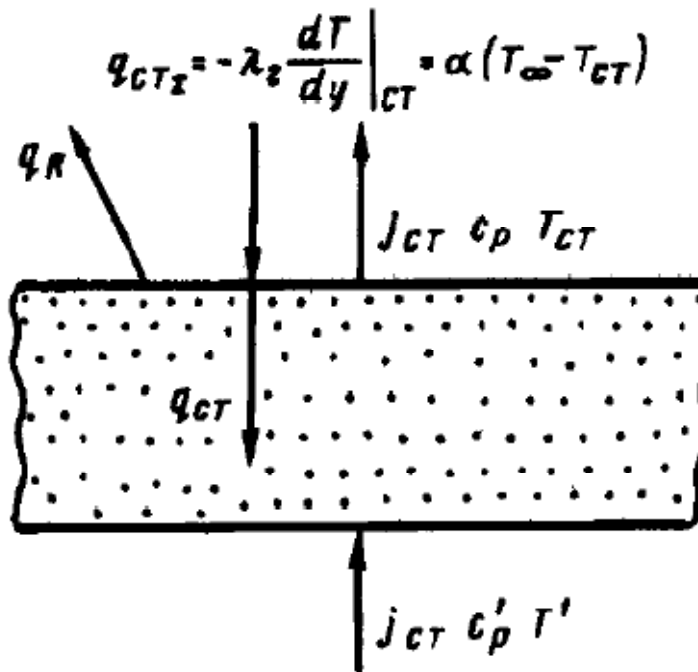


Рис. 75. Схема тепловых потоков при пористом охлаждении

$$q_{cm} = j_{cm} c'_p (T_{cm} - T') \quad (508)$$

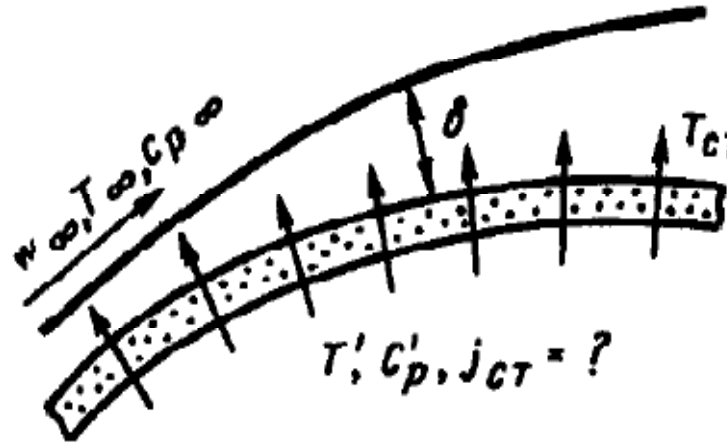


Рис. 76. К расчету пористого охлаждения

$$b_{T_1} = (T_0 - T_{cm_1}) / (T_{cm} - T') = \frac{1}{k} \quad (509)$$

$$kb_T = \psi_S \quad (510)$$

$$\frac{d \text{Re}_T^{**}}{dx} + \frac{\text{Re}_T^{**}}{\Delta T} \frac{d(\Delta T)}{dx} = \text{Re}_L St_0 \psi_S \left(\frac{k+1}{k} \right) \quad (511)$$

$$\text{Re}_T^{**} = \frac{1}{\Delta T} \left[\frac{1+m}{2 \text{Pr}^{n_1}} B \text{Re}_{L_0} \int_{\bar{x}_0}^{\bar{x}} \Delta T^{1+m} w \psi_S \left(\frac{1+k}{k} \right) dx + \left(\text{Re}_T^{**} \Delta T \right)_{\bar{x}_0}^{1+m} \right]^{\frac{1}{1+m}}$$

$$j_{cm} = \rho_\infty w_\infty St_0 \psi_S b_{T_1} \quad (512)$$

$$\text{Re}_T^{**} = \left[\frac{1+m}{2 \text{Pr}^{n_1}} B \psi_S \left(\frac{k+1}{k} \right) \text{Re}_{L_1} \int_0^{\bar{x}} w_0 d\bar{x} \right]^{\frac{1}{m+1}} \quad (513)$$

$$j_{cm} = \left(\frac{B}{2} \right)^{\frac{1}{m+1}} \frac{\mu_0 w \text{Re}_{L_0}^{\frac{1}{m+1}} \psi_S^{\frac{1}{m+1}} b_{T_1}}{L \text{Pr}^{\frac{n_1}{m+1}} \left[(1+m)(1+b_{T_1}) \int_0^{\bar{x}} w_0 d\bar{x} \right]^{\frac{m}{m+1}}} \quad (514)$$

(515)

$$j_{cm} = \left(\frac{B}{2}\right)^{\frac{1}{m+1}} \frac{\mu_{\infty}}{L} \frac{\operatorname{Re}_{L_0}^{\frac{1}{m+1}} \psi_S^{\frac{1}{m+1}} b_{T_1}}{\operatorname{Pr}^{\frac{n_1}{m+1}} \left[(1+m)(1+b_{T_1}) \bar{x} \right]^{\frac{m}{m+1}}} \quad (516)$$

$$j_{cm} = \left(\frac{B}{2}\right)^{\frac{1}{m+1}} \frac{\mu_{\infty}}{L} \frac{\left(\bar{x}\right)^{\frac{n-m}{1+m}} \operatorname{Re}_{L_0}^{\frac{1}{m+1}} \psi_S^{\frac{1}{m+1}} b_{T_1}}{\operatorname{Pr}^{\frac{n_1}{m+1}} \left[(1+m)(1+b_{T_1}) \right]^{\frac{m}{m+1}}} \quad (517)$$

Теплообмен при течения разреженных газов

$$\mu = 0.499 \rho \bar{v} \bar{l} \quad (518)$$

$$\bar{v} = \sqrt{8/\pi} \sqrt{p/\rho} = a \sqrt{8/\pi k}, \quad (519)$$

где $k = c_p / c_v$

$$\bar{l} = 1.255 \sqrt{k \nu} / a \quad (520)$$

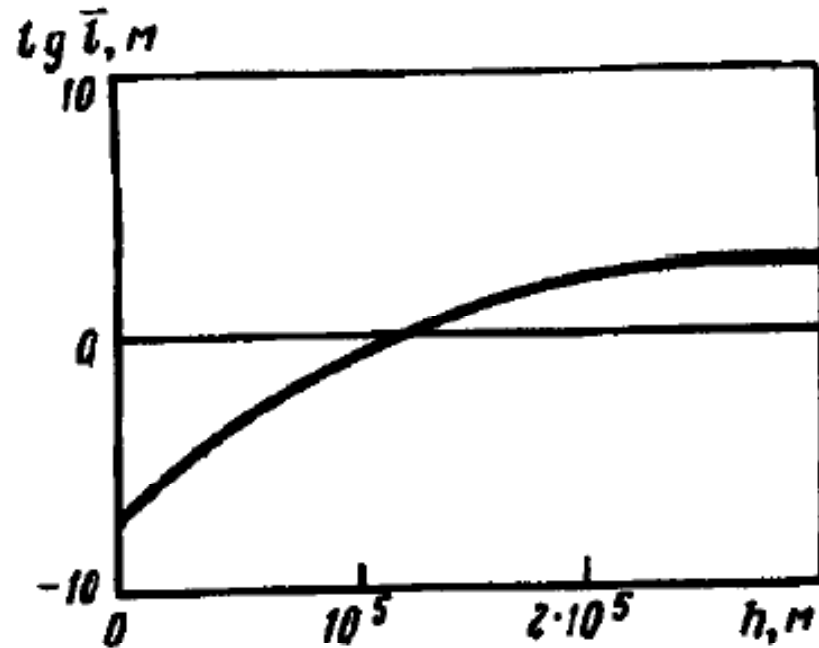


Рис. 77. Зависимость средней длины пробега молекул воздуха от высоты над поверхностью Земли

$$\frac{\bar{l}}{\delta} = \frac{\bar{l} L}{L \delta} \approx \frac{L \nu}{\delta a L} = \frac{L M}{\delta \text{Re}} \quad (521)$$

$$\frac{\bar{l}}{\delta} \approx \frac{M}{\text{Re}} \quad (522)$$

$$\frac{L}{\delta} \approx \frac{M}{\sqrt{\text{Re}}} \quad (523)$$

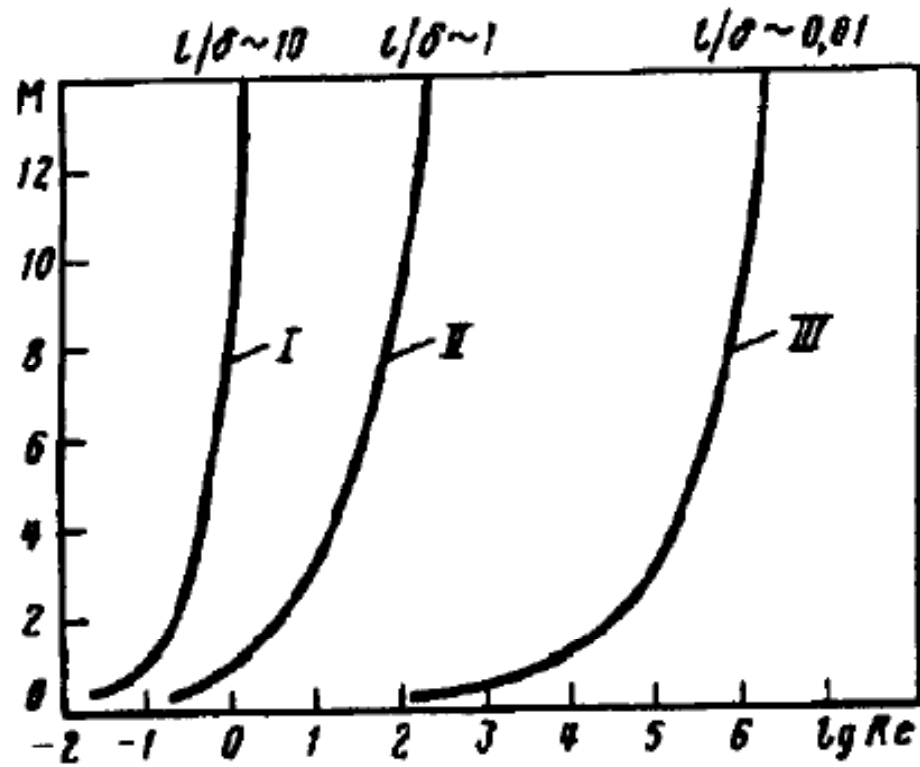


Рис. 77. Области течения газа

$$\alpha = (e_{II} - e_0) / (e_{II} - e_{cm}) \quad (524)$$

$$\sigma = \frac{\overline{u_{II}} - \overline{u_0}}{\overline{u_{II}}} \quad (525)$$

$$q_{cв.м} = \alpha(e_{II} - e_{cm}) \quad (526)$$

$$e_{II} = e_{nocm} = \int_{-\infty}^{+\infty} \int_{-\infty}^{+\infty} \int_{-\infty}^{+\infty} \frac{1}{2} v v^2 v_x f dv_x dv_y dv_z \quad (527)$$

$$f = \frac{\rho_0}{m(2\pi RT)^{3/2}} \exp \left[\frac{(v_x - w \sin \theta)^2 + (v_y - w \cos \theta)^2 + v_z^2}{2RT_0} \right] \quad (528)$$

$$e_{вн} = j_1 \frac{mRT_0}{2} N \quad (529)$$

$$N = \int_{-\infty}^{+\infty} \int_{-\infty}^{+\infty} \int_{-\infty}^{+\infty} v_x f dv_x dv_y dv_z \quad (530)$$

$$e_{II} = e_{nocm} + e_{BH} \quad (531)$$

$$e_{cm} = (4 + j) \frac{mRT_{cm}}{2} N \quad (532)$$

$$q_{cвм} = \left\langle \alpha v_{\infty} T_{\infty} R \sqrt{\frac{RT_{\infty}}{2\pi}} \left[S^2 + \frac{k}{k+1} - \frac{k+1}{2(k-1)} \frac{T_{cm}}{T_{\infty}} \right] \times \right. \\ \left. \times \left\{ \exp(-S \sin \theta)^2 + \sqrt{\pi} S \sin \theta [1 + erf(S \sin \theta)] \right\} - \right. \\ \left. - \frac{1}{2} \exp(-S \sin \theta)^2 \right\rangle \quad (533)$$

$$q_{cвм} \approx \frac{1}{2} \alpha \rho_{\infty} w_{\infty}^3 \sin \theta \left[1 - \frac{k+1}{2(k-1)} \frac{T_{cm}}{T_{\infty}} \right] \quad (534)$$

$$\frac{T_{cm}^*}{T^*} \approx \frac{2k}{k+1} \quad (535)$$

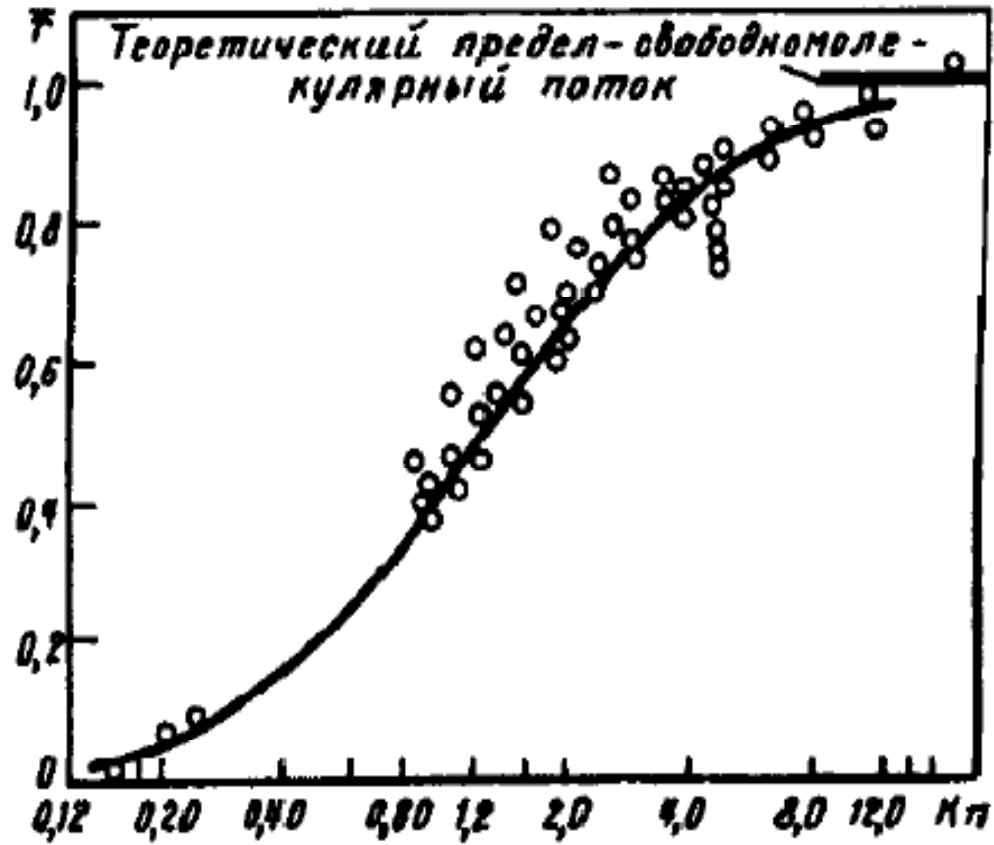


Рис. 77. Зависимость коэффициента восстановления от числа K_p

$$q = \frac{1}{2} \rho_{\infty} w_{\infty}^3 \sin \infty \quad (536)$$

$$\alpha \beta St = \frac{2k}{k+1} \frac{Q}{\rho_{\infty} w_{\infty} F c_p (T_{cm}^* - T_{cm})} \quad (537)$$

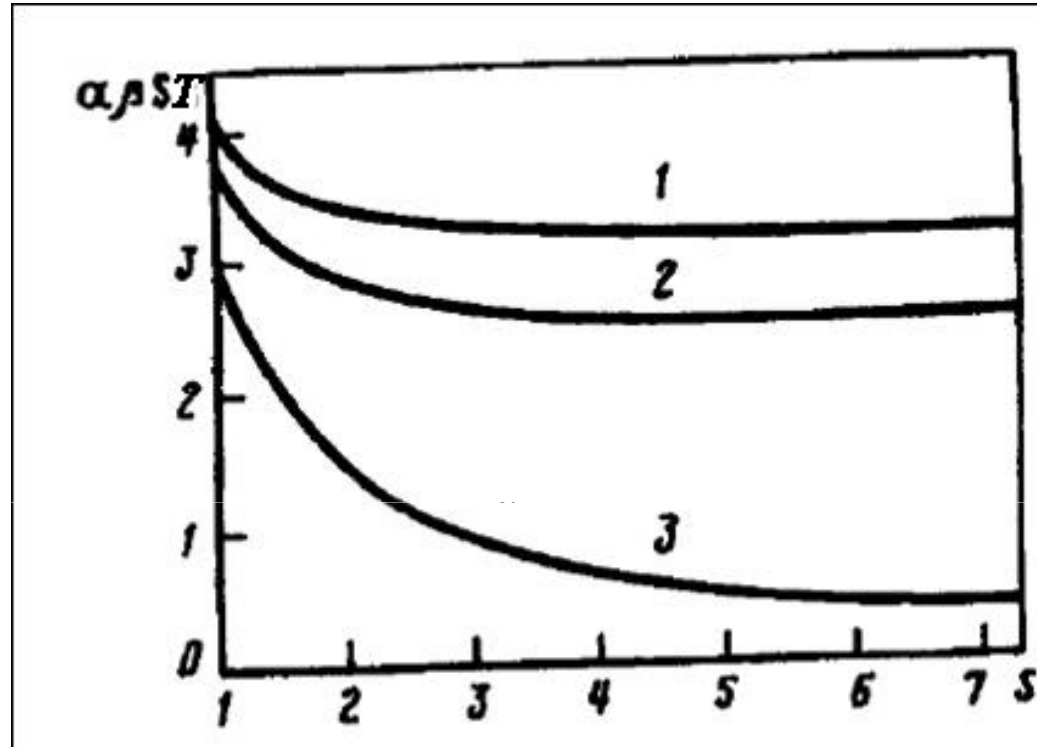


Рис. 78. Теплообмен цилиндра (1), сферы (2) и плоской пластины (3) в свободномолекулярном потоке

$$q_{c\delta M} = \alpha \rho c_V \frac{k+1}{2} \sqrt{\frac{RT_\infty}{2\pi}} (T_\infty - T_{cm}) \quad (538)$$

$$\bar{w}_S = \frac{2-\sigma}{\sigma} \bar{l} \left(\frac{\partial w}{\partial y} \right)_{cm} + \frac{3}{4} \sqrt{\frac{RT_\infty}{2\pi}} \left(\frac{dT}{dx} \right) \quad (539)$$

$$\Delta T_S = T_{z.cm.} - T_{cm} = 2 \frac{2-\alpha}{\alpha} \frac{k}{k+1} \frac{\bar{l}}{\text{Pr}} \left(\frac{\partial T}{\partial y} \right)_{cm} \quad (540)$$

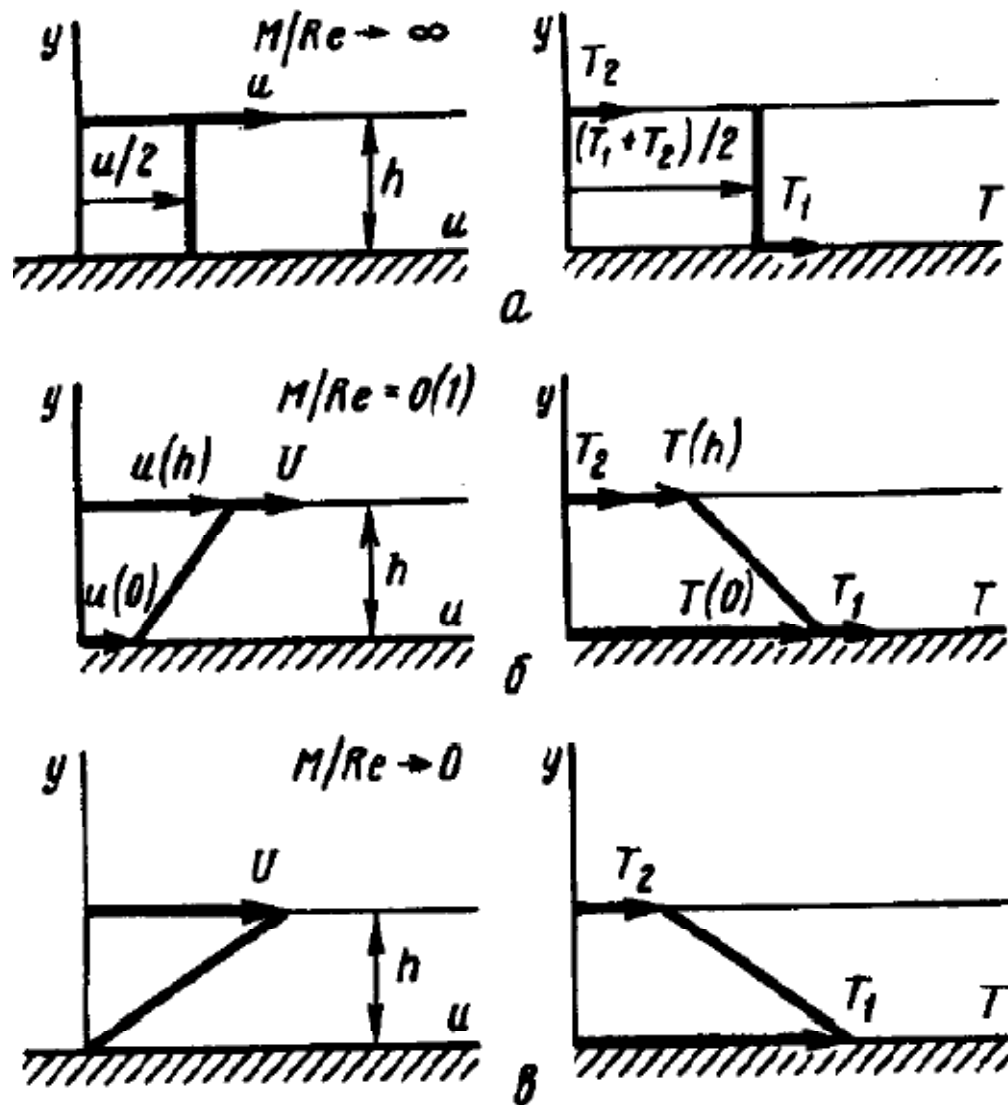


Рис. 79. Течение газа со скольжением между двумя пластинами:
 а - свободномолекулярное течение; б - течение в сплошной среде; в -
 течение со скольжением

$$Nu = \frac{Nu_0}{1 + \xi M Nu_0 / Re Pr}$$

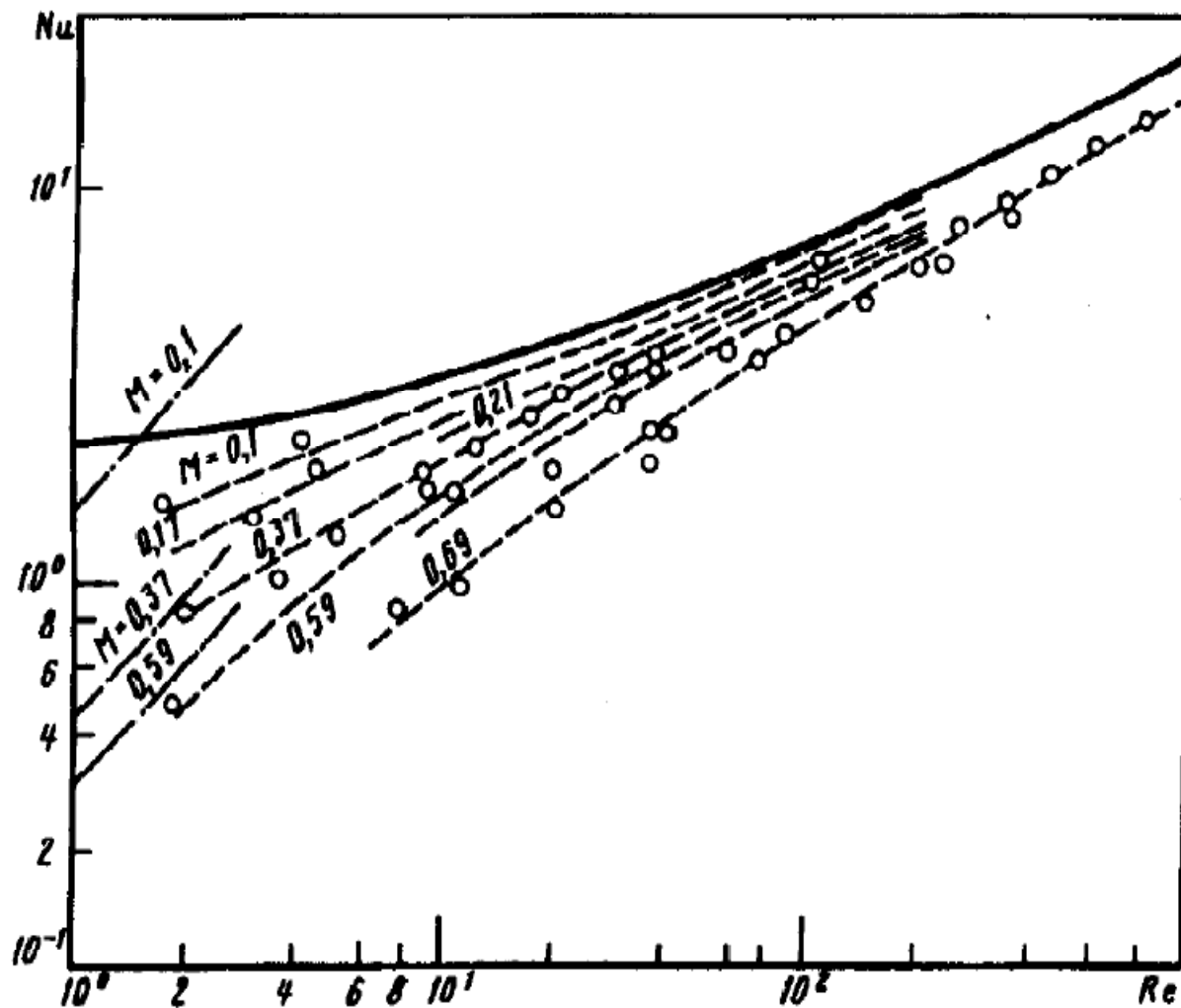


Рис. 80. Теплообмен сферы в дозвуковом потоке разреженного газа

Контрольные вопросы

- Теплообмен при вынужденном течении жидкости в трубах. Течение в каналах
- Теплообмен при вынужденном ламинарном течении жидкости в трубах
- Теплообмен при турбулентном течении жидкости в трубах
- Влияние шероховатости поверхности на теплообмен при турбулентном течении жидкости в трубах, в изогнутых трубах и трубах некруглого поперечного сечения
- Теплообмен при поперечном обтекании труб
- Методы тепловой защиты тел от воздействия высокоэнтальпийного потока газа. Конвективный теплообмен при наличии газовых завес
- Пористое охлаждение
- Теплообмен при течения разреженных газов