



СКОРОСТЬ

МАССОПЕРЕДАЧИ

Скорость массопередачи связана с механизмом переноса распределяемого вещества в фазах между которыми происходит *массообмен*.

Перенос вещества внутри фазы может происходить только путем *молекулярной диффузии* либо путем *конвекции* и *молекулярной диффузии* одновременно.

Посредством одной *молекулярной диффузии* вещество перемещается в неподвижной среде.



В движущейся среде перенос вещества осуществляется как *молекулярной диффузией*, так и самой средой в направлении ее движения или отдельными ее частицами в разнообразных направлениях.

В турбулентном потоке перенос *молекулярной диффузией* преобладает только вблизи границы фазы.



При турбулентном течении возникают нерегулярные пульсации скорости, под действием которых, наряду с общим движением потока, происходит перемещение частиц во всех направлениях, в том числе и в поперечном.

Конвективный перенос вещества, осуществляемый под действием турбулентных пульсаций, часто называют *турбулентной диффузией*.



МОЛЕКУЛЯРНАЯ ДИФФУЗИЯ

Молекулярной диффузией называется перенос распределяемого вещества, обусловленный беспорядочным тепловым движением молекул, атомов, ионов, коллоидных частиц. *Молекулярная диффузия* описывается **первым законом Фика**, согласно которому масса вещества dM , продиффундировавшего за время $d\tau$ через элементарную поверхность dF (нормальную к направлению диффузии), пропорциональна градиенту концентрации этого вещества



$$dM = -D dF d\tau \frac{dc}{dn} \quad \text{или} \quad M = -D F \tau \frac{dc}{dn}$$

удельный поток вещества, переносимого молекулярной диффузией через единицу поверхности ($F = 1$) в единицу времени ($\tau=1$), или скорость молекулярной диффузии, составляет

$$q = \frac{M}{F \tau} = -D \frac{dc}{dn}.$$



По своей структуре *закон Фика* аналогичен *закону Фурье*, описывающему передачу тепла теплопроводностью, причем аналогом градиента температур является в данном случае градиент концентраций, представляющий собой изменение концентрации диффундирующего вещества на единицу длины нормали между двумя поверхностями постоянных, но различных концентраций.



Коэффициент пропорциональности D в выражении закона Фика называется коэффициентом молекулярной диффузии, или просто коэффициентом диффузии.

Знак минус перед правой частью **первого закона Фика** указывает на то, что молекулярная диффузия всегда протекает в направлении уменьшения концентрации распределяемого компонента. Коэффициент диффузии выражается как:

$$[D] = \left[\frac{M \, dn}{dc \, F \, \tau} \right] = \frac{\text{кг} \cdot \text{м}}{\frac{\text{кг}}{\text{м}^3} \cdot \text{м}^2 \cdot \text{с}} = \frac{\text{м}^2}{\text{с}}$$

Коэффициент диффузии, показывает, какая масса вещества диффундирует в единицу времени через единицу поверхности при градиенте концентрации, равном единице.

Коэффициент молекулярной диффузии представляет собой физическую константу, характеризующую способность данного вещества проникать вследствие диффузии в неподвижную среду. Величина D таким образом не зависит от гидродинамических условий, в которых протекает процесс.



Значения коэффициента диффузии D являются функцией свойств распределяемого вещества, свойств среды, через которую оно диффундирует, температуры и давления. Обычно величины D возрастают с увеличением температуры и понижением давления (для газов).

В каждом конкретном случае значение D определяют по опытным данным или по теоретическим и полуэмпирическим уравнениям с учетом температуры и давления, при которых протекает процесс диффузии.



Турбулентная диффузия. Масса вещества dM_m , переносимого в пределах фазы вследствие *турбулентной диффузии*, может быть принята, по аналогии с *молекулярной диффузией*, пропорциональной поверхности dF , времени $d\tau$ и градиенту концентрации dc/dn и определяется по, уравнению:

$$dM_m = -\varepsilon_d dF d\tau \frac{dc}{dn},$$

где ε_d - коэф.

диффузии.



Коэффициент турбулентной диффузии ϵ_d показывает *какая масса вещества передается посредством турбулентной диффузии в единицу времени через единицу поверхности при градиенте концентрации, равном единице.*



Коэффициент ϵ_d выражается в тех же единицах, что и коэффициент молекулярной диффузии D . Однако в отличие от D коэффициент турбулентной диффузии ϵ_d не является физической константой; он зависит от гидродинамических условий, определяемых в основном скоростью потока и масштабом турбулентности.



КОНВЕКТИВНЫЙ ПЕРЕНОС

Скорость конвективного, переноса вещества вместе с самой средой в направлении, совпадающем с направлением общего потока, равна

$$q_k = C v,$$

где v - скорость потока жидкости, газа или пара; C - коэффициент пропорциональности.

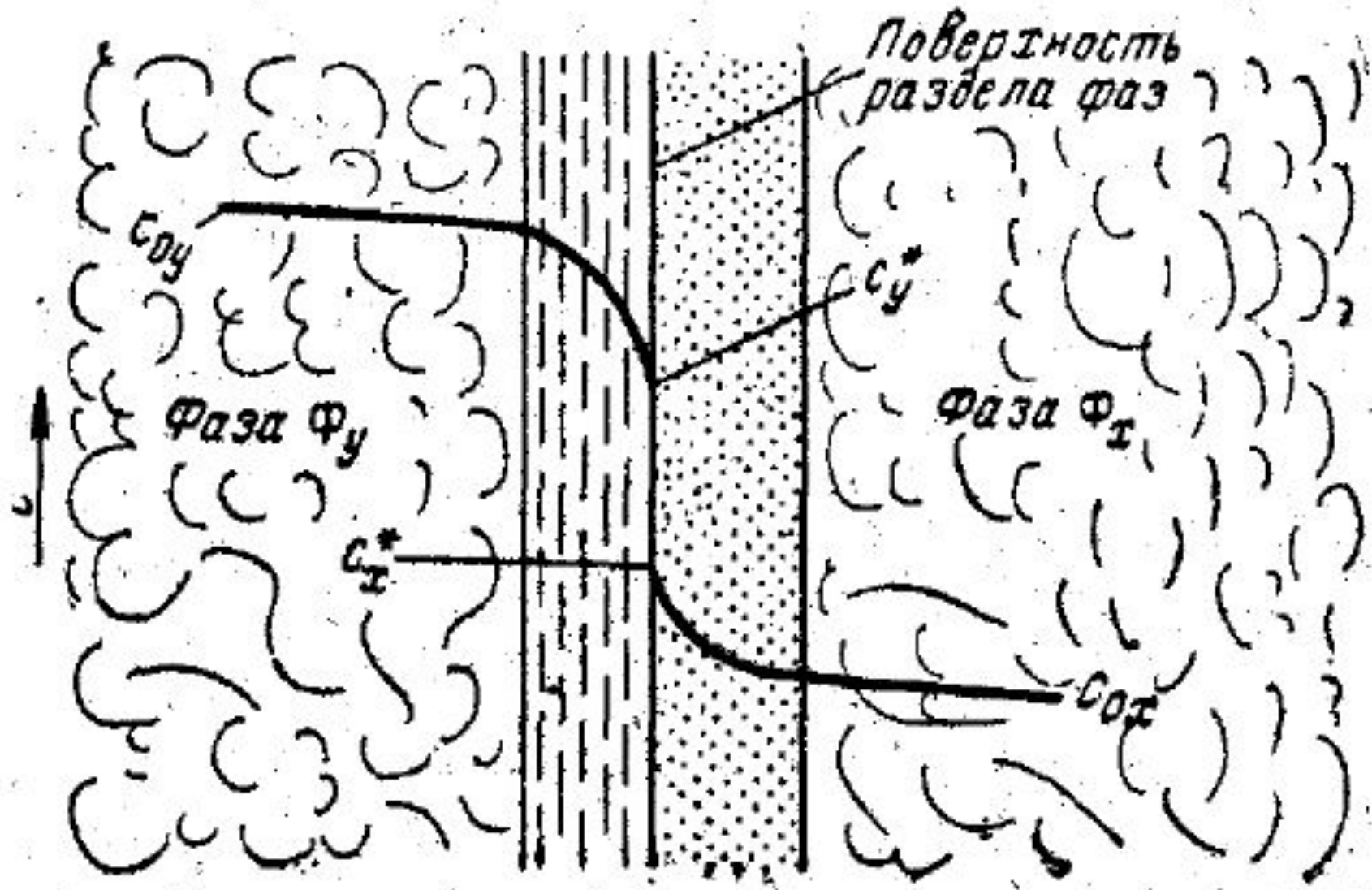
Суммарный перенос вещества вследствие конвективного переноса и молекулярной диффузии называют ***конвективной диффузией***.



***МЕХАНИЗМ ПРОЦЕССОВ
МАССОПЕРЕНОСА***

ПРОЦЕСС МАССОПЕРЕДАЧИ МЕЖДУ ЖИДКОСТЬЮ И ГАЗОМ (ПАРОМ)

ИЛИ МЕЖДУ ДВУМЯ ЖИДКОСТЯМИ



Процесс *массопередачи* теснейшим образом связан со структурой турбулентного потока в каждой фазе. *Как известно из гидродинамики*, при турбулентном движении потока у твердой стенки образуется пограничный слой. Аналогично в каждой фазе различают ядро, или основную массу фазы, и пограничный слой у границы фазы.

В *ядре* вещество переносится преимущественно турбулентными пульсациями и концентрация распределяемого вещества, в ядре практически постоянна.



В *пограничном слое* происходит постепенное затухание турбулентности. Это выражается все более резким изменением концентрации по мере приближения к поверхности раздела.

Непосредственно у поверхности перенос сильно замедляется, так как его скорость уже определяется скоростью молекулярной диффузии.

В этой области наблюдается наиболее резкое, близкое к линейному, изменение концентрации вплоть до границы раздела фаз .



Такой характер изменения концентраций объясняется тормозящим действием сил трения между фазами и сил поверхностного натяжения на границе жидкой фазы.

Действием этих сил обусловлено сходство между изменением концентрации распределяемого вещества при *массоотдаче* и изменением температур у твердой стенки в процессе теплоотдачи.



Таким образом, при турбулентном движении в ядре потока фазы перенос к границе раздела фаз (или в противоположном направлении) осуществляется параллельно молекулярной и турбулентной диффузией, причем основная масса вещества переносится посредством турбулентной диффузии. В пограничном же слое скорость переноса лимитируется скоростью молекулярной диффузии.



Соответственно для интенсификации массопереноса желательно уменьшать толщину пограничного слоя, повышая степень турбулентности потока, например путем увеличения до некоторого, предела скорости фазы.



МОДЕЛИ ПРОЦЕССОВ МАССОПЕРЕНОСА

Механизм *массоотдачи* характеризуется сочетанием молекулярного и конвективного переноса.

Еще более сложным является процесс *массопередачи*, включающий в качестве составляющих процессы *массоотдачи* по обе стороны границы раздела фаз.

В связи с этим предложен ряд теоретических моделей, представляющих собой в той или иной степени упрощенные схемы механизма массопереноса.



В основу большинства моделей положены следующие допущения:

1. Общее сопротивление переносу из фазы в фазу складывается из сопротивления двух фаз и сопротивления поверхности раздела фаз. Однако сопротивление на поверхности раздела можно в большинстве случаев считать равным нулю. Тогда, принимая, что процесс переноса в пределах каждой фазы протекает независимо от другой, общее сопротивление переносу можно рассматривать как сумму фазовых сопротивлений (правило аддитивности).



2. На поверхности раздела фазы находятся *в равновесии*, причем равновесие на границе фазы устанавливается значительно быстрее изменения средней концентрации в ядре фазы.



Наиболее *ранняя пленочная модель* была предложена Льюисом и Уитменом. Согласно этой модели, в каждой фазе непосредственно к ее границе примыкают неподвижные или ламинарно движущиеся пленки, в которых перенос осуществляется только *молекулярной диффузией*. В пленках сосредоточено все сопротивление *массоотдаче*. Поэтому градиенты концентраций возникают лишь внутри пограничных пленок в ядре фазы концентрации постоянны и равны средним концентрациям.



Согласно *пленочной модели*, количество вещества q , перешедшего через единицу поверхности в единицу времени, пропорционально разности концентраций в ядре и на границе фазы, если перенос происходит от ядра к поверхности раздела фаз:

$$q = \frac{D}{\delta_{эф}} (c_o - c_{гр})$$

где c_o и $c_{гр}$ - средняя концентрация в ядре фазы и концентрация на границе раздела фаз; $\delta_{эф}$ - «эффективная» или «приведенная» толщина пограничной пленки.

Для фазы по другую сторону поверхности раздела величина q пропорциональна разности концентраций на границе и в ядре фазы.

В уравнении $D/\delta_{эф}$ - коэффициент, характеризующий скорость *массоотдачи*, а величина $\delta_{эф}$ по своему смыслу - толщина некоторого пограничного слоя, сопротивление которого молекулярной диффузии эквивалентно сопротивлению переносу, обусловленному в действительности конвективной диффузией.



В *пленочной модели* значительно упрощены истинные гидродинамические условия вблизи границы раздела фаз. Кроме того, эффективные толщины пленок практически не поддаются расчету или измерению.

Более точно учитываются условия у границы раздела в модифицированной пленочной модели, называемой *моделью диффузионного пограничного слоя*. Этой модели отвечает схема распределения концентрации в жидкой или газовой фазе.




Концентрация вещества, постоянная в ядре потока фазы ($c_0 = \text{const}$), медленно снижается в турбулентном пограничном слое, где вначале вещество переносится преимущественно турбулентными пульсациями. С приближением к границе фазы и уменьшением масштаба пульсаций на участке толщины слоя, в так называемом *вязком подслое* концентрация снижается заметно быстрее.

Здесь под действием сил трения движение приближается к ламинарному, и возрастает доля вещества, передаваемого молекулярной диффузией.

Однако на большей части толщины δ_0 вязкого подслоя турбулентной диффузией переносится большее количество вещества, чем молекулярной.

Лишь в самой глубине вязкого подслоя, внутри *тонкого диффузионного подслоя* толщиной δ , непосредственно примыкающего к границе раздела фаз, молекулярный перенос становится преобладающим. Диффузионный подслой является областью наиболее резкого и близкого к линейному изменения концентраций.



Затухание турбулентности происходит постепенно и непрерывно, и лишь у самой твердой стенки пульсационная скорость становится равной нулю, что соответствует $\varepsilon \delta = 0$. В системах газ (пар) - жидкость и жидкость - жидкость, обладающих подвижной поверхностью раздела, силы поверхностного натяжения действуют подобно силам трения у твердой поверхности.



Однако до сих пор достоверно не установлен истинный закон затухания турбулентных пульсаций с приближением к границе фазы, и величину t нельзя определить теоретически.

Таким образом, в настоящее время не существует теоретических моделей *массопередачи*, основывающихся на точных, надежно проверенных опытом гидродинамических закономерностях. Основной причиной этого следует считать сложность и недостаточную изученность турбулентного движения.

