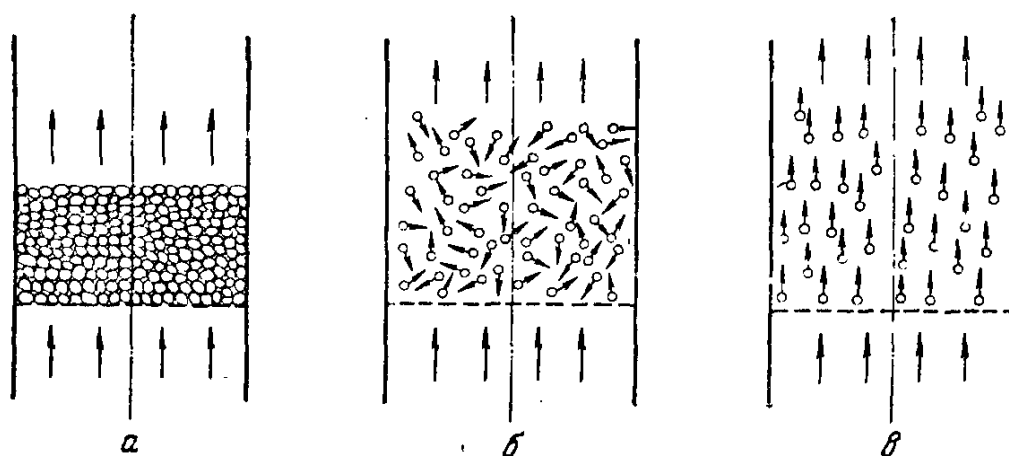


## Лекция 15 «Гидродинамика кипящих (псевдоожигенных) зернистых слоёв»

**Цель:** Опишите гидродинамику кипящих (псевдоожигенных) зернистых слоёв. Охарактеризуйте основы псевдоожигения. Приведите критерии подобия для псевдоожигения.

**Краткий конспект лекции:** За последние два десятилетия значительное применение в химической и других отраслях промышленности получили процессы, связанные с взаимодействием газов (реже – капельных жидкостей) со слоем мелкодробленых твердых частиц, находящихся в кипящем, или псевдоожигенном, состоянии. Аппараты с кипящим слоем используются для перемещения и смешивания сыпучих материалов, для проведения процессов обжигания, теплообмена, сушки, адсорбции, каталитических и других процессов. Такое широкое распространение процессов в кипящем слое обусловлено рядом их преимуществ.



**Рис. 1.** Движение газа (жидкости) через слой твердых частиц:  
*a* – неподвижный слой; *б* – кипящий (псевдоожигенный) слой;  
*в* – унос твердых частиц потоком

Здесь отметим только, что псевдоожигению подвергаются частицы значительно меньших размеров, чем частицы материалов, находящихся в неподвижном слое. Гидравлическое сопротивление кипящего слоя при этом относительно невелико, а уменьшение размеров частиц приводит к увеличению поверхности их контакта с потоком и снижает сопротивление диффузии внутри частиц при взаимодействии между твердой и газовой (или жидкой) фазами. В результате возрастает скорость протекания многих процессов.

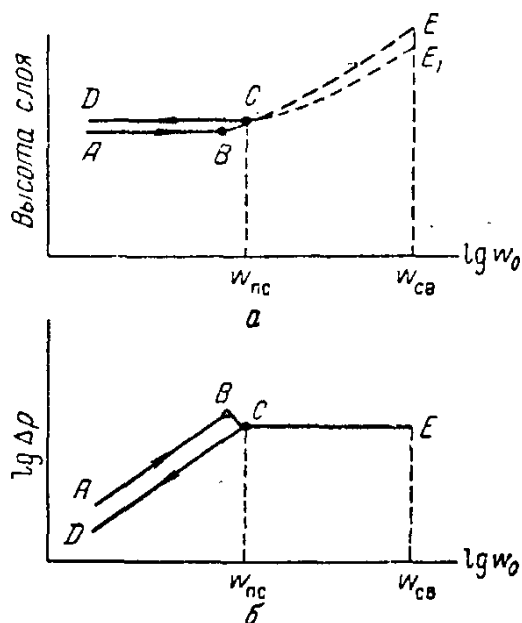
Закономерности движения жидкости через зернистые слои, рассмотренные выше, соблюдаются практически при любых скоростях потока лишь при движении его сверху вниз. Когда поток движется снизу вверх, эти закономерности применимы лишь при условии, что скорость потока не превышает такого значения, при котором неподвижность слоя нарушается.

На рис. 1 показаны три возможных состояния слоя твердых частиц в зависимости от скорости восходящего потока.

При относительно небольших скоростях зернистый слой остается неподвижным (рис. 1, а), и его характеристики (удельная поверхность, порозность и т.д.) не меняются с изменением скорости потока. Жидкость при этом просто фильтруется через слой. Однако, когда скорость достигает некоторой критической величины, слой перестает быть неподвижным, его порозность и высота начинают увеличиваться, слой приобретает текучесть и переходит как бы в *кипящее (псевдооживленное)* состояние. В таком слое твердые частицы интенсивно перемещаются в потоке в различных направлениях (рис. 1, б), и весь слой напоминает кипящую жидкость, ограниченную ясно выраженной верхней границей раздела с потоком, прошедшим слой. При дальнейшем увеличении скорости потока порозность слоя и его высота продолжают возрастать вплоть до того момента, когда скорость достигает нового критического значения, при котором слой разрушается и твердые частицы начинают уноситься потоком (рис. 1, в). Явление массового уноса твердых частиц потоком газа называют *пневмотранспортом* и используют в промышленности для перемещения сыпучих материалов.

Типичные графики изменения высоты зернистого слоя и перепада давлений в нем (гидравлического сопротивления) в зависимости от фиктивной скорости газа (скорости, отнесенной ко всему сечению аппарата) представлены на рис. 2.

Скорость, при которой нарушается неподвижность слоя и он начинает переходить в псевдооживленное состояние, называют *скоростью псевдооживления* и обозначают через  $w_{nc}$ . При увеличении скорости газа до значения, равного  $w_{nc}$ , сопротивление зернистого слоя, как следует из рис. 2, б, возрастает с увеличением  $w_0$ , а его высота практически не изменяется (линия АВС на рис. 2, а).



**Рис. 2.** Зависимости высоты зернистого слоя (а) и его гидравлического сопротивления (б) от скорости потока

Начало псевдооживления наступает при равенстве силы гидравлического сопротивления слоя весу всех его частиц. Однако в действительности перепад давлений в слое, соответствующий точке В (рис. 2, б), т.е. непосредственно перед началом

псевдооживления (точка  $C$ ), несколько больше, чем это необходимо для поддержания слоя во взвешенном состоянии. Это объясняется действием сил сцепления между частицами слоя, находящегося в покое. Когда скорость потока достигает значения  $w_{nc}$ , частицы преодолевают силы сцепления и перепад давлений становится равным весу частиц, приходящемуся на единицу площади поперечного сечения аппарата.

Из рис. 2, б видно, что указанное условие выполняется для всей области существования псевдооживленного слоя (линия  $CE$ ), вплоть до того момента, когда скорость становится такой, при которой слой разрушается и начинается массовый унос частиц потоком. Эту скорость называют *скоростью уноса*, или, иначе, *скоростью свободного витания частиц*, и обозначают символом  $w_{св}$ . Последнее название обусловлено тем, что при массовом уносе порозность слоя столь велика ( $\epsilon$  приближается к 1), что движение отдельных частиц можно считать не зависящим от воздействия других частиц слоя. Каждая отдельная частица свободно витает, т.е. не осаждается и не уносится потоком, при условии, что ее вес в среде уравнивается силой сопротивления, возникающей при обтекании частицы потоком. Значение  $w_{св}$  может быть найдено исходя из этого условия. Малейшее превышение скорости  $w_0$  над величиной  $w_{св}$  приводит к уносу частицы.

Таким образом, условие витания частицы в восходящем потоке идентично условию равномерного осаждения частицы в неподвижной среде. Поэтому скорости  $w_{св}$  можно определять так же, как скорости осаждения  $w_{ос}$ .

В случае уменьшения скорости потока после псевдооживления слоя наблюдается явление гистерезиса: зависимость гидравлического сопротивления неподвижного слоя от скорости потока выражается не линией  $ABC$  (рис. 2, б), а прямой  $CD$ , расположенной ниже. Это связано с тем, что порозность неподвижного слоя по окончании его псевдооживления становится несколько выше, чем до псевдооживления. Последнее подтверждается также данными рис. 2, а – высота неподвижного слоя после псевдооживления (ордината линии  $CD$ ) больше, чем она была до псевдооживления (ордината линии  $AB$ ). Если вновь начать подачу газа в образованный путем псевдооживления более порозный слой, то при увеличении скорости получается зависимость, соответствующая линии  $CD$ , и явление гистерезиса уже не наблюдается.

Пределы существования псевдооживленного слоя ограничены, следовательно, снизу скоростью псевдооживления  $w_{nc}$  и сверху – скоростью витания  $w_{св}$ .

Надо заметить, что резкий переход от неподвижного к псевдооживленному состоянию зернистого слоя характерен лишь для слоев частиц одинаковой дисперсности. Для полидисперсных слоев существует не скорость псевдооживления, а *область скоростей псевдооживления*, в которой начинается и завершается переход от неподвижного к полностью псевдооживленному слою.

Отношение рабочей скорости  $w_0$ , значение которой должно находиться в пределах между  $w_{nc}$  и  $w_{св}$ , к скорости начала псевдооживления называют *числом псевдооживления* и обозначают символом  $K_w$ :

$$K_w = \frac{w_0}{w_{nc}} \quad (1)$$

Число псевдооживления характеризует интенсивность перемешивания частиц и состояние псевдооживленного слоя. Опытным путем найдено, что во многих случаях

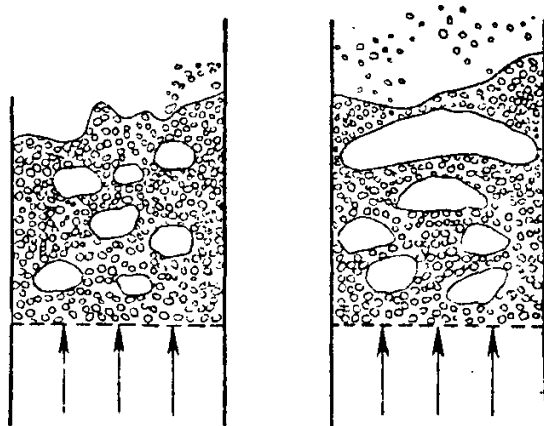
интенсивное перемешивание достигается уже при  $K_w = 2$ . Оптимальные значения  $K_w$  устанавливаются обычно практически для каждого конкретного технологического процесса и могут изменяться в довольно широких пределах.

При  $w_0 > w_{nc}$ , т.е. при  $K_w > 1$ , характеристики кипящих слоев неодинаковы при их псевдооживлении с помощью газа или капельной жидкости. Эти характеристики зависят также от величины  $K_w$ .

Полностью *однородное псевдооживление* практически возможно лишь при псевдооживлении твердых частиц в потоке капельной жидкости. При этом увеличение скорости сверх  $w_{nc}$  приводит к соответствующему возрастанию высоты слоя без каких-либо заметных колебаний его верхней границы. Расстояние между частицами в данном случае увеличивается постепенно, а жидкость движется в свободном объеме между ними сплошным потоком.

Однако чаще всего в промышленности используют процессы псевдооживления в системе газ – твердая фаза. Для этой системы псевдооживление, как правило, является неоднородным: часть газа движется через слой не сплошным потоком, а в виде пузырей, которые разрушаются, достигнув верхней границы слоя, что вызывает колебания высоты слоя. На рис. 2, а показаны пунктиром (линии  $CE$  и  $CE_1$ ) пределы колебания высоты псевдооживленного слоя.

Пока значения числа псевдооживления не очень велики, неоднородность слоя не оказывает отрицательного воздействия на его характеристики, а движущиеся пузыри, наоборот, интенсифицируют перемешивание частиц в слое. Однако при значительном увеличении скорости газа неоднородность слоя возрастает: сквозь слой все чаще прорываются более крупные пузыри и начинается интенсивное выбрасывание твердых частиц над поверхностью слоя (рис. 3, а). Пузыри газа могут увеличиваться в объеме столь значительно, что, наконец, их размер достигает диаметра аппарата (рис. 3, б). При этом псевдооживленный слой разделяется на отдельные части газовыми «пробками»; часть слоя, находящаяся над пробкой, подбрасывается вверх, что приводит к большому выбросу твердых частиц.



**Рис. 3.** Возрастание неравномерности псевдооживления с увеличением скорости газа

Такой режим работы называют *поршневым псевдооживлением*. Его возникновению способствуют, кроме возрастания скорости газа, увеличение размера

частиц и уменьшение диаметра аппарата. Поршневой режим нежелателен, так как при нем резко ухудшается равномерность контакта между газом и твердыми частицами.

При псевдооживлении некоторых материалов однородность слоя нарушается также вследствие *каналообразования*, при котором происходит прорыв («байпасирование») значительного количества газа (жидкости) через один или несколько каналов, образующихся в слое. Каналообразование особенно часто наблюдается при применении материалов с очень мелкими или слипающимися частицами. Предельным случаем каналообразования является *фонтанирование*, при котором поток газа (или жидкости) прорывается сквозь слой по одному большому каналу, возникающему близ оси аппарата.

Режим псевдооживления, соответствующий изменению скоростей в пределах от  $w_{\text{гс}}$  до  $w_{\text{св}}$ , называют *псевдооживлением в плотной фазе*, в отличие от режима, при котором  $w_0 > w_{\text{св}}$  и происходит пневмотранспорт твердых частиц в *разбавленной фазе* кипящего слоя.

Основные гидродинамические характеристики псевдооживленных слоев находят следующими методами.

Скорость псевдооживления  $w_{\text{св}}$  наиболее надежно определяют на лабораторных или полупромышленных установках, измеряя сопротивление  $\Delta p$  слоя в зависимости от фиктивной скорости  $w_0$ . Результаты измерений обычно представляют графически в виде зависимости типа приведенной на рис. 2, б.

Расчетным путем величина  $w_{\text{гс}}$  может быть определена исходя из указанного выше условия равенства сопротивления слоя весу твердой фазы, отнесенному к единице площади поперечного сечения аппарата.

В литературе предложен ряд зависимостей для вычисления  $w_{\text{гс}}$ , полученных на основе различных уравнений для расчета гидравлического сопротивления слоя. Так, при подстановке выражения  $\lambda = \frac{133}{Re} + 2,34$  (11, Лекция №14) для коэффициента сопротивления  $\lambda$  в уравнение  $\Delta p = \frac{3(1-\varepsilon)}{2\varepsilon^3\Phi} \lambda \frac{H}{d} \cdot \frac{\rho w_0^2}{2}$  (7, Лекция №14) находим следующую зависимость гидравлического сопротивления от различных факторов

$$\Delta p = \frac{3}{2} \cdot \frac{1-\varepsilon}{\varepsilon^3\Phi} \left( \frac{133}{Re} + 2,34 \right) \frac{H}{d} \cdot \frac{\rho w_0^2}{2}$$

или после подстановки значения  $Re$  из выражения  $Re = \frac{2}{3} \cdot \frac{\Phi}{1-\varepsilon} \cdot \frac{w d_0 \rho}{\mu} = \frac{2}{3} \cdot \frac{\Phi}{1-\varepsilon} \cdot Re_0$  (9, Лекция №14)

$$\begin{aligned} \Delta p &= \frac{3}{2} \cdot \frac{1-\varepsilon}{\varepsilon^3\Phi} \left[ \frac{3 \cdot 133 \mu (1-\varepsilon)}{2 \Phi w_0 d_0} + 2,34 \right] \frac{H}{d} \cdot \frac{\rho w_0^2}{2} = \\ &= 150 \frac{(1-\varepsilon)^2 \mu H w_0}{\varepsilon^3 \Phi^2 d^2} + 1,75 \frac{1-\varepsilon}{\varepsilon^3 \Phi} H \frac{\rho w_0^2}{d} \end{aligned}$$

Вес твердых частиц в слое  $G_{\text{т}}$ , отнесенный к 1  $m^2$  поперечного сечения  $S$  аппарата (с учетом архимедовой силы), равен

$$\frac{G_T}{S} = \frac{(\rho_T - \rho)gSH(1-\varepsilon)}{S} = g(\rho_T - \rho)(1 - \varepsilon)H$$

Приравнивая  $\Delta\rho$  величине  $G_T/S$  и проводя сокращения, получим

$$150 \frac{(1 - \varepsilon)\mu w_{пс}}{\varepsilon^3 \Phi^2 d^2} + 1,75 \frac{w_{пс}^2 \rho}{\varepsilon^3 \Phi d} = g(\rho_T - \rho)$$

Умножим обе части этого уравнения на  $d^3 \rho / \mu^2$ . Тогда

$$150 \frac{(1 - \varepsilon)w_{пс}d\rho}{\varepsilon^3 \Phi^2 \mu} + 1,75 \frac{w_{пс}^2 d^2 \rho^2}{\varepsilon^3 \Phi \mu^2} = \frac{d^3 \rho^2 g}{\mu^2} \cdot \frac{\rho_T - \rho}{\rho}$$

или

$$150 \frac{1-\varepsilon}{\varepsilon^3 \Phi^2} Re_{0,пс} + \frac{1,75}{\varepsilon^3 \Phi} Re_{0,пс}^2 = Ar \quad (2)$$

где  $Ar$  – критерий Архимеда;  $Re_{0,пс}$  – критическое значение модифицированного критерия Рейнольдса  $Re_0$  [см. выражение  $Re_0 = \frac{wd_0\rho}{\mu}$  (10, Лекция №14)], соответствующее началу псевдооживления.

Для частиц округлой формы, близкой к шарообразной, значение поверхностного фактора  $\Phi$ , определяемого уравнением  $\Phi = F_{ш}/F$  (где  $F_{ш}$  – поверхность шара, имеющего тот же объём, что и рассматриваемое тело поверхностью  $F$ ), близко к единице, а средняя порозность слоя  $\varepsilon$  может быть принята равной  $\approx 0,4$ . В данном случае путем приближенного решения квадратного уравнения (2) получают следующее выражение критического значения  $Re_0$ , при котором начинается псевдооживление:

$$Re_{0,пс} = \frac{Ar}{1400 + 5,22\sqrt{Ar}} \quad (3)$$

При расчете скорости псевдооживления с помощью этого уравнения вычисляют сначала значение критерия  $Ar$  по выражению  $Ar = \frac{d^3 \rho^2 g}{\mu^2} \cdot \frac{\rho_T - \rho}{\rho}$ , затем находят величину  $Re_{0,пс}$  из уравнения (3) и по ней, пользуясь выражением  $Re_0 = \frac{wd_0\rho}{\mu}$ , - величину  $w_{пс}$ .

В случае  $w_0 > w_{пс}$  увеличением скорости слой расширяется и доля его свободного объема возрастает. При этом высота псевдооживленного слоя  $H_{пс}$  и первоначальная высота неподвижного слоя  $H_n$  связаны зависимостью

$$H_{пс}(1 - \varepsilon_{пс}) = H_n(1 - \varepsilon_n) \quad (4)$$

Расчет скорости витания  $w_{св}$ , при которой происходит разрушение слоя и массовый унос частиц, как указывалось, проводят аналогично расчету скорости свободного осаждения частиц  $w_{ос}$ . Например, по уравнению, пригодному для всех режимов движения частиц

$$Re_{0,св} = \frac{Ar}{18+0,575\sqrt{Ar}} \quad (5)$$

При работе с полидисперсными слоями, если при расчете  $w_{пс}$  с помощью уравнения (3) можно использовать средний размер частиц, скорость начала разрушения псевдооживленного слоя надо определять по уравнению (5) для самых мелких частиц, наиболее легко выдуваемых из слоя.

Уравнение (3) для вычисления  $w_{пс}$  при  $\varepsilon = 0,4$  и уравнение (5) для определения  $w_{ос}$  или  $w_{св}$  при  $\varepsilon = 1$  имеют одинаковую форму. Такую же структуру имеет зависимость между критериями  $Re_0$  и  $Ar$  и при промежуточных значениях  $0,4 < \varepsilon < 1$ . Обобщением опытных данных в этих условиях получена формула

$$Re_0 = \frac{Ar\varepsilon^{4,75}}{18+0,6\sqrt{Ar\varepsilon^{4,75}}} \quad (6)$$

По этой формуле можно вычислить скорость  $w_0$ , необходимую для достижения любой данной доли свободного объема слоя.

Для решения противоположной задачи – расчета  $\varepsilon$  при данном значении  $w_0$  – формула (6) приводится к виду

$$\varepsilon = \left( \frac{18Re_0 + 0,36Re_0^2}{Ar} \right)^{0,21} \quad (6a)$$

### Вопросы для самоконтроля:

1. Опишите гидродинамику кипящих (псевдооживленных) зернистых слоев.
2. Охарактеризуйте основы псевдооживления.
3. Приведите критерии подобия для псевдооживления.

### Литература

1. Лекции по курсу «Основные процессы и аппараты химической технологии»: учебно-методическое пособие / составители: Ж.Т. Ешова, Д.Н. Акбаева. – Алматы: Қазақ университеті, 2017. – 392 с.
2. Касаткин А.Г. Основные процессы и аппараты химической технологии. – М.: Химия, 1973. – 752 с.
3. Романков П.Г., Фролов В.Ф., Флисюк О.М. Методы расчёта процессов и аппаратов химической технологии (примеры и задачи). – Санкт-Петербург: ХИМИЗДАТ, 2009. – 544 с.