

## Тема 2 (2 час, лекция 1)

### Лекция 5

**Конвективный теплообмен.** Основные положения конвективного теплообмена. Теплоотдача в однофазных жидкостях, при фазовых и химических превращениях, при вынужденной и естественной конвекции. Физические свойства жидкостей и газов, существенные для процессов течения и теплоотдачи. Особенности теплообмена при ламинарном и турбулентном течениях жидкости. Динамический и тепловой пограничный слой. Основные допущения теории плоского пограничного слоя. Система дифференциальных уравнений конвективного теплообмена, условия однозначности.

Понятие конвективного теплообмена охватывает процесс теплообмена при движении жидкости или газа. При этом перенос тепла осуществляется одновременно конвекцией и теплопроводностью. Конвекция тепла всегда сопровождается теплопроводностью, так как при движении жидкости или газа неизбежно соприкосновение отдельных частиц, имеющих различные температуры.

*Конвективный массообмен (convective mass exchange)* – это макроперенос вещества, возникающий в жидкостях и газах при их конвективном макроперемешивании. Таким образом, перенос вещества происходит не только под воздействием градиента концентрации, но и совместно с движущейся жидкостью. Такой процесс обычно называют конвекцией. Сила традиции заставляет нас употреблять термин “конвекция” несколько неточно. Например, мы будем говорить о конвективных членах дифференциальных уравнений, противопоставляя их диффузионным. В этом случае под конвективными будут подразумеваться только те члены уравнений переноса, которые обусловлены макроскопическим движением жидкости или газа.

$$q = q_{\text{конд}} + q_{\text{конв}} = -\lambda \cdot \nabla T + \rho \cdot \vec{w} \cdot h$$

В 1884 г. **О. Рейнольдс** опытным путем установил, что при движении жидкости формируются два основных вида потока, подчиняющихся различным законам.

**Ламинарное движение** – все частицы потока движутся только по параллельным между собой траекториям, и движение их длительно совпадает с направлением всего потока.

**Турбулентное движение** – все частицы, перемещаясь вдоль канала с некоторой скоростью, совершают беспорядочные, хаотичные движения. Происходит непрерывное перемешивание всех слоев жидкости, пульсации и завихрения потока. Чем больше пульсаций и завихрений, тем поток является более турбулентным.

В некоторых случаях отдельно выделяют **переходный** (от ламинарного к турбулентному) **режим** движения

Все реальные жидкости обладают вязкостью: между частицами и слоями, движущимися с различными скоростями, всегда возникает **сила внутреннего трения (касательное усилие)**, ускоряющая движение более медленного слоя и тормозящая движение более быстрого.

*Величина силы внутреннего трения  $F$  между слоями, отнесенная к единице поверхности, согласно закону Ньютона пропорциональна градиенту скорости  $dw/dn$  по нормали к направлению движения потока*

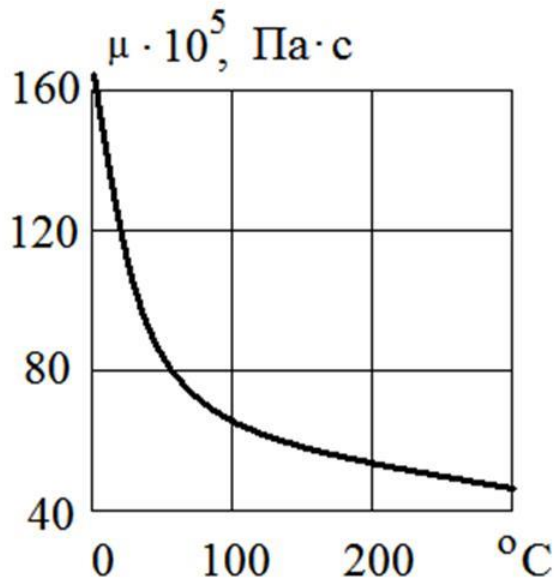
$$F = \mu \frac{dw}{dn};$$

$\mu$  – коэффициент пропорциональности, зависящий от природы жидкости и ее температуры и называемый коэффициентом динамической вязкости или коэффициентом внутреннего трения, н·сек/м<sup>2</sup>.

Часто используют коэффициент кинематической вязкости:

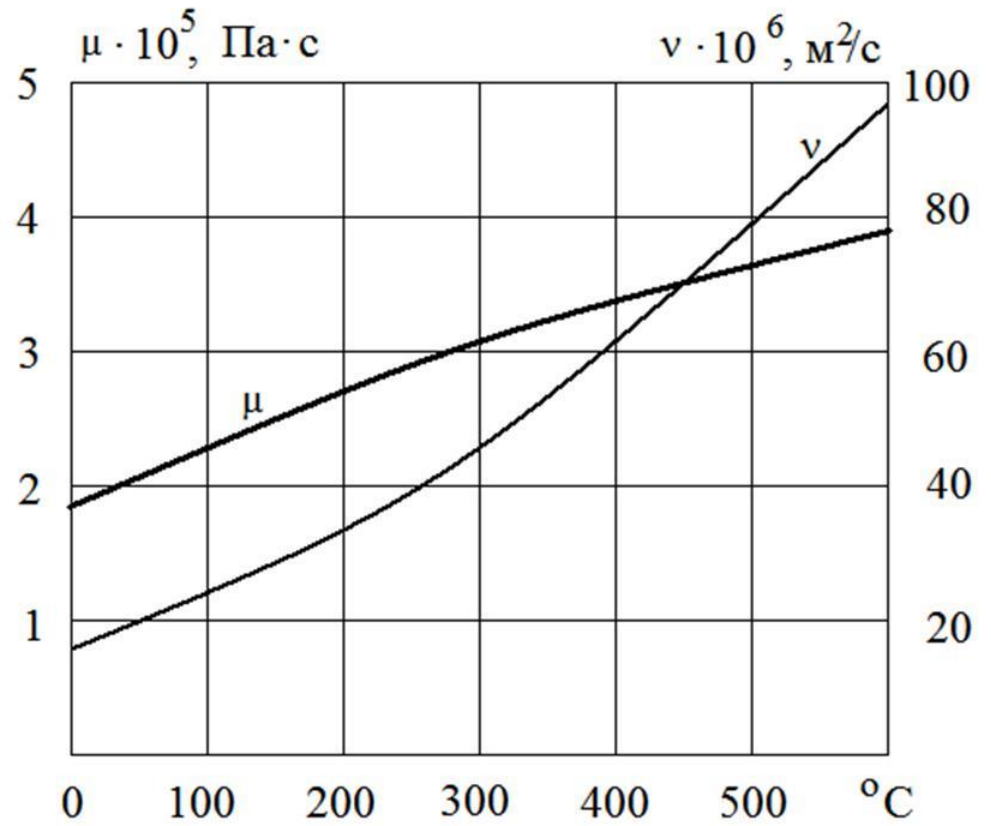
$$\nu = \frac{\mu}{\rho}; \frac{\text{м}^2}{\text{с}}$$

**Вязкость капельных жидкостей** с увеличением температуры уменьшается и почти не зависит от давления.



У **газов** с увеличением температуры и давления **вязкость** увеличивается.

Коэффициент вязкости **идеальных газов** не зависит от давления.



На теплоотдачу оказывает влияние сжимаемость жидкости. Изотермической сжимаемостью или коэффициентом сжатия тела при постоянной температуре называют положительную величину

$$\varepsilon_t = -\frac{1}{v} \left( \frac{\partial v}{\partial p} \right)_{t=const} = \frac{1}{\rho} \left( \frac{\partial \rho}{\partial p} \right)_{t=const}$$

У воды -  $\approx 1/20\,000$ , 1/бар

У газов -  $\approx 1$ , 1/бар

Условной границей считается, что если число Маха  $M < 0,25$ , то жидкость несжимаемая

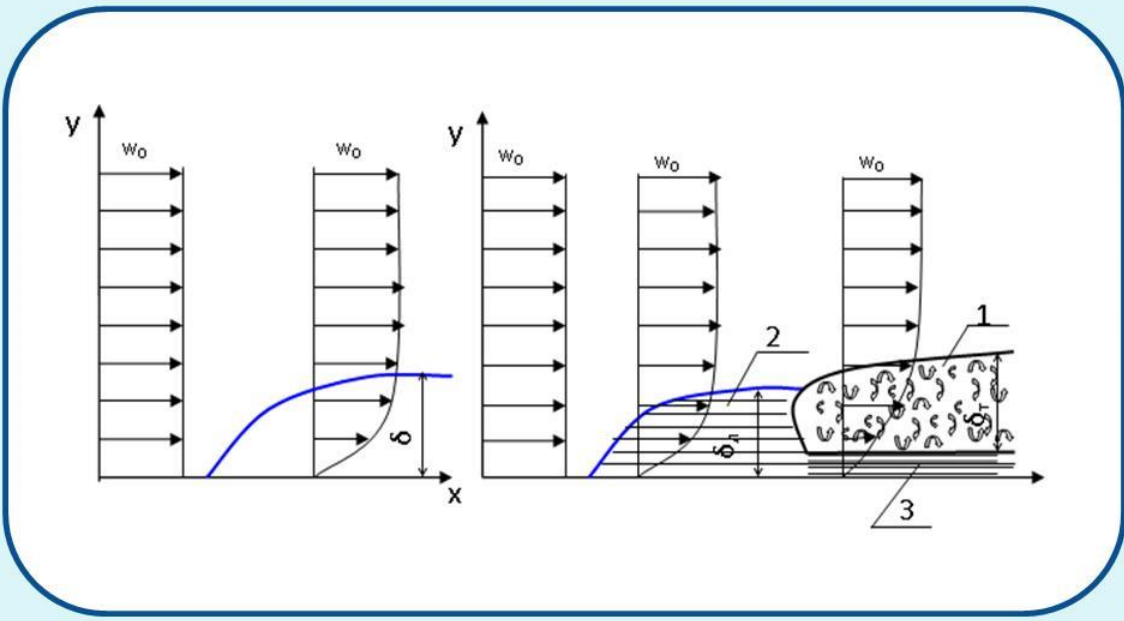
На конвективный теплообмен также оказывает влияние тепловое расширение жидкости, которое характеризуется температурным коэффициентом объемного расширения, определяемым уравнением:

$$\beta = \frac{1}{v} \left( \frac{\partial v}{\partial t} \right)_{p=const} = -\frac{1}{\rho} \left( \frac{\partial \rho}{\partial t} \right)_{t=const}$$

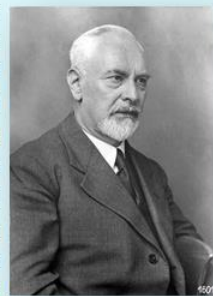
Для газов:  $\beta = \frac{1}{T}$

# Гидродинамический и тепловой пограничные слои

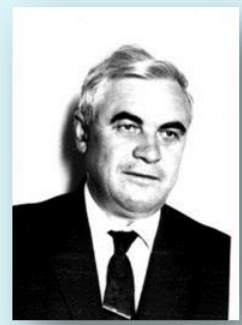
Введено Л. Прандтлем в 1904 г.



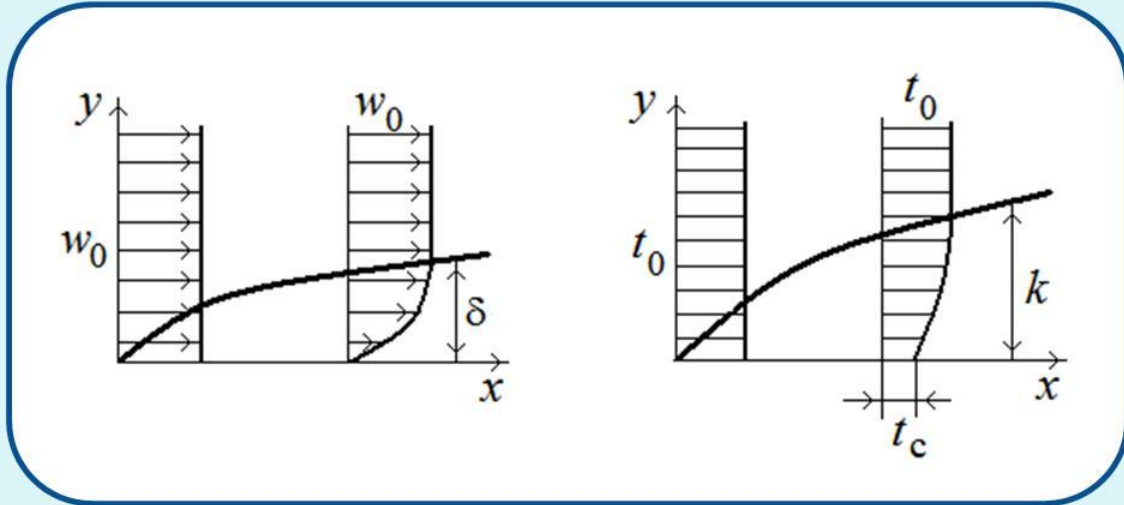
Людвиг Прандтль (нем. Ludwig Prandtl, 1875—1953) — нем. механик и физик. Внёс существенный вклад в основы гидродинамики, разработал теорию пограничного слоя. В честь его был назван один из критериев подобия (число Прандтля Pr), гидроаэрометрическое устройство, ставшее классическим приёмником воздушного давления для многих самолётов и вертолётов (трубка Прандтля).



Аналогично понятию Гидродинамического пограничного слоя Г. Н. Кружилиным введено понятие Теплового пограничного слоя



$$q = q_{\text{конд}} + q_{\text{конв}} = -\lambda \cdot \nabla T + \rho \cdot \vec{w} \cdot h$$



Кружилин Георгий Никитич [1911,], советский ученый в области теплотехники и атомной энергетики, член-корреспондент АН СССР (1953). Член КПСС с 1944. Окончил Ленинградский физико-механический институт (1934). Центральный котлотурбинный институт (1933—1946), институт атомной энергии (1946—1955). С 1955 заведующий лабораторией Энергетического института им. Г. М. Кржижановского. Участвовал в разработке и создании экспериментальных энергетических атомных установок. Награжден орденом Ленина, 2 др. др. орденами, а также медалями.

$$dQ = -\lambda \cdot dF \cdot \left( \frac{\partial t}{\partial n} \right)_{n=0}$$

$$-\lambda \left( \frac{\partial t}{\partial n} \right)_{n=0} = \alpha \cdot \Delta t$$

$$\alpha = - \left( \frac{\lambda}{\Delta t} \right) \cdot \left( \frac{\partial t}{\partial n} \right)_{n=0}$$

В общем случае коэффициент теплоотдачи  $\alpha$  является функцией теплофизических параметров жидкости ( $\lambda, c, \rho, \alpha, \mu$ ), характера течения жидкости ( $X$  – свободное или вынужденное), скорости движения жидкости ( $w$ ), температурного напора ( $\Delta t$ ), формы и размеров тела ( $\Phi, l_1, l_2, l_3$ ) и др.

$$\alpha = f(\lambda, c, \rho, \alpha, \mu, X, \mathbf{w}, t_c, t_{ж}, \Delta t, \Phi, l_1, l_2, l_3 \text{ и др.})$$

## Уравнение энергии

$$\rho \cdot c \cdot \left( \frac{\partial T}{\partial \tau} + \vec{w} \cdot \nabla T \right) = \operatorname{div} [\lambda \cdot \operatorname{grad}(T)] + q_v + \mu \cdot \Phi - p \cdot \operatorname{div}(\vec{w})$$

$$q_v = 0$$

$$\frac{dt(x, y, z, \tau)}{d\tau} = \frac{\partial t}{\partial \tau} + w_x \cdot \frac{\partial t}{\partial x} + w_y \cdot \frac{\partial t}{\partial y} + w_z \cdot \frac{\partial t}{\partial z} = \frac{Dt(x, y, z, \tau)}{D\tau}$$

$$\frac{\partial t}{\partial \tau} + w_x \cdot \frac{\partial t}{\partial x} + w_y \cdot \frac{\partial t}{\partial y} + w_z \cdot \frac{\partial t}{\partial z} = \frac{\lambda}{c_p \cdot \rho} \cdot \left( \frac{\partial^2 t}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 t}{\partial y^2} + \frac{\partial^2 t}{\partial z^2} \right)$$

$$w_x \cdot \frac{\partial t}{\partial x} + w_y \cdot \frac{\partial t}{\partial y} + w_z \cdot \frac{\partial t}{\partial z} = \frac{\lambda}{c_p \cdot \rho} \cdot \left( \frac{\partial^2 t}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 t}{\partial y^2} + \frac{\partial^2 t}{\partial z^2} \right)$$



## Уравнения движения. (Навье – Стокса)

$$\rho \left( \frac{\partial w_x}{\partial \tau} + \frac{\partial w_x}{\partial x} \cdot w_x + \frac{\partial w_x}{\partial y} \cdot w_y + \frac{\partial w_x}{\partial z} \cdot w_z \right) = \rho \cdot g_x - \frac{\partial P}{\partial x} + \mu \left( \frac{\partial^2 w_x}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 w_x}{\partial y^2} + \frac{\partial^2 w_x}{\partial z^2} \right);$$

$$\rho \left( \frac{\partial w_y}{\partial \tau} + \frac{\partial w_y}{\partial x} \cdot w_x + \frac{\partial w_y}{\partial y} \cdot w_y + \frac{\partial w_y}{\partial z} \cdot w_z \right) = \rho \cdot g_y - \frac{\partial P}{\partial y} + \mu \left( \frac{\partial^2 w_y}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 w_y}{\partial y^2} + \frac{\partial^2 w_y}{\partial z^2} \right);$$

$$\rho \left( \frac{\partial w_z}{\partial \tau} + \frac{\partial w_z}{\partial x} \cdot w_x + \frac{\partial w_z}{\partial y} \cdot w_y + \frac{\partial w_z}{\partial z} \cdot w_z \right) = \rho \cdot g_z - \frac{\partial P}{\partial z} + \mu \left( \frac{\partial^2 w_z}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 w_z}{\partial y^2} + \frac{\partial^2 w_z}{\partial z^2} \right);$$

## Уравнение сплошности – уравнение непрерывности потока

$$\frac{\partial \rho}{\partial \tau} + \frac{\partial(\rho \cdot w_x)}{\partial x} + \frac{\partial(\rho \cdot w_y)}{\partial y} + \frac{\partial(\rho \cdot w_z)}{\partial z} = 0$$

Для несжимаемых жидкостей при  $\rho = const$ :

$$\frac{\partial(w_x)}{\partial x} + \frac{\partial(w_y)}{\partial y} + \frac{\partial(w_z)}{\partial z} = 0$$

Уравнение состояния

$$\rho = const$$

$$pV = \frac{m}{\mu} R_{\mu} T$$

$$b_k = f_k(a_1, a_2, \dots, a_n, T)$$

## Условия однозначности

- геометрию расчетной области, ее размеры и время процесса;
- физические свойства текучей среды;
- закон изменения внутренних источников теплоты;

- начальные 
$$T(x_i, \tau = 0) = T_0(x_i)$$
$$\vec{w}(x_i, \tau = 0) = \vec{w}_0(x_i)$$
$$p(x_i, \tau = 0) = p_0(x_i)$$

- и граничные условия. 
$$\vec{w}(x_{ci}, \tau) = \vec{w}_c(x_i, \tau)$$

$$\left. \frac{\partial p}{\partial n} \right|_c = 0$$

**Вдали от стенки – часто параметры  
невозмущенного потока**

$$\left. \begin{aligned} t(x_{ci}, \tau) &= t_c(x_{ci}, \tau) \\ -\lambda_w \frac{\partial \Gamma_w}{\partial n} \Big|_{cw} &= -\lambda_f \frac{\partial \Gamma_f}{\partial n} \Big|_{cf} \end{aligned} \right\} - \text{IV}$$