

***ТЕПЛОМАССОПЕРЕНОС***

***В***

***ЯДЕРНО-***

***ЭНЕРГЕТИЧЕСКИХ***

***УСТАНОВКАХ***

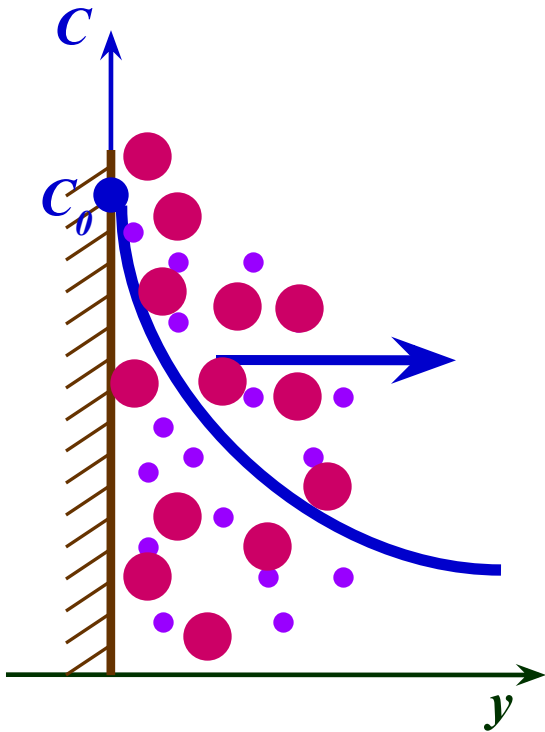
***ТЕПЛОМАССОПЕРЕНОС  
В ЯДЕРНО-ЭНЕРГЕТИЧЕСКИХ  
УСТАНОВКАХ***

***Тема № 5***

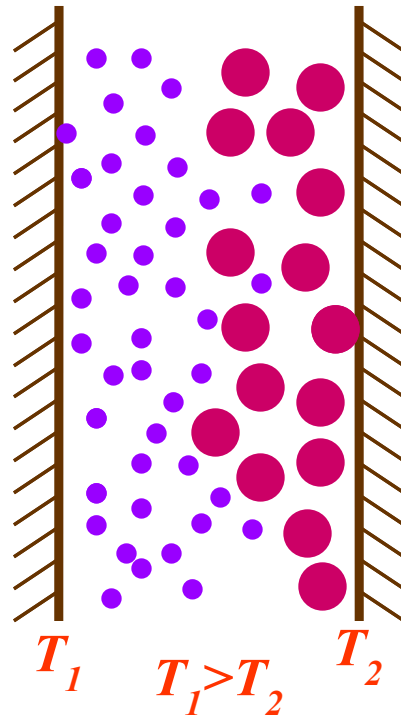
**ДИФФУЗИОННЫЙ  
МАССООБМЕН**

# Различные виды диффузии

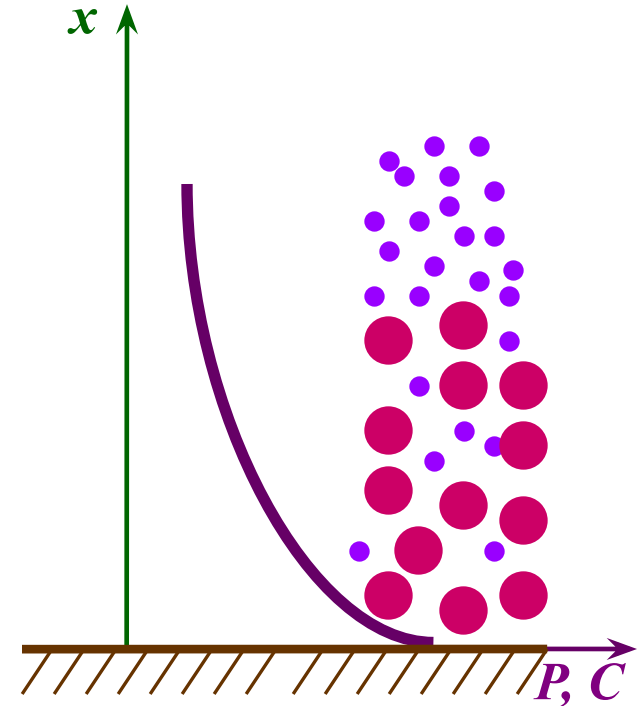
03



концентрационная  
диффузия



термо-  
диффузия



баро-  
диффузия

● – лёгкая молекула

● – тяжёлая молекула

Диффузия, происходящая под действием градиента концентрации, называется **концентрационной диффузией**. 04

Если в среде имеется разница температур, то более легкие молекулы, обладающие большей подвижностью стремятся перейти в теплые области, а тяжелые молекулы – в холодные – эффект Соре. Этот вид диффузии называется **термодиффузией**.

При постоянном градиенте температуры устанавливается стационарный градиент концентрации вещества. Одновременно с термодиффузией, вызывающей частичное разделение смеси, возникает противоположно направленная градиентная диффузия, стремящаяся выровнять концентрации.

Если в неподвижной среде имеет место градиент давления, то тяжелые молекулы переходят в область высокого давления, а легкие, в область пониженного давления. Этот вид диффузии называется **бародиффузией**.

Если ограничиться рассмотрением концентрационной диффузии, то легко видеть, что массоперенос происходит аналогично переносу тепла теплопроводностью или количества движения (импульса). 05

В неподвижной среде при постоянных температуре и давлении **плотность потока массы  $j$ , кг/(м<sup>2</sup>·с)**, какой-либо примеси (компонента) за счет молекулярной диффузии определяется законом Фика:

$$j = -D \frac{dc}{dy} = -\rho D \frac{dC}{dy}$$

где  **$c$**  – концентрация рассматриваемого вещества, **кг/м<sup>3</sup>**;  **$\rho$**  – плотность среды, **кг/м<sup>3</sup>**;  **$C=c/\rho$**  – относительная концентрация;  **$D$**  – коэффициент молекулярной диффузии данного компонента в рассматриваемой среде, **м<sup>2</sup>/с**.

Все коэффициенты  $a$ ,  $\nu$ ,  $D$  имеют одну и ту же размерность –  $\mathbf{m}^2/\mathbf{c}$ .

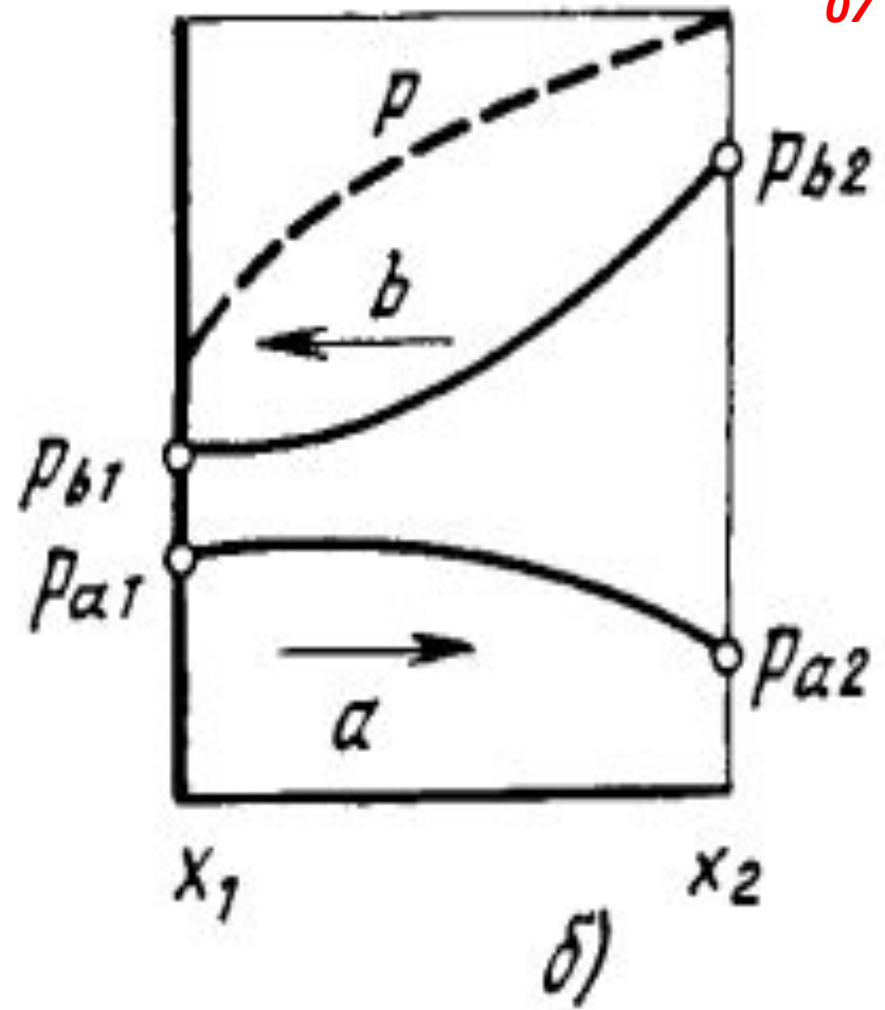
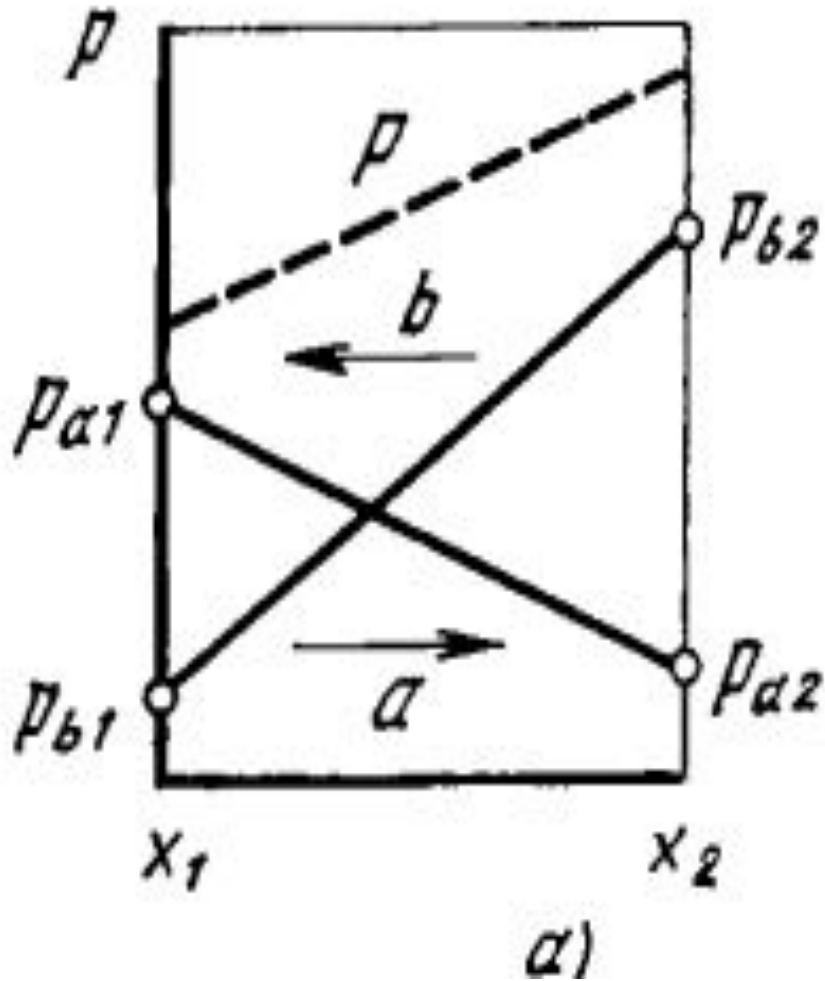
06

$$\begin{aligned} q^\alpha &\equiv -\lambda T_{,\alpha} \equiv -\lambda \nabla T \Big|_{\substack{\rho = \text{const} \\ c_p = \text{const}}} = -\frac{\lambda}{\rho c_p} \nabla (\rho c_p T) = \\ &= -a \nabla (\rho c_p T) = -a \nabla (q_v) \quad . \quad [q_v] = \frac{\text{Дж}}{\text{М}^3} \end{aligned}$$

$$j^\alpha \equiv -D c_{,\alpha} \equiv -D \nabla c \quad .$$

$$\begin{aligned} \tau^{\alpha\beta} &\equiv \mu \left[ \left( v^\alpha_{,\beta} + v^\beta_{,\alpha} \right) - \frac{2}{3} \delta^{\alpha\beta} v^\gamma_{,\gamma} \right] = \\ &= \nu \rho \left[ \left( v^\alpha_{,\beta} + v^\beta_{,\alpha} \right) - \frac{2}{3} \delta^{\alpha\beta} v^\gamma_{,\gamma} \right] \Big|_{\rho = \text{const}} = \\ &= \nu \left[ \left( \rho v^\alpha_{,\beta} + \rho v^\beta_{,\alpha} \right) - \frac{2}{3} \delta^{\alpha\beta} \rho v^\gamma_{,\gamma} \right] \quad . \end{aligned}$$

Совокупность этих трёх выражений носит название **тройной аналогии**.



Градиенты парциального давления в случае диффузии двух газов.

Эквимоллярная диффузия:

- а – постоянный градиент концентрации;
- б – переменный градиент концентрации.

## Критериальное число ШМИДТА (диффузионное число Прандтля)

Число Шмидта – отношение коэффициента кинематической вязкости к коэффициенту диффузии.

*Является мерой подобия полей концентрации и скорости.*

$$Sc \equiv \frac{\nu}{D} ,$$

$\nu$  – коэффициент кинематической вязкости,  $m^2/c$ ;

$D$  – коэффициент диффузии,  $m^2/c$ .



# Критериальное число Пекле

09

Критерий теплового подобия.

Является мерой отношения интенсивности конвективного и кондуктивного (т.е. молекулярного, обусловленного теплопроводностью) теплопереноса.

$$Pe \equiv \frac{w L}{a},$$

$w$  – скорость (аксиальная) теплоносителя,  $m/c$ ;

$L$  – характерный размер,  $m$ ;

$a$  – коэффициент температуропроводности,  $m^2/c$ .

$$Pe \equiv \frac{wL}{a} = \left| a \equiv \frac{\lambda}{\rho c_p} \right| = \frac{w \rho c_p L}{\lambda} = \frac{\rho c_p w}{\lambda/L} =$$

изменение теплосодержания потока теплоносителя  
в аксиальном направлении  
при изменении температуры на 1 К  
= обусловленный теплопроводностью тепловой поток  
при  $\Delta T = 1 K$

## Критериальное число ПЕКЛЕ (диффузионное)

$$Pe_D \equiv Re \cdot Sc = \frac{wL}{\nu} \cdot \frac{\nu}{D} = \frac{wL}{D} ,$$

*Re* – число Рейнольдса;

*Sc* – число Шмидта;

*w* – скорость (аксиальная) теплоносителя, *м/с*;

*ν* – коэффициент кинематической вязкости, *м<sup>2</sup>/с*;

*L* – характерный размер, *м*;

*D* – коэффициент диффузии, *м<sup>2</sup>/с*.

$$Pe_D \equiv Re \cdot Sc \equiv \frac{wL}{D} .$$

## Критериальное число ШЕРВУДА (диффузионное число Нуссельта)

Число Шервуда – безразмерный коэффициент массообмена.

Является мерой отношения характерного размера  $L$  и толщины диффузионного пограничного слоя  $\delta_c$ .

$$\text{Sh} \equiv \frac{\beta L}{D} \equiv \text{Nu}_D \quad .$$

$$j \equiv \beta (\rho_{\text{wall}} - \rho_0) = \beta \rho (C_{\text{wall}} - C_0) \quad .$$

$\beta$  – коэффициент массообмена,  $\text{м/с}$ ;

$L$  – характерный размер,  $\text{м}$ ;

$D$  – коэффициент диффузии,  $\text{м}^2/\text{с}$ .

Основываясь на аналогии процессов тепло- и массообмена можно полагать, что поскольку существует зависимость:  $Nu=Nu(Re,Pr)$ , будет существовать зависимость  $Nu_D=Nu_D(Re,Sc)$ .

Из тождественности форм дифференциальных уравнений следует, что функциональная зависимость в выражениях для  $Nu$  и  $Nu_D$  должна быть одинакова, во всяком случае в той мере, в которой справедливы дифференциальные уравнения и подобны граничные условия.

Это включает требования и геометрического подобия.

Так же, как и в случае теплообмена, при массообмене возникает задача учёта переменности свойств.

Изменения вязкости и плотности могут привести к искажению полей скорости, и уравнение движения не будет независимым от распределения температуры и концентрации.

Согласно гидродинамической аналогии теплообмена Рейнольдса имеем:  $Nu = (\xi/8)Pe$ , где  $\xi$  – коэффициент сопротивления трения. 13

Для массообмена подобное соотношение имеет вид:  $Nu_D = (\xi/8)Pe_D$ .

Сопоставив эти два выражения и сопоставив определения диффузионных чисел  $Nu = (\alpha L)/\lambda$ ,  $Pe = (wL)/a$ ,  $Nu_D = (\beta L)/D$ ,  $Pe_D = (wL)/D$  можно получить

$$Nu_D = \frac{\xi}{8} Pe_D \Leftrightarrow \frac{\beta L}{D} = \frac{\xi}{8} \frac{wL}{D} \Leftrightarrow \frac{\xi}{8} = \frac{\beta L}{D} \frac{D}{wL} \Leftrightarrow \frac{\xi}{8} = \frac{\beta}{w} \quad ; \quad (z-1)$$

$$Nu = \frac{\xi}{8} Pe \Leftrightarrow \frac{\alpha L}{\lambda} = \frac{\xi}{8} \frac{wL}{a} \Leftrightarrow \frac{\xi}{8} = \frac{\alpha L}{\lambda} \frac{a}{wL} \Leftrightarrow \frac{\xi}{8} = \frac{\alpha a}{\lambda w} \Leftrightarrow$$

$$\Leftrightarrow \left| \lambda = a \rho c_p \right| \Leftrightarrow \frac{\xi}{8} = \frac{\alpha a}{a \rho c_p w} \Leftrightarrow \frac{\xi}{8} = \frac{\alpha}{\rho c_p w} \quad ; \quad (z-2)$$

$$\{(z-1); (z-2)\} \Rightarrow \frac{\beta}{w} = \frac{\alpha}{\rho c_p w} \Leftrightarrow \beta = \frac{\alpha}{\rho c_p} \quad \cdot \quad \text{Итак,} \quad \beta = \frac{\alpha}{\rho c_p} \quad \cdot$$

Основываясь на аналогии, существующей между явлениями теплообмена и массообмена, оказывается возможным перенести закономерности одного физического явления на другое.

Можно, изучив законы теплообмена, получить законы массообмена и наоборот.

*Для полного подобия процессов при вынужденном течении необходимо геометрическое подобие, подбор граничных условий, равенство чисел Рейнольдса, Прандтля и Шмидта:*

$$Re_{conv} = Re_{diff} ; Pr = Sc .$$

Тогда исследование зависимости

$$Nu_D = f(Re, Sc)$$

приведёт к определению функции  $f$ , которую можно использовать для расчётов теплообмена.

Практическое неудобство заключается в том, что величину  $Sc$  трудно измерить в опытах.

Для того, чтобы в опытах с диффузией получить ряд линий из семейства кривых  $Nu(Re)$  при  $Sc = const$ , необходимо каждый раз подбирать различные пары взаимно диффундирующих веществ.

Основываясь на уравнениях  $Nu = A \cdot Re^m \cdot Pr^n$  и  $Nu_D = A \cdot Re^m \cdot Sc^n$  для одного и того же числа имеем

16

$$\frac{Nu}{Nu_D} = \left( \frac{Pr}{Sc} \right)^n .$$

Если линейные масштабы  $L$  совпадают, то можем определить  $\alpha$ , зная  $\beta$ , и наоборот:

$$\begin{aligned} \frac{Nu}{Nu_D} = \left( \frac{Pr}{Sc} \right)^n &\Leftrightarrow \frac{\frac{\alpha L}{\lambda}}{\frac{\beta L}{D}} = \left( \frac{\frac{v}{a}}{\frac{v}{D}} \right)^n \Leftrightarrow \frac{\alpha L}{\lambda} = \frac{\beta L}{D} \left( \frac{D}{a} \right)^n \Leftrightarrow \\ &\Leftrightarrow \frac{\alpha}{\lambda} = \frac{\beta}{D} \left( \frac{D}{a} \right)^n \Leftrightarrow \alpha = \lambda \frac{\beta}{D} \left( \frac{D}{a} \right)^n \Leftrightarrow \alpha = a \rho c_p \frac{\beta}{D} \left( \frac{D}{a} \right)^n \Leftrightarrow \\ &\Leftrightarrow \alpha = \rho c_p \beta \left( \frac{D}{a} \right)^{n-1} \Leftrightarrow \alpha = \beta \rho c_p \left( \frac{a}{D} \right)^{1-n} . \end{aligned}$$



Первым общим условием применимости метода является поглощение одного из компонентов смеси (или выделение его) на поверхностях, подобно тому, как тепло из протекающей среды отводится от поверхности нагрева.

Например, в опытах с воздухом поглощение аммиака<sup>17</sup> на стенках достигается при помощи фосфорной кислоты, которой пропитывается бумага, образующая рабочие поверхности.

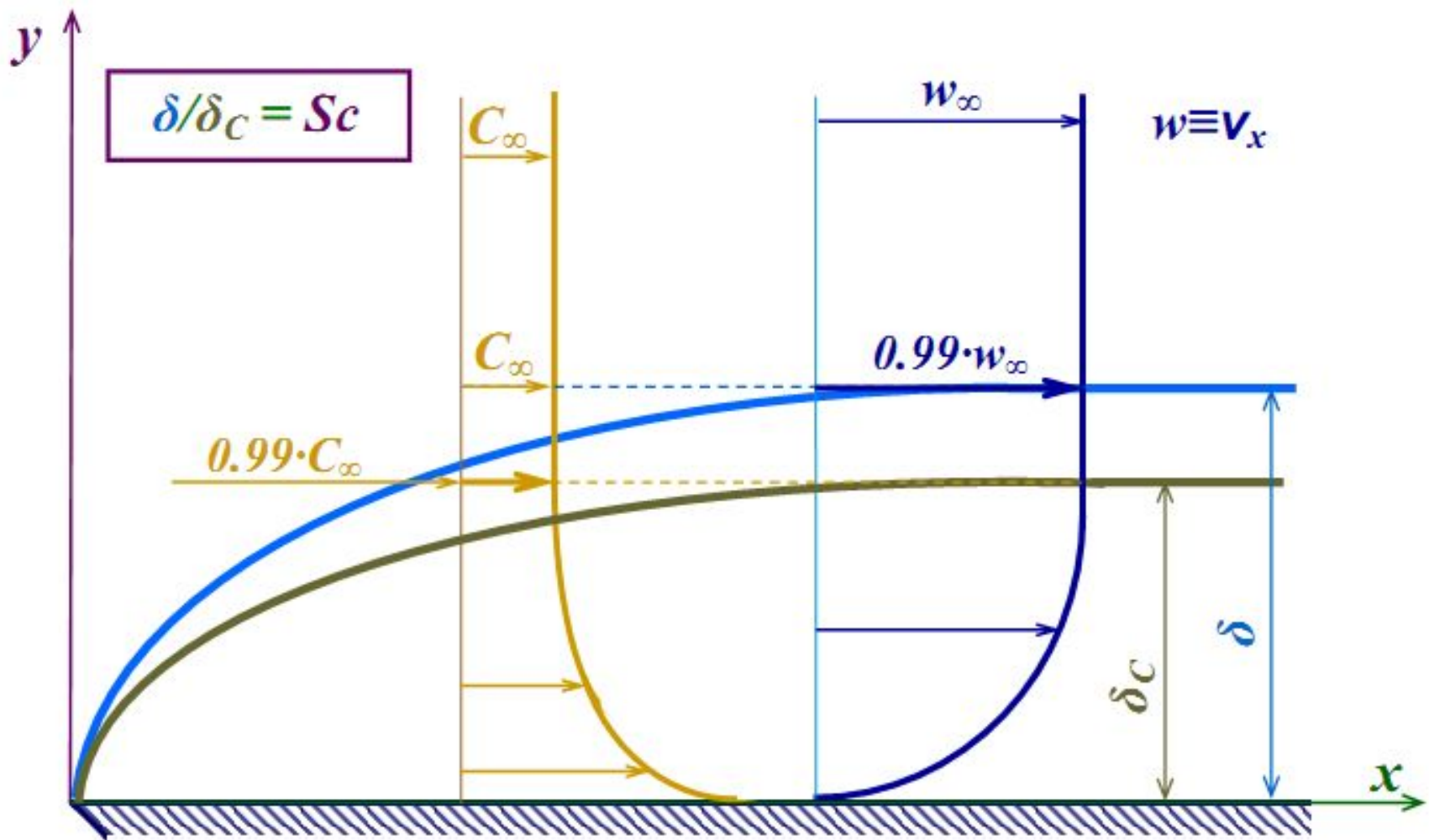
Вторым условием является соблюдение гидродинамического подобия и подобия граничных условий. Малая (практически нулевая) концентрация примеси у стенки (что аналогично постоянной температуре стенки) определяется тем обстоятельством, что скорость химической реакции на поверхности во много раз превосходит скорость диффузии газа через пограничный слой.

Важным достоинством метода является легкость создания любой конфигурации и возможность исследования каждого участка отдельно. Полная изотермичность системы исключает влияние излучения и естественной конвекции. В опытах легко достигается идеальная "адиабатичность" системы – организация массообмена только на нужных частях установки и исключение утечек.

## ***Диффузионный массообмен в пограничном слое***

Согласно теории пограничного слоя, в поперечном сечении потока можно выделить три области, различающиеся распределениями скоростей: ламинарный пристенный слой, промежуточный (буферный) слой и турбулентное ядро.

В ламинарном слое процессы переноса в основном определяются молекулярными механизмами, хотя экспериментальные наблюдения показывают, что существуют выбросы жидкости из пристенного слоя и проникновение вихрей до поверхности. Это учитывается сильной зависимостью турбулентных характеристик от расстояния до стенки. В буферном слое эта зависимость более слабая.



Плоские гидродинамический и диффузионный пограничные слои ( $Sc > 1$ ) и профили скорости и концентрации

В турбулентном потоке перенос осуществляется в результате молекулярных и вихревых процессов. Последние определяют пульсации скорости и концентрации, поэтому поток вещества

$$j = -D \frac{dc}{dy} + \overline{w'c'}$$

Здесь  $c = \rho C$  – средняя концентрация;  $c' = \rho C'$  – пульсация концентрации, которую можно связать с масштабом турбулентности  $L$ :

$$c' = L \frac{dc}{dy}$$

В таком случае

$$\overline{w'c'} = L \overline{w' \frac{dc}{dy}} = D_T \frac{dc}{dy} = \rho D_T \frac{dC}{dy}$$

и

$$j = -\left(D + D_T\right) \frac{dc}{dy} = -\rho \left(D + D_T\right) \frac{dC}{dy},$$

где  $D_T$  – турбулентный коэффициент диффузии (коэффициент турбулентного переноса массы),  $m^2/c$ .

При малых скоростях массообмена поперечная составляющая скорости, обусловленная потоком массы в поперечном направлении, значительно меньше скорости течения за пределами диффузионного пограничного слоя. Поэтому математическая формулировка задачи массообмена в пограничном слое оказывается совершенно идентичной формулировке тепловой задачи, и расчеты массопереноса могут проводиться по соотношениям, справедливым для законов теплообмена.

При больших скоростях массопереноса поперечный поток массы изменяет распределение скорости, температуры и концентрации в пограничном слое по сравнению с условиями, когда такого потока нет.

## **Основные процессы.**

Процессы массообмена, связанные с переносом примесей в теплоносителе и образованием отложений на внутренних поверхностях контура имеют большое значение при работе ЯЭУ.

Температуры в различных частях контура различны. Поскольку растворимость вещества в жидкости растёт с повышением температуры, в одних частях возможно растворение материалов (коррозия), в других – выпадение примесей из раствора, образование отложений.

Существенное значение в проблеме массопереноса имеет природа переносимых примесей. Например, продукты коррозии в теплоносителе (ионы  $Fe^{++}$ , коллоидные частицы) подвержены влиянию поверхностных сил, рН среды. Последние факторы могут приводить к коагуляции частиц и появлению взвесей мелких частиц, способных осаждаться на поверхностях теплообмена.

Отложения на твэлах и других элементах установки ухудшают теплопередачу, увеличивают потери мощности на прокачку теплоносителя, приводят к более интенсивной коррозии поверхностей.

Кинетика поведения примесей в теплоносителе определяется двумя процессами:

- скоростью появления примесей (продуктов коррозии, загрязнения и т.п.);
- скоростью удаления их с помощью предназначенных для этой цели устройств (фильтров, различного вида ловушек и т.д.).

## *Вопросы, выносимые на зачёт*

1. Диффузия. Виды. Критериальное число Шмидта.
2. Диффузия. Закон Фика (формулировка). Критериальное число Шмидта.
3. Диффузия.  
Пограничный слой (диффузионный). Толщина пограничного слоя.  
Критериальное число Шмидта.
4. Диффузия.  
Пограничный слой (диффузионный). Критериальное число Шмидта.  
Соотношение толщин динамического и диффузионного  
изотермического пограничного слоя при различных числах Шмидта.



*ДЗЯКУЙ  
ЗА ЎВАГУ*

*СПАСИБО  
ЗА ВНИМАНИЕ*

*THANK FOR  
YOUR ATTENTION*