

ТЕПЛОМЕН ПРИ СВОБОДНОЙ КОНВЕКЦИИ

Свободное движение возникает при изменении в жидкости массовых сил. Такими силами могут быть сила тяжести, центробежная сила и сила, возникающая при наведении в жидкости электромагнитного поля. Наиболее распространено и хорошо изучено свободное движение жидкости, вызванное гравитационными силами.

Свободной гравитационной конвекцией называется движение жидкости, возникающее в поле сил тяжести при наличии градиента температуры.

Плотность как жидкости, так и газа зависит от температуры. Поэтому при наличии в жидкости или газе градиента температуры массовые силы в различных точках \vec{g}_0 различны. Это вызывает движение жидкости, определяемое направлением поля массовых сил, распределением температур в жидкости и геометрической формой объема. При свободной конвекции поля скоростей и температур существенно взаимосвязаны. Поэтому для описания свободной конвекции необходимо совместное рассмотрение уравнений неразрывности, движения и энергии.

Свободная гравитационная конвекция широко распространена в природе и технике. Она определяет циркуляцию воздуха в атмосфере Земли, воды в озерах, морях и океанах, теплообмен в жилых и производственных помещениях, в кабинах и отсеках летательных аппаратов, в топливных баках ракет и самолетов, тепловых процессах в различных технологических устройствах и энергетических установках, в системах охлаждения радиоэлектронного оборудования.

Различают ламинарную и турбулентную свободные конвекции. При ламинарном движении частицы жидкости перемещаются, не перемешиваясь по своим траекториям, и в каждой точке среды скорость определена. При турбулентном движении частицы жидкости перемещаются хаотически, неупорядоченно, направление и величина скорости отдельных частиц непрерывно меняются. Скорость жидкости в каждой точке среды пульсирует. Поэтому при турбулентном течении обычно рассматривают среднестатистические значения скоростей и температур, используя осредненные уравнения движения и энергии.

Опытные данные свидетельствуют о том, что при свободной конвекции основная область тепловых и гидродинамических

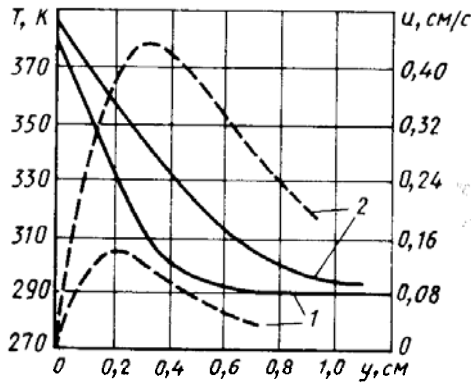


Рис. Распределение скорости и температуры в ламинарном пограничном слое на расстояниях 1 см (1) и 24 см (2) от начала обогрева вертикальной пластины при свободной конвекции в большом объеме воздуха:

— температура; ———— скорость

возмущений сосредоточена в относительно тонком пограничном слое жидкости около поверхности теплообмена. Например, в нижней части нагретой вертикальной плиты образуется ламинарный пограничный слой. С ростом высоты плиты теплоотдача уменьшается из-за возрастания толщины пограничного слоя

На определенной высоте ламинарное течение нарушается и переходит в турбулентное.

Для описания свободно-конвективного движения и теплообмена используются законы сохранения количества движения, массы и энергии в жидкости, движущейся под действием массовых, поверхностных и инерционных сил.

$$\frac{\partial(\rho V_i)}{\partial t} + \frac{\partial(\rho V_j V_i)}{\partial x_j} = -\frac{\partial p}{\partial x_i} + \rho F_i + \frac{\partial}{\partial x_j} \left[\mu \left(\frac{\partial V_i}{\partial x_j} + \frac{\partial V_j}{\partial x_i} \right) - \frac{2}{3} \mu \cdot \delta_{ij} \operatorname{div} \vec{V} \right] \quad (1)$$

$$\rho F_i = (\rho - \rho_0) g_i \quad (2)$$

$$\rho - \rho_0 = -\rho_0 \beta (T - T_0) = -\rho_0 \beta \Delta T, \quad \text{где } \beta = -\frac{1}{\rho} \frac{\partial \rho}{\partial T} \Big|_{p=\text{const}} \quad (3)$$

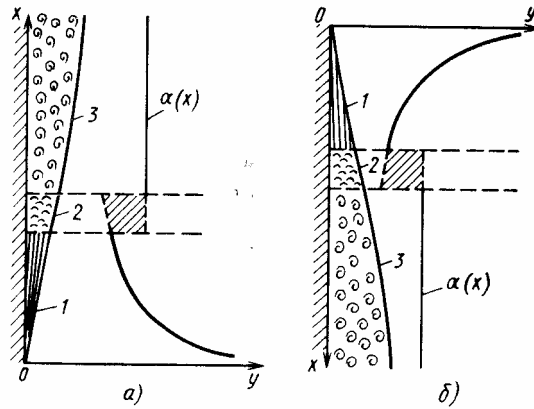
$$\frac{\partial(\rho V_i)}{\partial t} + \frac{\partial(\rho V_j V_i)}{\partial x_j} = -\frac{\partial p}{\partial x_i} - \rho_0 \beta \Delta T g_i + \frac{\partial}{\partial x_j} \left[\mu \left(\frac{\partial V_i}{\partial x_j} + \frac{\partial V_j}{\partial x_i} \right) - \frac{2}{3} \mu \cdot \delta_{ij} \operatorname{div} \vec{V} \right] \quad (4)$$

$$\frac{\operatorname{Re}}{\operatorname{Ho}} \frac{\partial(\overline{\rho V_i})}{\partial t} + \operatorname{Re} \frac{\partial(\overline{\rho V_j V_i})}{\partial x_j} = -\operatorname{Re} \cdot \operatorname{Eu} \frac{\partial \bar{p}}{\partial x_i} - \frac{\operatorname{Gr}}{\operatorname{Re}} g_i + \frac{\partial}{\partial x_j} \left[\mu \left(\frac{\partial \overline{V_i}}{\partial x_j} + \frac{\partial \overline{V_j}}{\partial x_i} - \frac{2}{3} \delta_{ij} \operatorname{div} \overline{\vec{V}} \right) \right] \quad (5)$$

$$\operatorname{Nu}_f = f(\operatorname{Gr}_f, \operatorname{Pr}_f, T_w/T_f, x) \quad (6)$$

$$\operatorname{Nu}_m = f(\operatorname{Gr}_m, \operatorname{Pr}_m, x) \quad (7)$$

$$\operatorname{Gr} = \frac{\rho_0^2 L^3 \beta \Delta T g}{\mu_0^2} = \frac{L^3 \beta \Delta T g}{\nu_0^2} \quad \text{-критерий Грасгофа} \quad (8)$$



$$\frac{\partial u}{\partial x} + \frac{\partial v}{\partial y} = 0; \quad (9)$$

$$u \frac{\partial T}{\partial x} + v \frac{\partial T}{\partial y} = a \frac{\partial^2 T}{\partial y^2}; \quad (10)$$

$$u \frac{\partial u}{\partial x} + v \frac{\partial u}{\partial y} = g\beta\Delta T + \nu \frac{\partial^2 u}{\partial y^2} \quad (11)$$

Вертикальная стенка.

$$Gr_x Pr = 10^{-3} \dots 5 \cdot 10^2 \quad Nu_{xm} = 1,18 (Gr_x Pr)_m^{0,25} \quad (12)$$

$$Gr_x Pr = 5 \cdot 10^2 \dots 10^9, \quad Pr = 0,7 \dots 10 \quad Nu_{xm} = 0,6 (Gr_x Pr)_m^{0,25} \quad (13)$$

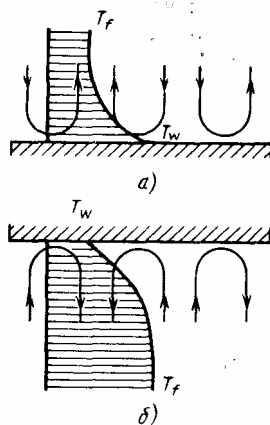
$$Gr_x Pr = 10^9 \dots 10^{12} \quad Nu_{xm} = 0,15 (Gr_x Pr)_m^{1/3} \quad (14)$$

$$\bar{\alpha} = \frac{\frac{1}{l} \int_0^l q(x) dx}{\frac{1}{l} \int_0^l \Delta T(x) dx} = \frac{\int_0^l \alpha \Delta T dx}{\int_0^l \Delta T dx} \quad (15)$$

$$Gr_x Pr = 5 \cdot 10^2 \dots 10^9, \quad Pr = 0,7 \dots 10 \quad \bar{Nu}_{lm} = 0,75 (Gr_l Pr)_m^{0,25} \quad (16)$$

$$Gr_x Pr = 10^9 \dots 10^{12} \quad \bar{Nu}_{lm} = 0,13 (Gr_l Pr)_m^{1/3} \quad (17)$$

Горизонтальные стенки



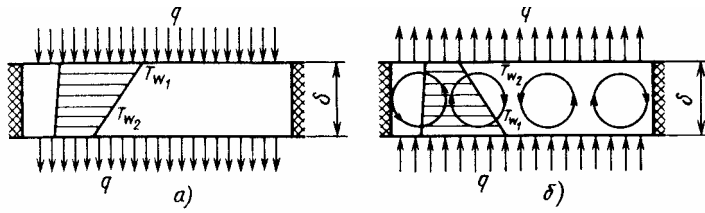
$$10^5 \leq (Gr_l Pr)_m \leq 2 \cdot 10^7 \quad Nu_{lm} = 0,54 (Gr_l Pr)_m^{0,25} \quad (18)$$

Турб.:

$$Nu_{lm} = 0,14 (Gr_l Pr)_m^{1/3}$$

Теплоотдача через горизонтальную прослойку

$$\bar{q}_w = \epsilon_K \frac{\lambda_m}{\delta} (T_{w1} - T_{w2}) = \epsilon_K \lambda_{\text{эфф}} / \lambda_m \quad (19)$$



$$\epsilon_K = C (Gr_\delta Pr)_m^n,$$

где при $(Gr_\delta Pr)_m < 1700$ $C = 1, n = 0$; при $1700 \leq (Gr_\delta Pr)_m \leq 10^6$ $C = 0,105, n = 0,3$; при $10^6 \leq (Gr_\delta Pr)_m \leq 10^{10}$ $C = 0,4, n = 0,2$. (20)