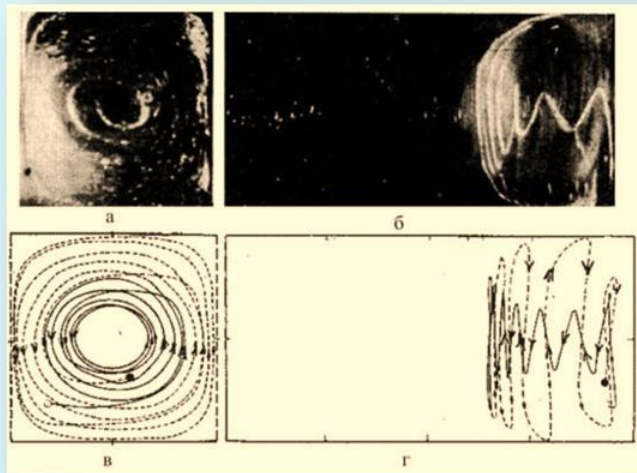
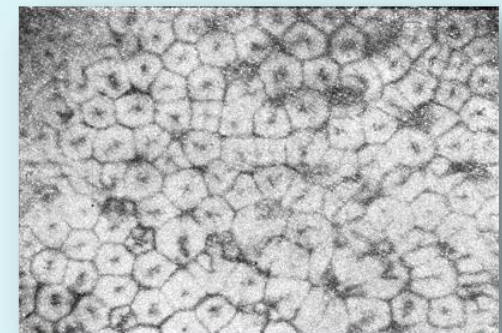
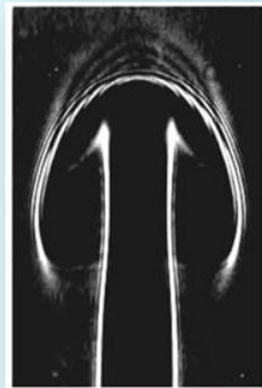


Тема 2 (2 час, лекция 1)

Лекция 7



Свободно-конвективный теплообмен в однофазной среде. Теплоотдача при свободном течении жидкости у вертикальной стенки, вблизи горизонтальных труб и пластин. Анализ задачи о конвективном теплообмене при свободном движении жидкости методом подобия. Расчетные уравнения для теплоотдачи. Теплообмен при свободной конвекции в замкнутых объемах.



Теплообмен при свободной (естественной) конвекции в большом объеме около вертикальных поверхностей

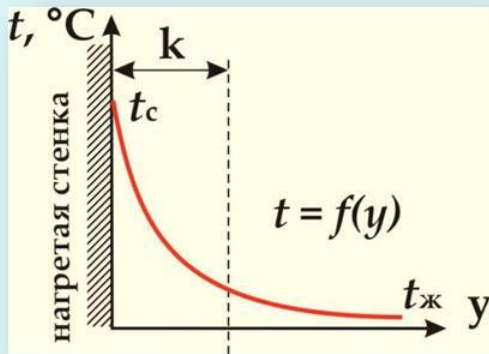
Свободное движение возникает за счет массовых (объемных) сил, приложенных к частицам жидкости внутри системы. Такими силами являются сила тяжести, центробежная сила и некоторые другие. Наиболее хорошо изучено свободное движение жидкости, вызванное гравитационными силами (термогравитационная конвекция в неравномерно нагретой жидкости).

$$\rho \frac{D\vec{w}}{D\tau} = \rho \cdot \vec{g} - \vec{\nabla}P + \mu \cdot \nabla^2 \vec{w}$$

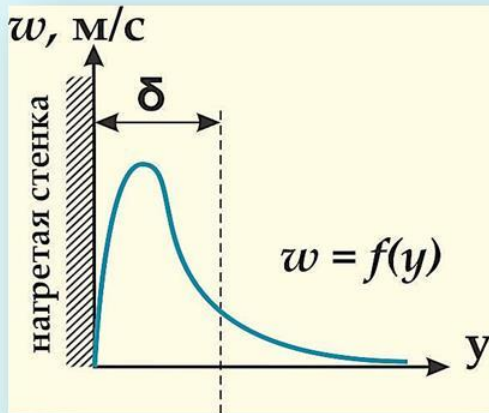
При теплообмене температура жидкости переменна. Поэтому возникает разность плотностей и, как следствие, разность гравитационных сил, представляющая собой подъемную силу. Работу по перемешиванию жидкости совершает сила тяжести. В технических задачах ускорение силы тяжести от точки к точке рассматриваемого пространства практически не изменяется. Здесь мы будем рассматривать теплоотдачу только при свободном гравитационном движении.

Задачу решаем при следующих упрощениях

1. Силы инерции малы по сравнению с силами вязкости и тяжести;
2. Конвективный и кондуктивный перенос учитывался только по нормали к стенке;
3. Градиент давления равен нулю;
4. Физические параметры (за исключением плотности) неизменны.



$$\left. \begin{aligned} \alpha &= -\frac{\lambda}{\theta_c} \left(\frac{d\theta}{dy} \right)_{y=0} \\ \theta &= t - t_{\text{ж}} \quad \theta_c = t_c - t_{\text{ж}} \\ \theta &= \theta_c \left(1 - \frac{y}{\delta} \right)^2 \end{aligned} \right\} \left(\frac{d\theta}{dy} \right)_{y=0} = \left(-\frac{2\theta_c}{\delta} + \frac{2\theta_c}{\delta^2} y \right)_{y=0}$$



$$\alpha = \frac{2\lambda}{\delta}$$

$$\mu \frac{d^2 w_x}{dy^2} = -g(\rho_0 - \rho) \quad \rho = \rho_0(1 - \beta\theta)$$

$$\frac{d^2 w_x}{dy^2} = -\frac{g\rho_0\beta\theta_c}{\mu} \left(1 - \frac{y}{\delta} \right)^2$$

Г.У.

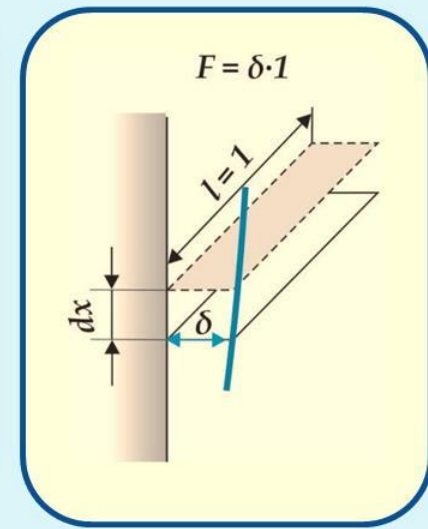
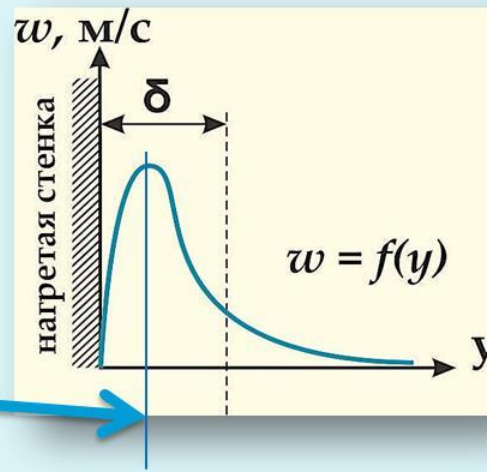
$$w_x|_{y=0} = 0$$

$$w_x|_{y=\delta} = 0$$



$$w_x = A \left(\frac{\delta}{4} y - \frac{1}{2} y^2 + \frac{1}{3\delta} y^3 - \frac{1}{12\delta^2} y^4 \right)$$

$$w_{x \max} = (w_x)_{y=0.38\delta} = (w_x)_{y \approx \frac{\delta}{3}}$$



$$\overline{w_x} = \frac{1}{\delta} \int_0^{\delta} w_x dx = \frac{g\rho_0\beta\theta_c\delta^2}{40\mu}$$

$$\bar{\theta} = \frac{1}{\delta} \int_0^{\delta} \theta dx = \frac{1}{\delta} \int_0^{\delta} \theta_c \left(1 - \frac{y}{\delta} \right)^2 dx = \frac{\theta_c}{3}$$

$$dG = d(\rho_0 \overline{w_x} \delta) = d \left(\frac{g\rho_0^2\beta\theta_c\delta^3}{40\mu} \right) = \frac{3g\rho_0^2\beta\theta_c}{40\mu} \delta^2 d\delta$$

$$dQ = c_p \bar{\theta} dG = \alpha \theta_c dx = \frac{2\lambda\theta_c}{\delta} dx$$

$$\Rightarrow dG = \frac{2\lambda}{c_p} \frac{\theta_c}{\bar{\theta}} dx = \frac{6\lambda}{c_p} dx$$

$$\left. \begin{aligned} & \frac{3g\rho_0^2\beta\theta_c}{40\mu} \delta^2 d\delta = \frac{6\lambda}{c_p} dx \\ & \frac{3g\rho_0^2\beta\theta_c}{40\mu} \delta^2 d\delta = \frac{6\lambda}{c_p} dx \end{aligned} \right\}$$

$$\sqrt[4]{\frac{\mu\lambda x}{g\rho_0^2\beta\theta_c c_p}} \delta^3 d\delta = \frac{6\lambda}{c_p} dx \quad \text{с учетом } \delta_{x=0} = 0$$

$$\delta = 4.23 \sqrt[4]{\frac{\mu\lambda x}{g\rho_0^2\beta\theta_c c_p}}$$

используем для определения

$$\alpha = \frac{2\lambda}{\delta} = 0.473 \cdot \sqrt[4]{\frac{c_p g\rho_0^2\beta\theta_c \lambda^3}{\mu x}}$$

$$\alpha = \frac{2\lambda}{\delta} = 0.473 \cdot \sqrt[4]{\frac{c_p g \rho_0^2 \beta \theta_c \lambda^3}{\mu x}}$$

$$\text{Nu} \equiv \frac{\alpha x}{\lambda} = 0.473 \cdot \sqrt[4]{\frac{g \beta \theta_c x^3}{\left(\frac{\mu}{\rho_0}\right)^2} \frac{\mu c_p}{\lambda}} = 0.473 (\text{Gr}_{\text{ж}x} \cdot \text{Pr}_{\text{ж}})^{0.25}$$

$$\text{Gr}_{\text{ж}x} \equiv \frac{g \beta_{\text{ж}} \theta_c x^3}{v_{\text{ж}}^2} \quad \text{Pr}_{\text{ж}} \equiv \frac{\mu_{\text{ж}} c_p}{\lambda_{\text{ж}}} \equiv \frac{v_{\text{ж}}}{a_{\text{ж}}}$$

$t_c = \text{const}$

$$\text{Nu}_{\text{ж}x} = 0.473 (\text{Gr}_{\text{ж}x} \cdot \text{Pr}_{\text{ж}})^{0.25}$$

$$\bar{\alpha} = \frac{1}{l} \int_0^l \alpha dx = \frac{1}{l} \int_0^l c x^{-0.25} dx = \frac{4}{3} c l^{-0.25} = \frac{4}{3} \alpha_{x=l}$$

$$\bar{\text{Nu}}_{\text{ж}l} = 0.63 (\text{Gr}_{\text{ж}l} \cdot \text{Pr}_{\text{ж}})^{0.25}$$

Исследования показали

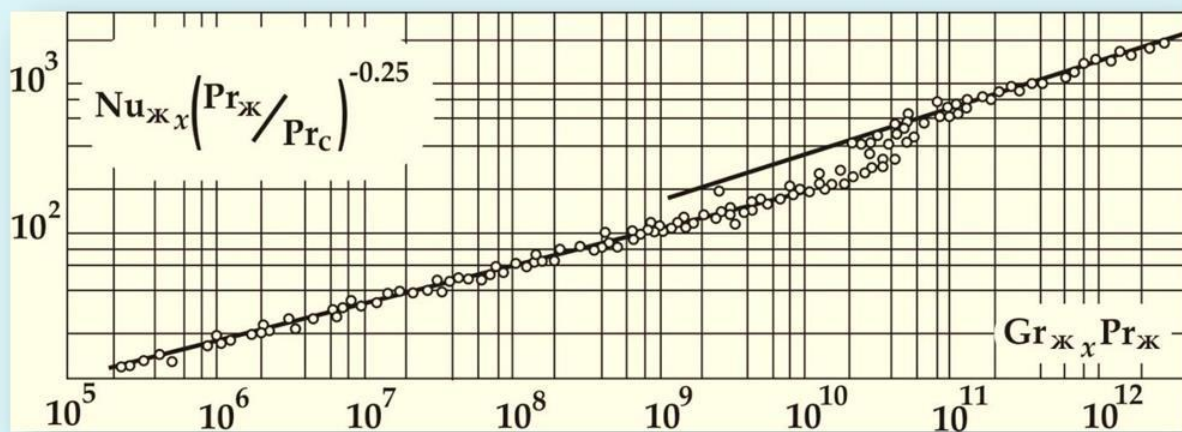
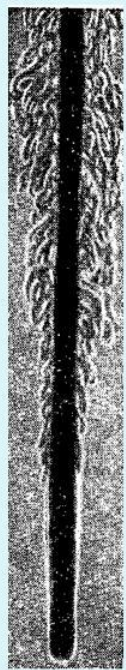
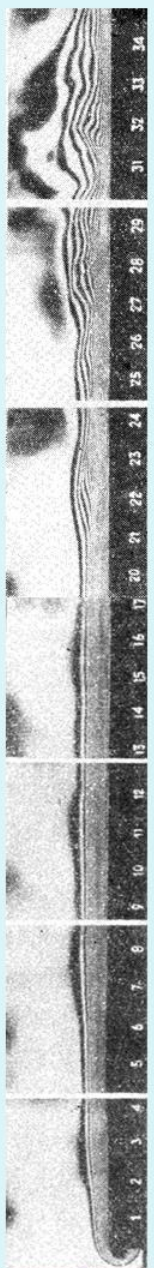
$q_c = \text{const}$

$$\bar{\alpha} = \frac{5}{4} \alpha_{x=l}$$

$$\text{Nu}_{\text{ж}x} = 0.60 (\text{Gr}_{\text{ж}x} \cdot \text{Pr}_{\text{ж}})^{0.25} \varepsilon_t$$

$$\varepsilon_t = \left(\frac{\text{Pr}_{\text{ж}}}{\text{Pr}_c} \right)^{0.25}$$

$$\bar{\text{Nu}}_{\text{ж}l} = 0.75 (\text{Gr}_{\text{ж}l} \cdot \text{Pr}_{\text{ж}})^{0.25} \varepsilon_t$$



$$Ra_{жx} = Gr_{жx} Pr_{ж}$$

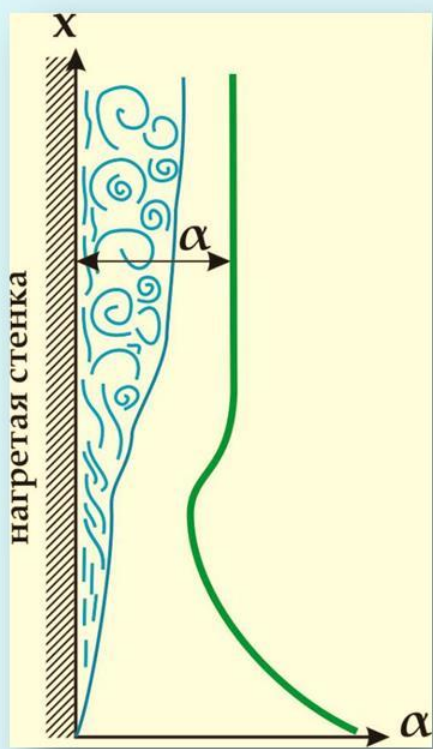
Ламинарное движение $10^3 < Gr_{жl} \cdot Pr_{ж} < 10^9$

$$t_{ст} = \text{const} \quad \overline{Nu}_{жl} = 0,63 \cdot (Gr_{жl} \cdot Pr_{ж})^{0.25}$$

$$q = \text{const} \quad \overline{Nu}_{жl} = 0,75 \cdot (Gr_{жl} \cdot Pr_{ж})^{0.25} \left(\frac{Pr_{ж}}{Pr_{ст}} \right)^{0.25}$$

Турбулентное движение $Gr_{жx} Pr_{ж} > 6 \cdot 10^{10}$

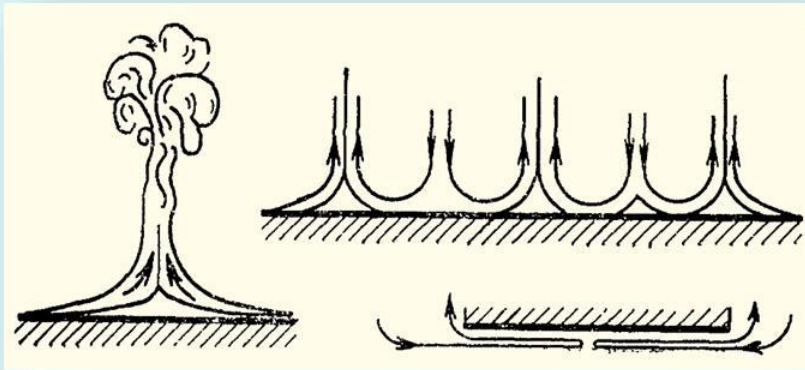
$$Nu_{жx} = 0,15 \cdot (Gr_{жx} \cdot Pr_{ж})^{0.33} \left(\frac{Pr_{ж}}{Pr_{ст}} \right)^{0.25}$$



Теплоотдача при свободной конвекции около горизонтальной пластины

Пластина (или плита) может быть обращена теплоотдающей поверхностью вверх или вниз. Для оценочных расчетов можно использовать формулы для вертикальной пластины, характерным размером является меньший, при этом если теплоотдающая поверхность обращена вверх, то коэффициент теплоотдачи увеличивается на 30%, а если теплоотдающая поверхность обращена вниз – уменьшается на 30%.

Более точные результаты можно получить для среднего коэффициента теплоотдачи горизонтальной пластины с теплоотдающей поверхностью, обращенной вверх, при постоянной температуре поверхности:

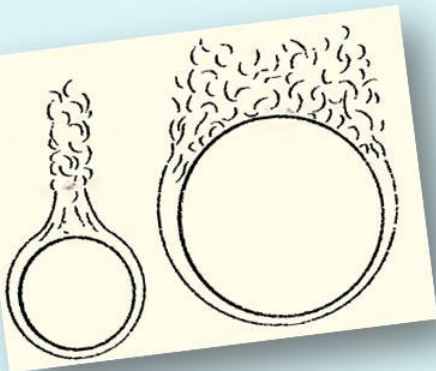
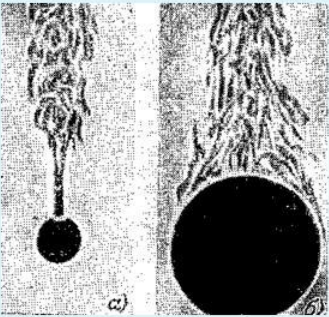
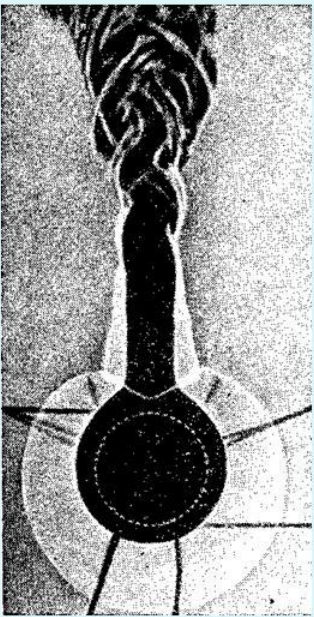


$$Ra_{жl} \leq 10^5$$

$$\overline{Nu}_{жl} = \frac{0.766 \cdot Ra_{жl}^{\frac{1}{5}}}{\left[1 + \left(\frac{0.322}{Pr_{ж}} \right)^{\frac{11}{20}} \right]^{\frac{4}{11}}}$$

$$Ra_{жl} > 10^5$$

$$\overline{Nu}_{жl} = \frac{0.15 \cdot Ra_{жl}^{\frac{1}{3}}}{\left[1 + \left(\frac{0.322}{Pr_{ж}} \right)^{\frac{11}{20}} \right]^{\frac{20}{33}}}$$



И.М. Михеева
$$\overline{Nu}_{\text{ж}d} = 0.5 \cdot (\text{Gr}_{\text{ж}d} \cdot \text{Pr}_{\text{ж}})^{0.25} \left(\frac{\text{Pr}_{\text{ж}}}{\text{Pr}_{\text{с}}} \right)^{0.25}$$

В эксперименте было обнаружено, что для тонких проволочек ($d=0,2 - 1$ мм) условия теплоотдачи своеобразны. Так как поверхность проволоки мала, то и количество передаваемого тепла незначительно. При малых температурных напорах вокруг проволоки образуется неподвижная пленка нагретого воздуха. Этот режим называется пленочным, он обнаружен при $Ra_{\text{ж}d} < 1$

$$\overline{Nu}_{\Gamma d} = 0.5 \quad \Rightarrow \quad \bar{\alpha} = 0.5 \frac{\lambda_{\Gamma}}{d}$$

$$t_{\Gamma} = \frac{t_{\text{ж}} + t_{\text{с}}}{2}$$

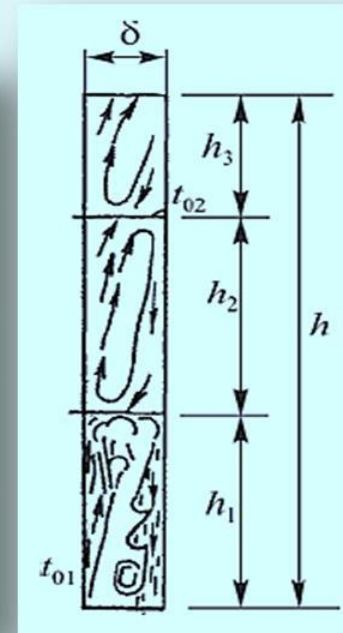
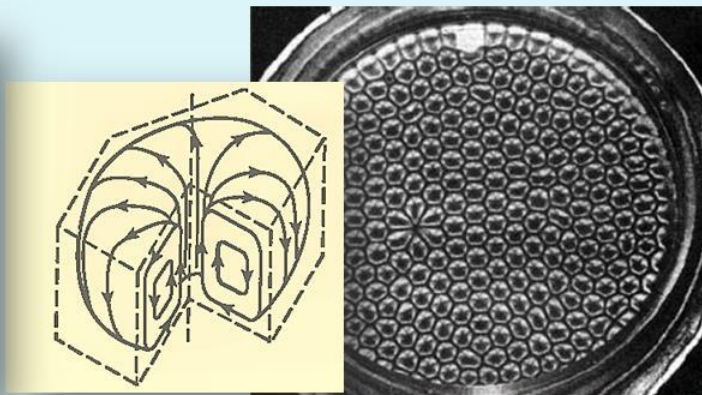
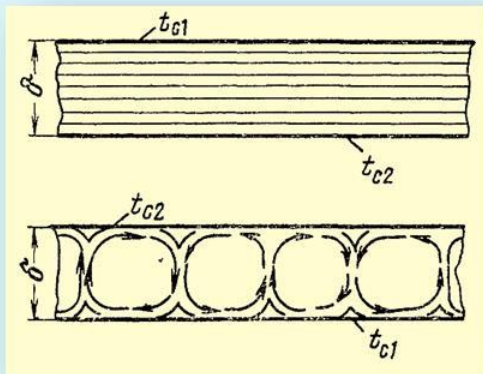
Теплообмен осуществляется теплопроводностью, режим неустойчив.

Переходный режим:

$$Ra_{\Gamma d} < 500$$

$$\overline{Nu}_{\Gamma d} = 1.18 \cdot Ra_{\Gamma d}^{0.125}$$

Свободная конвекция в ограниченных объемах.



М.А. Михеевым

для плоских прослоек

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

для цилиндрических прослоек

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

$$\lambda_{\text{ЭКВ}} = \lambda \cdot \varepsilon_{\kappa}$$

$$t_{\text{ж}} = 0.5(t_1 + t_2)$$

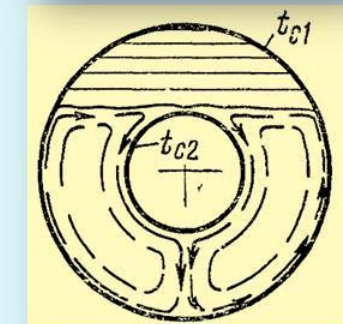
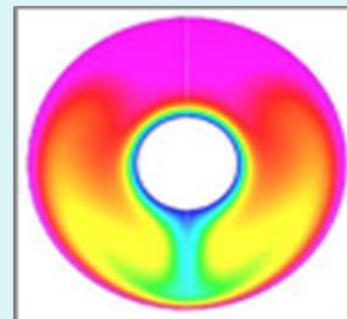
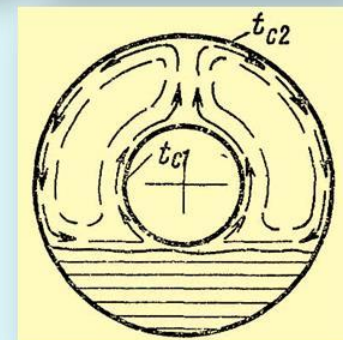
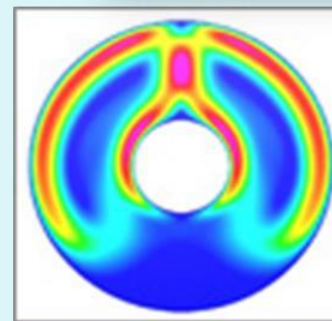
$$\varepsilon_{\kappa} = 1$$

$$(\text{Gr}_{\text{ж}\delta} \cdot \text{Pr}_{\text{ж}}) \leq 10^3$$

$$\varepsilon_{\kappa} = 0.18(\text{Gr}_{\text{ж}\delta} \cdot \text{Pr}_{\text{ж}})^{0.25}$$

$$(\text{Gr}_{\text{ж}\delta} \cdot \text{Pr}_{\text{ж}}) > 10^3$$

$$\text{Gr}_{\text{ж}\delta} = \frac{g\beta(t_1 - t_2)L^3}{\nu_{\text{ж}}^2}$$



Расчетные зависимости для чисел Нуссельта, естественная конвекция в ограниченном пространстве в прямоугольных контурах

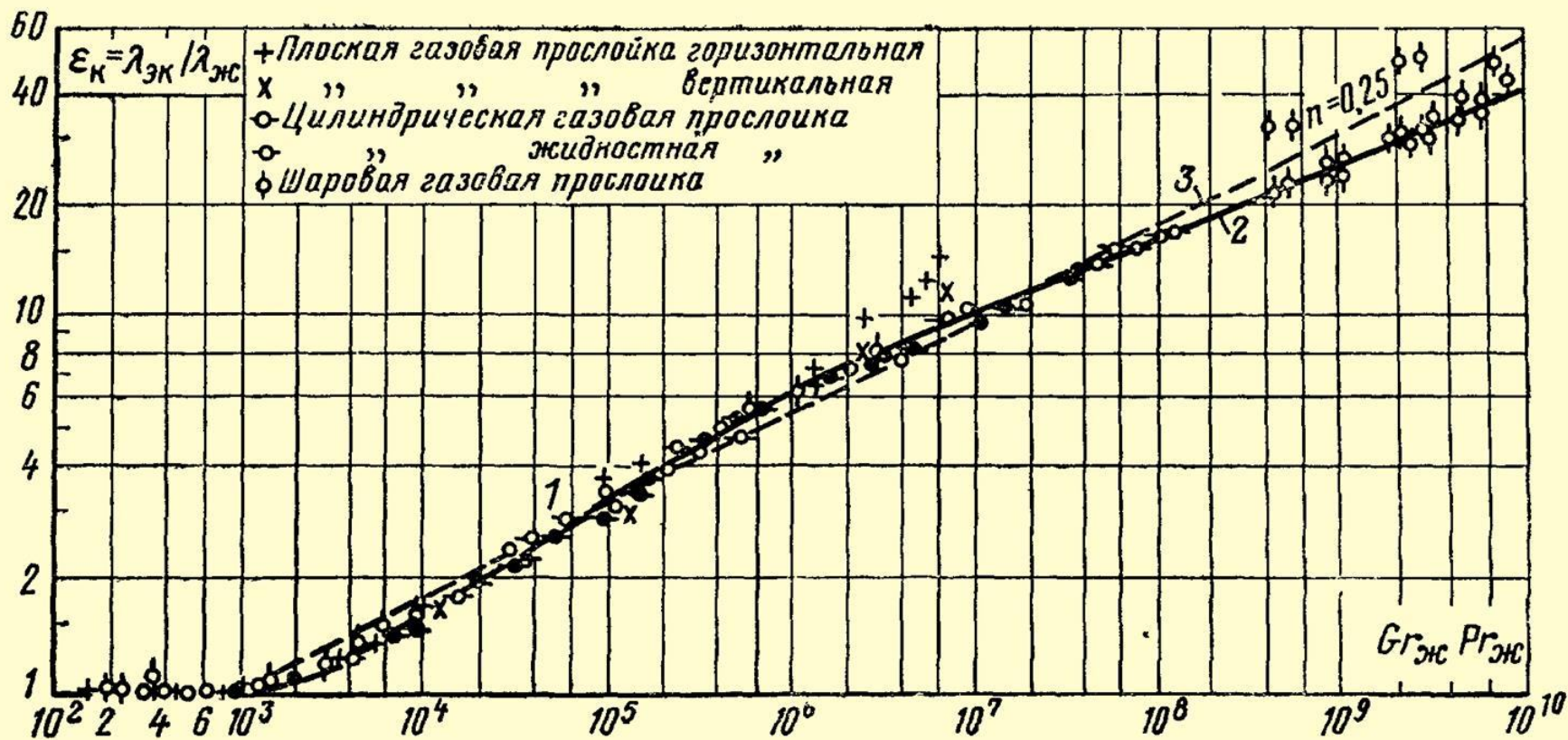
№ п/п	Теплофизические характеристики, режимы движения потока	Уравнения	Авторы
1	На вертикальных поверхностях – постоянные температуры t_0 ($y = 0$) и t_1 ($y = \delta$), горизонтальные поверхности теплоизолированы, $Pr = 0,7$, ламинарный режим, максимальная температура в центре изменяется в соответствии с уравнением $(t_{max} - t_0) / (t_0 - t_1) = 0,2 + 0,6x / h$	$Nu_{x,y=0} = 0,256 \left(\frac{h}{\delta}\right)^{-0,1} Ra_k^{0,5} \left(0,8 - 0,6 \frac{x}{h}\right) \left(\frac{x}{h}\right)^{-0,1}$	Jones J.P. [28]
2	Локальное значение теплопотока на более нагретой поверхности определяется зависимостью $Ra_k = 1,94 \cdot 10^3 \dots 2,3 \cdot 10^5$, $h / \delta = 1,25 \dots 20$	На менее нагретой поверхности из-за симметрии задачи $Nu_x = Nu_\delta(h-x)$	То же
3	$h / \delta < 1$, $h / \delta \ll 1$, $Ra_k < 10^8$	$\overline{Nu} \frac{\delta}{h} = 1 + \left\{ \left[\frac{(Ra_k h / \delta)^2}{362880} \right]^{0,388} + \left[0,623 Ra_k^{0,2} \frac{\delta}{h} \right]^{2,717} \right\}^{0,25}$	Seki N., Fukushima S., Inaba H. и др. [5]
4	$h / \delta = 0,03 \dots 0,2$, $Pr = 1 \dots 10^3$, $Ra_k = 10^2 \dots 10^5$	$\overline{Nu} = 0,28 Pr^{0,624} (h / \delta)^{0,125} Ra_k^{0,5}$	Seki N., Fukushima S., Inaba H. [8]
5	$h / \delta = 0,03 \dots 0,2$, $Pr = 1 \dots 10^3$, $Ra_k = 10^2 \dots 10^8$	$\overline{Nu} = 0,851 Pr^{0,624} (h / \delta)^{0,62} Ra_k^{0,25}$	То же

№ п/п	Теплофизические характеристики, режимы движения потока	Уравнения	Авторы
6	$h / \delta = 0,2 \dots 1$, $Pr = 1 \dots 10^3$, $Ra_k = 10^3 \dots 10^6$	$\overline{Nu} = 0,223 Pr^{0,624} (h / \delta)^{0,125} Ra_k^{0,25}$	Seki N., Fukushima S., Inaba H. [8]
7	$h / \delta = 1 \dots 100$, $Pr = 0,1 \dots 10$, $Ra_k < 5 \cdot 10^3$	$\overline{Nu} - 1 = Ra_k^2 \cdot 10^{-6} \left[\frac{0,8}{(h/\delta)^2 + 21(h/\delta)^{-3}} + \frac{10}{(h/\delta)^2 + 219(h/\delta)^{-1}} \right]$	Seki N., Bejan A. и др. [21]
8	$h / \delta = 5 \dots 47,5$, $Pr = 3 \dots 4 \cdot 10^4$, $Ra_k = 10^2 \dots 4 \cdot 10^9$	$\overline{Nu} = 0,33 (h / \delta)^{0,66} Pr^{0,27} Ra_k^{0,25}$	"
9	$h / \delta = 5 \dots 47,5$, $Pr = 1 \dots 200$, $Ra_k = 4 \cdot 10^3 \dots 4 \cdot 10^{12}$	$\overline{Nu} = 0,084 Pr^{0,651} Ra_k^{0,3}$	"
10	$h / \delta = 5 \dots 47,5$, $Pr = 1 \dots 4$, $Ra_k > 2 \cdot 10^{12}$	$\overline{Nu} = 0,039 Ra_k^{0,33}$	"
11	Одинаковые тепловые потоки на вертикальных поверхностях, $h / \delta = 2 \dots 19$, $Pr = 0,023$, жидкий металл, $\tilde{t} = 0,7t_0 + 0,3t_1$, $Gr_\tau \delta^3 / h^3 = 10^{-2} \dots 10^3$	$Nu_\delta \delta / h = 0,298 (Gr_\tau \delta^3 / h^3)^{0,141}$	Colwell R.G., Welty J.R. [9]
12	Одинаковые тепловые потоки на вертикальных поверхностях, $h / \delta = 2 \dots 19$ при $Gr_\tau \delta^3 / h^3 = 10^3 \dots 10^9$	$Nu_\delta \delta / h = 0,268 (Gr_\tau \delta^3 / h^3)^{0,165}$	То же
13	Заданы поток теплоты на одной вертикальной поверхности и температура – на другой, $h / \delta = 1,5 \dots 6$, $Pr = 0,018 \dots 306$, $Ra_k^2 = 8,12 \cdot 10^4 \dots 1,01 \cdot 10^{12}$	$\overline{Nu} = 0,0714 Ra_k^{0,282}$	Lillie A.F., Nottage H.B. [10]
14	Заданы поток теплоты на одной вертикальной поверхности и температура – на другой, $h / \delta = 1 \dots 40$, $Pr = 1 \dots 2 \cdot 10^4$, $Ra_k = 10^4 \dots 10^7$	$\overline{Nu} = 0,42 Pr^{0,612} (h / \delta)^{-0,3} Ra_k^{0,25}$	То же

№ п/п	Теплофизические характеристики, режимы движения потока	Уравнения	Авторы												
15	Заданы поток теплоты на одной вертикальной поверхности и температура – на другой, $h / \delta = 1 \dots 40$, $Pr = 1 \dots 20$, $Ra_k = 10^6 \dots 10^7$	$\overline{Nu} = 0,046 Ra_k^{0,33}$	Lillie A.F., Nottage H.B. [10]												
16	Неоднородный нагрев сверху, $\theta_0 = \theta_1 \sin \pi y$, $h / \delta = 1$, $Pr < 10^5$, $Ra_k = 5 \cdot 10^4 \dots 10^9$, $Ra_k < 10^{6,7} Pr^{2,2}$	$\overline{Nu} = 0,26 Ra_k^{0,19}$	Лыков А.В., Берковский Б.М. [21]												
17	$h / \delta = 0,3 \dots 1$, $Pr = 1$, $Ra_k = 5 \cdot 10^4 \dots 10^7$	$\overline{Nu} = 0,2 (h / \delta)^{0,3} Ra_k^{0,16}$	То же												
18	Прямоугольная емкость квадратного сечения, нагрев сбоку, $\theta_0 = 0$, $\theta_1 = \theta_0$, $\theta_0 = \theta_1 = \theta_0 (1-x/h)$, $h / \delta = 1$, $Pr < 10^3$, $Ra_k = 5 \cdot 10^3 \dots 10^9$, $Ra_k < 10^{3,25} Pr^{2,1}$	$\overline{Nu} = 0,2 Ra_k^{0,29}$	Берковский Б.М. [29]												
19	Левая стенка – пластина толщиной Δ . Вертикальные границы $y = -\delta$ и $y = \delta$, полости имеют постоянные температуры t_0 и t_1 . Поперечная теплопроводность и пластине значительно превышает продольную, $Pr = \lambda_0 \delta / \lambda \Delta$, $h / \delta = 1 \dots 6$, $Pr = 0,72$, $Gr_\tau = 5 \cdot 10^3 \dots 5 \cdot 10^6$, параметр сопряжения $\frac{\lambda_0 - \lambda}{\lambda \Delta} = p^7 - \infty$	$\overline{Nu} = c Gr_\tau^m (h / \delta)^{-0,12}$ Значения коэффициентов c и m	Gdalevich I.B. и др. [30]												
		<table border="1"> <thead> <tr> <th>p^7</th> <th>c</th> <th>m</th> </tr> </thead> <tbody> <tr> <td>∞</td> <td>0,225</td> <td>0,250</td> </tr> <tr> <td>14</td> <td>0,276</td> <td>0,196</td> </tr> <tr> <td>7</td> <td>0,334</td> <td>0,174</td> </tr> </tbody> </table>	p^7	c	m	∞	0,225	0,250	14	0,276	0,196	7	0,334	0,174	
p^7	c	m													
∞	0,225	0,250													
14	0,276	0,196													
7	0,334	0,174													
20	Полость с горизонтальными пластинами и теплоизолированными вертикальными стенками, $Pr = 0,7 \dots 11760$, $Ra_k = 1740 \dots 4 \cdot 10^9$	$\overline{Nu} = 1 + 1,44 \left(1 - \frac{1740}{Ra_k}\right)$	Петражицкий Г.Б., Полежаев В.И. [31]												

№ п/п	Теплофизические характеристики, режимы движения потока	Уравнения	Авторы
21	$Pr = 0,7 \dots 11760$, $Ra_k < 1740$	$\overline{Nu} = 1$	Петражицкий Г.Б., Полежаев В.И. [31]
22	$Pr = 0,7 \dots 11760$, $Ra_k = 4 \cdot 10^3 \dots 3 \cdot 10^6$	$\overline{Nu} = 0,24 Ra_k^{0,25}$	То же
23	$Pr = 0,7 \dots 6$, $Ra_k = 3 \cdot 10^6 \dots 10^{10}$	$\overline{Nu} = 0,115 Ra_k^{0,25}$	"
24	$Ra_k < 10^8$	$\overline{Nu} = 1 + 1,44 \left[1 - \frac{1708}{Ra_k} \right]^{0,33} + \left[\frac{Ra_k}{5830} \right]^{0,33} - 1 \right]^{0,33}$	Hollands K.G.T. и др. [32]
25	$Ra_k < 5 \cdot 10^8$, вода	$\overline{Nu} = 1 + 1,44 \left[1 - \frac{1708}{Ra_k} \right]^{0,33} + \left[\frac{Ra_k}{5830} \right]^{0,33} - 1 \right]^{0,33} + 2 \left(\frac{Ra_k^{0,33}}{140} \right)^{1-14(Ra_k^{2,9} / 140)}$	То же
26	Горизонтальные поверхности, наличие равновесных объемных источников теплоты в жидкости, боковые поверхности теплоизолированы, $Pr = 1 \dots 80$, $Gr_\tau = 10^3 \dots 10^8$, $\tilde{t} = 1 / F \cdot \int_0^F t dF$, верхняя стенка	$\overline{Nu} = 0,78 Ra_k^{0,2}$	Jahn M., Reinecke H.H. [33]
27	Горизонтальные поверхности, наличие равновесных объемных источников теплоты в жидкости, боковые поверхности теплоизолированы, $Pr = 1 \dots 80$, $Gr_\tau = 10^3 \dots 10^8$, $\tilde{t} = 1 / F \cdot \int_0^F t dF$, нижняя стенка	$\overline{Nu} = 2,14 Ra_k^{0,1}$	То же

№ п/п	Теплофизические характеристики, режимы движения потока	Уравнения	Авторы
28	Нижняя пластина теплоизолирована, теплообмен происходит через верхнюю пластину, $Pr > 0,7$, $Ra_k = 10^5 \dots 10^{11}$, погрешность 7 %	Число Остроградского $Os_k = 0,268 Ra_k^{0,237}$	Cheung F.B. [3, 44]
29	Поток теплоты отводится как от нижней Q_1 , так и от верхней Q_2 пластины, $Pr > 0,7$, $Ra_k = (4 \cdot 10^{18}) \dots 10^9$, $Ra_k = 6 \cdot 10^3 \dots 6 \cdot 10^{11}$	$\frac{Q_1}{Q_2} = -1,38 \frac{Ra_k}{Ra_k} \left(\frac{Ra_k}{Ra_k} \right)^{0,719} + 19,16 Ra_k^{-0,635}$	Boon-Long P., Shramm R. и др. [34]
30	Квадратное сечение $h / \delta = 1$. Две поверхности имеют температуру t_1 и две – температуру t_2 , $Ra_k < 2,07 \cdot 10^4$, воздух	$\overline{Nu} = 2,917 Ra_k^{0,025}$	Нопшик А.С., Грошев А.И., Шилкин Г.Ф. [22]
31	Квадратное сечение $h / \delta = 1$. Две поверхности имеют температуру t_1 и две – температуру t_2 , $Ra_k = 2,07 \cdot 10^4 \dots 2,6 \cdot 10^4$	$\overline{Nu} = 0,523 Ra_k^{0,2}$	То же



Физические свойства сухого воздуха при $B = 760$ мм рт.ст.

$t, ^\circ\text{C}$	$\rho, \text{кг/м}^3$	$c_p, \text{кДж/(кг}\cdot\text{K)}$	$\lambda \cdot 10^2, \text{Вт/(м}\cdot\text{K)}$	$a \cdot 10^6, \text{м}^2/\text{с}$	$\mu \cdot 10^6, \text{Н}\cdot\text{с/м}^2$	$\nu \cdot 10^6, \text{м}^2/\text{с}$	Pr
-50	1,584	1,013	2,04	12,7	14,6	9,23	0,728
-40	1,515	1,013	2,12	13,8	15,2	10,04	0,728
-30	1,453	1,013	2,20	14,9	15,7	10,80	0,723
-20	1,395	1,009	2,28	16,2	16,2	12,79	0,716
-10	1,342	1,009	2,36	17,4	16,7	12,43	0,712
0	1,293	1,005	2,44	18,8	17,2	13,28	0,707
10	1,247	1,005	2,51	20,0	17,6	14,16	0,705
20	1,205	1,005	2,59	21,4	18,1	15,06	0,703
30	1,165	1,005	2,67	22,9	18,6	16,00	0,701
40	1,128	1,005	2,76	24,3	19,1	16,96	0,699
50	1,093	1,005	2,83	25,7	19,6	17,95	0,698
60	1,060	1,005	2,90	27,2	20,1	18,97	0,696
70	1,029	1,009	2,96	28,6	20,6	20,02	0,694
80	1,000	1,009	3,05	30,2	21,1	21,09	0,692
90	0,972	1,009	3,13	31,9	21,5	22,10	0,690
100	0,946	1,009	3,21	33,6	21,9	23,13	0,688
120	0,898	1,009	3,34	36,8	22,8	25,45	0,686
140	0,854	1,013	3,49	40,3	23,7	27,80	0,684
160	0,815	1,017	3,64	43,9	24,5	30,09	0,682
180	0,779	1,022	3,78	47,5	25,3	32,49	0,681
200	0,746	1,026	3,93	51,4	26,0	34,85	0,680
250	0,674	1,038	4,27	61,0	27,4	40,61	0,677
300	0,615	1,047	4,60	71,6	29,7	48,33	0,674
350	0,566	1,059	4,91	81,9	31,4	55,46	0,676
400	0,524	1,068	5,21	93,1	33,0	63,09	0,678
500	0,456	1,093	5,74	115,3	36,2	79,38	0,687
600	0,404	1,114	6,22	138,3	39,1	96,89	0,699
700	0,362	1,135	6,71	163,4	41,8	115,4	0,706
800	0,329	1,155	7,18	188,8	44,3	134,8	0,713
900	0,301	1,172	7,63	216,2	46,7	155,1	0,717
1000	0,277	1,185	8,07	245,9	49,0	177,1	0,719
1100	0,257	1,197	8,50	276,2	51,2	199,3	0,722
1200	0,239	1,210	9,15	316,5	53,5	233,7	0,724

Физические свойства воды на линии насыщения

t °C	p бар	ρ кг/м ³	h $\frac{\text{кДж}}{\text{кг}}$	c_p $\frac{\text{кДж}}{\text{кг}\cdot\text{К}}$	λ , $\frac{\text{Вт}}{\text{м}\cdot\text{К}}$	$a\cdot 10^8$ м ² /с	$\mu\cdot 10^6$ Па·с	$\nu\cdot 10^6$ м ² /с	$\beta\cdot 10^4$ К ⁻¹	$\sigma\cdot 10^4$ Н/м	Pr
10	0,0123	999,7	41,99	4,193	0,586	14,0	1299,2	1,300	0,70	744	9,3
20	0,0234	998,3	83,86	4,182	0,602	14,4	1001,5	1,003	1,82	729	6,96
30	0,0424	995,8	125,66	4,179	0,617	14,8	797,0	0,800	3,21	712	5,40
40	0,0737	992,3	167,45	4,179	0,630	15,2	651,3	0,656	3,87	695	4,32
50	0,123	988,0	209,26	4,181	0,643	15,6	544,0	0,551	4,49	678	3,54
60	0,199	983,2	251,09	4,185	0,653	15,9	463,0	0,471	5,11	661	2,97
70	0,312	977,7	292,97	4,190	0,662	16,2	400,5	0,410	5,70	644	2,54
80	0,474	971,6	334,92	4,197	0,669	16,4	351,0	0,361	6,32	627	2,20
90	0,701	965,2	376,94	4,205	0,675	16,6	311,3	0,322	6,95	609	1,94
100	1,013	958,1	419,06	4,216	0,680	16,8	279,0	0,291	7,52	590	1,73
110	1,433	950,7	461,3	4,229	0,683	17,0	252,2	0,265	8,08	570	1,56
120	1,985	942,7	503,7	4,245	0,685	17,1	230,0	0,244	8,64	550	1,43
130	2,701	934,6	546,3	4,263	0,687	17,2	211,0	0,226	9,19	529	1,31
140	3,614	925,8	589,1	4,285	0,687	17,3	195,0	0,211	9,72	508	1,22
150	4,760	916,8	632,2	4,310	0,686	17,4	181,0	0,197	10,3	487	1,14
160	6,180	907,3	675,5	4,339	0,684	17,4	169,0	0,186	10,7	466	1,07
170	7,920	897,3	719,1	4,371	0,681	17,4	158,5	0,177	11,3	444	1,02
180	10,03	886,9	763,1	4,408	0,676	17,3	149,3	0,168	11,9	422	0,97
190	12,55	876,0	807,5	4,449	0,671	17,2	141,2	0,161	12,6	400	0,94
200	15,55	864,7	852,4	4,497	0,664	17,1	133,8	0,155	13,3	378	0,91