

# XVIII В Б А

В химической технологии широко распространены процессы, использующие слой зернистого твердого материала, через который движется поток газа, пара или капельной жидкости. При этом в качестве зернистого материала используются катализаторы, адсорбенты, теплоносители, фильтрующий материал и др.

Частицы зернистого материала могут иметь различную форму (сфера, цилиндры, таблетки, зерна произвольной формы), а слой может быть монодисперсным (состоять из частиц одинакового размера) или полидисперсным (состоять из частиц различных размеров).

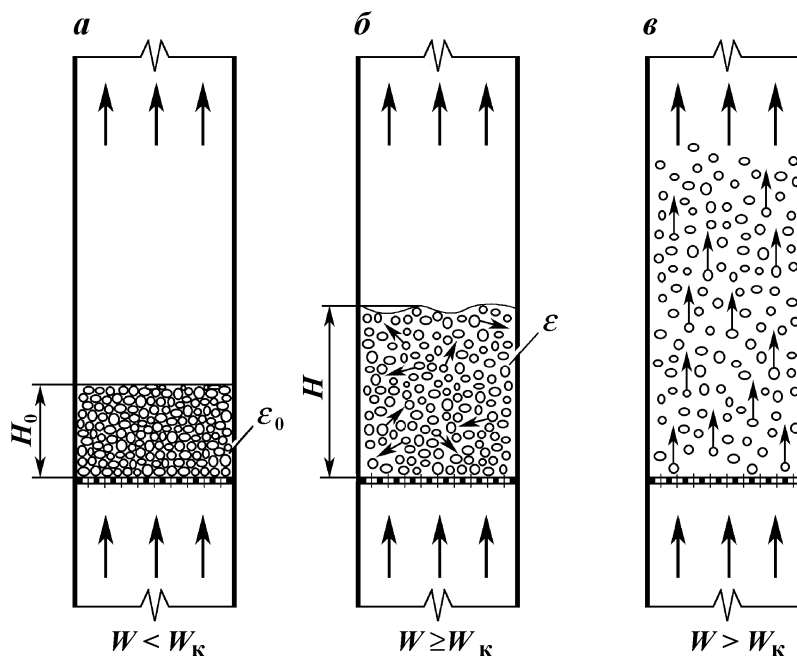


Рис. XVIII-1. Схемы различных состояний слоя твердых частиц при прохождении через них потока газа (жидкости):

*a* — плотный слой; *б* — псевдооживленный слой; *в* — пневмотранспорт частиц

При движении газовой или жидкой фазы через зернистый слой материала поток заполняет все пространство между частицами, образующими в слое извилистые поровые каналы. Различают три основных состояния зернистого слоя.

**Плотный слой** — частицы находятся в тесном соприкосновении одна с другой, расстояние между ними и объем слоя остаются неизменными при изменении скорости потока газовой или жидкой фазы, проходящего через слой. Плотный слой может быть неподвижным или компактно перемещающимся.

**Взвешенный, псевдооживленный или «кипящий» слой** — частицы в результате воздействия движущейся через слой газовой или жидкой фазы находятся в хаотическом движении в пределах слоя, напоминая кипящую жидкость. Расстояние между частицами и объем слоя изменяются в зависимости от скорости потока, проходящего через слой.

**Режим транспорта частиц** — частицы зернистого материала перемещаются в направлении движения восходящего потока жидкости или газа.

Эти характерные состояния слоя зернистого материала проиллюстрированы на рис. XVIII-1. В определенных условиях плотный слой может перейти в псевдооживленный, а последний — в транспортируемый, и наоборот.

В нефтегазопереработке аппараты с неподвижным или движущимся плотным слоем зернистого материала используют в процессах адсорбционного разделения газов, каталитического крекинга, риформинга, гидроочистки; кипящий слой применяют в реакционных аппаратах установок каталитического крекинга, коксования, гидрокрекинга, каталитического дегидрирования *n*-бутана и др.

ÄÂÈÆÁÍ ÈÂ Î Ì ÒÎ ÊÀ ÄÀÇÀ  
(Í ÆÎÎ Â ÈÈÈ ÆÈÄÊÎ ÇÒÈ) ×ÂÐÂÇ Î ÊÎ ÒÎ ÛÉ  
ÑÊÎ Ê ÇÂÐÎ ÈÑÒÎ ÄÎ Î ÆÒÂÐÈÆÈÀ

Плотный слой зернистого материала, через который движется поток газа или жидкости, представляет собой объем  $V = V_t + V_n$ , где  $V_t$  — объем, который непосредственно занимают твердые частицы, а  $V_n$  — объем извилистых поровых каналов, образующихся между частицами, по которым движется поток газа или жидкости. В зависимости от размера и формы частиц, а также характера их укладки меняются форма, размер и объем поровых каналов. Одной из основных характеристик слоя зернистого материала является его *порозность*, или *доля свободного объема*  $\varepsilon$ :

$$\varepsilon = \frac{V_n}{V} = \frac{V - V_t}{V} = 1 - \frac{V_t}{V}.$$

Если плотность твердых частиц обозначить  $\rho_t$ , а плотность газовой или жидкой фазы  $\rho$ , то плотность  $\rho_n$ , называемая *насыпной плотностью* слоя, будет равна

$$\rho_{\text{н}} = (1 - \varepsilon)\rho_{\text{т}} + \varepsilon\rho,$$

откуда

$$\varepsilon = \frac{\rho_{\text{т}} - \rho_{\text{н}}}{\rho_{\text{т}} - \rho}. \quad (\text{XVIII.1})$$

В случае потока газа или паров  $\rho_{\text{т}} \gg \rho$  величиной  $\rho$  в уравнении (XVIII.1) можно пренебречь и записать его в виде

$$\varepsilon = \frac{\rho_{\text{т}} - \rho_{\text{н}}}{\rho_{\text{т}}} = 1 - \frac{\rho_{\text{н}}}{\rho_{\text{т}}}. \quad (\text{XVIII.2})$$

В тех случаях, когда твердая частица является пористой (катализатор, адсорбент), в уравнении (XVIII.1) в качестве значения плотности твердой частицы пользуются так называемой *кажущейся плотностью частиц*  $\rho'_{\text{т}}$ , которая представляет собой массу единицы объема частицы с учетом объема ее пор. Чем выше пористость частицы, тем больше отличается от истинной плотности материала частицы  $\rho_{\text{т}}$  ее кажущаяся плотность  $\rho'_{\text{т}}$ .

Для промышленных аппаратов при отношении  $(D/d) > 10$  порозность плотного слоя по его высоте практически не меняется ( $D$  и  $d$  — соответственно диаметр аппарата и частицы).

Средняя скорость потока в поровых каналах слоя:

$$W_0 = \frac{W}{\varepsilon},$$

где  $W$  — скорость потока, отнесенная ко всему сечению слоя (аппарата), или скорость фильтрации.

При движении потока через сечение, отличающееся от круглой формы, в качестве расчетного линейного размера принимают *гидравлический радиус* или *эквивалентный диаметр*.

Под гидравлическим радиусом  $r_{\text{г}}$  понимают отношение площади сечения потока  $F$  к смоченному периметру  $\Pi$ :

$$r_{\text{г}} = \frac{F}{\Pi}.$$

Для круглой трубы внутренним диаметром  $d$  гидравлический радиус равен

$$r_{\text{г}} = \frac{F}{\Pi} = \frac{\pi d^2/4}{\pi d} = \frac{d}{4}.$$

Для гидродинамических расчетов необходимо располагать значением *эквивалентного диаметра порового канала*  $d_{\text{к}}$ , определяемого как отношение учетверенной площади суммарного сечения поровых каналов  $F_{\text{п}}$  к смоченному периметру этого сечения  $\Pi_{\text{п}}$ :

$$d_k = \frac{4F_{\Pi}}{\Pi_{\Pi}}. \quad (\text{XVIII.3})$$

Обозначив среднюю длину поровых каналов через  $L_{\Pi}$ , выражение (XVIII.3) можно записать в следующем виде:

$$d_k = \frac{4F_{\Pi} L_{\Pi}}{\Pi_{\Pi} L_{\Pi}} = \frac{4F_{\Pi} L_{\Pi} / V}{\Pi_{\Pi} L_{\Pi} / V} = \frac{4\varepsilon}{f_T},$$

где  $f_T$  — площадь поверхности частиц в единице объема слоя.

Если слой состоит из гранул сферической формы одинакового диаметра  $d$ , то эквивалентный диаметр порового канала составит

$$d_k = \frac{4\varepsilon}{f_T} = \frac{2d\varepsilon}{3(1-\varepsilon)}. \quad (\text{XVIII.4})$$

В случае, когда слой состоит из шаров различных размеров и известен гранулометрический состав слоя — массовое содержание  $x_i$  гранул диаметром  $d_i$ , эквивалентный диаметр канала можно получить из выражения

$$d = \frac{1}{\sum (x_i / d_i)}. \quad (\text{XVII.5})$$

Из сопоставления уравнений (XVIII.4) и (XVIII.5) следует, что диаметр порового канала для слоя, состоящего из частиц различного диаметра, может быть определен из соотношения

$$d_k = \frac{2\varepsilon}{3(1-\varepsilon) \sum (x_i / d_i)}. \quad (\text{XVIII.6})$$

Для гранул, не имеющих форму шара, диаметр находят с учетом коэффициента (фактора) формы  $\psi$ :

$$\psi = \frac{F}{F_{\text{ш}}} = \left( \frac{d}{d_{\text{р.ш}}} \right)^2,$$

откуда

$$d = d_{\text{р.ш}} \sqrt{\psi}, \quad (\text{XVIII.7})$$

где  $F$  и  $F_{\text{ш}}$  — площадь поверхности частиц соответственно неправильной и шарообразной формы равного объема;  $d$  и  $d_{\text{р.ш}}$  — диаметры шаров, равновеликих частице по поверхности и по объему (массе).

Поток среды через слой гранулированного материала может быть ламинарным, переходным или турбулентным в зависимости от значения параметра Рейнольдса:

$$\text{Re} = \frac{W_0 d_k \rho}{\mu}.$$

Подставив  $W_0 = W/\varepsilon$  и  $d_k$  из уравнения (XVIII.4), получим

$$\text{Re} = \frac{2Wd\rho}{3\mu(1-\varepsilon)}. \quad (\text{XVIII.8})$$

Параметр Рейнольдса может быть отнесен к любому геометрическому размеру потока, например, к гидравлическому диаметру или к диаметру гранулы. Однако в этом случае численные значения  $\text{Re}$ , соответствующие данному режиму движения, будут различными. Это обстоятельство необходимо учитывать при пользовании литературными данными, касающимися численных значений  $\text{Re}$ . Так, относя параметр  $\text{Re}$  к диаметру твердой частицы  $d$  и скорости фильтрации  $W$ , получим

$$\text{Re}_t = \frac{Wd\rho}{\mu}. \quad (\text{XVIII.9})$$

Сопоставив уравнения (XVIII.8) и (XVIII.9), получим

$$\text{Re} = \text{Re}_t \frac{2}{3(1-\varepsilon)}. \quad (\text{XVIII.10})$$

Потеря напора в слое может быть вычислена по известному уравнению гидравлики

$$\Delta p = \lambda \frac{H}{d_k} \frac{W_0^2 \rho}{2}, \quad (\text{XVIII.11})$$

где  $\lambda = f(\text{Re})$  — коэффициент гидравлического сопротивления, учитывающий как сопротивление от трения, так и местные гидравлические сопротивления;  $H$  — высота слоя, м;  $\rho$  — плотность потока, кг/м<sup>3</sup>.

Некоторые исследователи предлагают для определения  $\lambda$  пользоваться уравнением

$$\lambda = A \text{Re}^n, \quad (\text{XVIII.12})$$

причем коэффициент  $A$  и показатель степени  $n$  зависят от критерия  $\text{Re}$ ; при ламинарном движении  $n = 1$ , в переходной области  $n < 1$  и в турбулентной автомодельной области  $n = 0$ , т.е. сопротивление  $\Delta p$  в ламинарной области линейно зависит от скорости и вязкости, а в автомодельной области растет пропорционально  $W^2$  и не зависит от вязкости.

Другие исследователи рекомендуют двухчленное уравнение

$$\lambda = \frac{A}{\text{Re}} + B, \quad (\text{XVIII.13})$$

где  $A$  и  $B$  — коэффициенты. При ламинарном режиме величиной  $B$  можно пренебречь, так как она мала по сравнению с  $A$ , и, следовательно, также имеет место линейная зависимость, тогда как при больших значениях критерия  $\text{Re}$  величина  $A/\text{Re}$  мала, и, следовательно, имеет место квадратичная зависимость потери напора от скорости.

Такая двухчленная зависимость лучше отображает физическую сущность явления, поскольку сопротивление в слое складывается из двух составля-

ющих: 1) обусловливаемых трением вследствие движения вязкой среды через извилистые поровые каналы и 2) силами инерции, особенно проявляющимися при турбулентных потоках.

Подставляя в уравнение (XVIII.11)  $W_0 = W/\varepsilon$  и значение  $d_k$  из уравнения (XVIII.4), получим

$$\Delta p = \lambda \frac{H}{d} \frac{W^2}{2} \rho \frac{3(1-\varepsilon)}{2\varepsilon^3}. \quad (\text{XVIII.14})$$

Заменив в уравнении (XVIII.14) величину  $\lambda$  выражением (XVIII.13), в котором значение  $Re$  определяют из уравнения (XVIII.10), после соответствующих преобразований получим:

$$\Delta p / H = \frac{9A(1-\varepsilon)^2}{8\varepsilon^3} \frac{W\mu}{d^2} + \frac{3B(1-\varepsilon)}{4\varepsilon^3} \frac{W^2\rho}{d}.$$

При  $A = 134$  и  $B = 2,34$  получаем расчетное уравнение, предложенное Эргуном, которое хорошо описывает экспериментальные данные различных авторов по сопротивлению в слое и может быть рекомендовано для технических расчетов:

$$\Delta p / H = 150 \frac{(1-\varepsilon)^2}{\varepsilon^3} \frac{W\mu}{d^2} + 1,75 \frac{(1-\varepsilon)}{\varepsilon^3} \frac{W^2\rho}{d}. \quad (\text{XVIII.15})$$

Уравнение (XVIII.15) применимо для ламинарного, переходного и турбулентного режимов и справедливо как для стационарного, так и для движущегося плотного слоя. Для расчета по уравнению (XVIII.15) не требуется предварительного определения характеристики режима.

При выполнении расчетов для движущегося плотного слоя величина  $W$  представляет собой относительную скорость движения:

$$W = W_{\Pi} \pm W_{\tau} \varepsilon, \quad (\text{XVIII.16})$$

где  $W_{\Pi}$  и  $W_{\tau}$  — скорость движения потока газа или жидкости и твердых частиц слоя относительно стенок аппарата;  $\varepsilon$  — порозность движущегося плотного слоя; знак минус соответствует прямоточному движению потока и частиц слоя, знак плюс — их противоточному движению.

Если известен градиент перепада давления в слое  $\Delta p / H$ , то уравнение (XVIII.15) используется для определения скорости потока, а следовательно, и их количества, которое необходимо для обеспечения этого градиента перепада давления. Такая задача возникает, например, при расчете паровых и газовых затворов на установках каталитического крекинга, а также при определении количественного распределения потока паров между различными слоями катализатора и др.

ÄÄÊÆÁÍ ÈÀ Ì Î ÕÎ ÈÄ ÅÄÇÄ (Í ÄÐÎ Ä ÈÈÈ ÆÈÄÊÎ ÇÒÈ)  
 ×ÄÐÄÇ ÄÇÄÄØÁÍ Í ÛÉ ÑÊÎ É ÇÄÐÍ ÈÑÒÎ ÄÎ  
 Ì ÄÒÄÐÈÄÈÄ

При восходящем потоке газа (паров или жидкости) через плотный слой зернистого материала при увеличении скорости потока растет сопротивление слоя и ослабляется взаимное давление частиц. При достижении некоторого критического значения скорости  $W_k$  сопротивление слоя становится равным его весу, частицы перестают оказывать взаимное давление, слой переходит во взвешенное состояние, частицы получают возможность перемещаться в пределах слоя. При дальнейшем увеличении скорости потока  $W > W_k$  расстояние между частицами увеличивается, порозность слоя  $\epsilon$  возрастает, вызывая тем самым снижение скорости потока в поровом канале ( $W_0 = W/\epsilon$ ), а следовательно, и силы, действующей на частицу, до значения, равного ее весу. Тогда восстанавливаются условия состояния взвешенного слоя, но уже при новом, большем значении его порозности  $\epsilon$ .

При дальнейшем увеличении скорости потока слой расширяется. В пределе его расширения порозность слоя стремится к значению  $\varepsilon = 1$ , когда расстояние между частицами становится столь значительным по сравнению с их размерами, что концентрация частиц в данном объеме  $1 - \varepsilon$  будет несоизмеримо мала. Практически пределом существования взвешенного слоя является скорость потока, равная скорости витания данной частицы  $W_b$ ; при скорости выше  $W_b$  поток выносит частицы из слоя и последний прекращает свое существование.

Во взвешенном слое вследствие некоторой неравномерности скорости потока в различных сечениях слоя частицы интенсивно и хаотически перемешиваются внутри слоя. Взвешенный слой зернистого материала называют также кипящим или псевдоожженным слоем. Подобное наименование возникло потому, что взвешенный слой зернистого материала обладает подвижностью, текучестью, вязкостью, способностью к отстаиванию более крупных частиц и другими особенностями, характерными для жидкостей, да и по внешнему виду он похож на кипящую жидкость.

Интенсивное перемешивание частиц во взвешенном слое обуславливает высокую эффективность проходящих процессов: значительно возрастает скорость внешней диффузии, эффективнее протекает теплообмен между потоком и частицами, между частицами и соприкасающейся с ними поверхностью, легко обеспечивается выравнивание температур в большом объеме слоя и т.д.

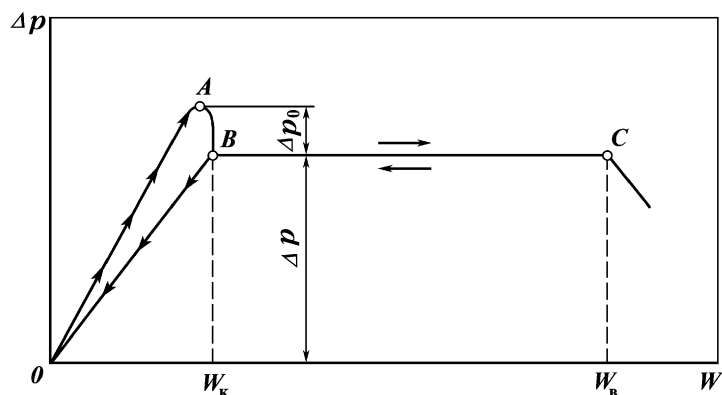
Вместе с тем в связи с интенсивным перемешиванием частиц взвешенному слою свойствен и ряд недостатков, среди которых уменьшение движущей силы процесса, износ твердых частиц, эрозия аппаратуры и др.

При скорости потока, недостаточной для взвешивания частиц, объем слоя, его высота  $H_0$ , а следовательно, и порозность  $\varepsilon_0$  являются неизменными. При скорости, превышающей начало псевдооживления, но недостаточной для выноса частиц из слоя,  $W_{\kappa} < W < W_{\text{в}}$ , его объем, высота  $H$  и порозность  $\varepsilon$  увеличиваются, но при этом в аппарате постоянного сечения остается неизменным соотношение

$$(1 - \varepsilon_0)H_0 = (1 - \varepsilon)H.$$

Для плотного и взвешенного слоев характерна зависимость между

Рис. XVIII-2. Зависимость перепада давления в слое от скорости потока



скоростью оживающего потока и гидравлическим сопротивлением слоя (перепадом давления); принципиальный характер такой «кривой псевдооживления» проиллюстрирован графиком, приведенным на рис. XVIII-2. Левая часть графика, представленная линиями  $OA$  и  $OB$ , соответствует движению оживающего агента через неподвижный слой, когда с увеличением скорости потока сопротивление слоя растет. В точке  $B$  сопротивление слоя оказывается равным его весу и слой переходит во взвешенное состояние; соответствующее этой точке значение скорости называют *критической скоростью*  $W_k$  или *скоростью начала псевдооживления*. Перепад давления в точке  $A$  перед началом псевдооживления превышает вес слоя на величину «пика давления»  $\Delta p_0$ , затрачиваемую потоком на преодоление сил сцепления между частицами. Величина  $\Delta p_0$  зависит от плотности упаковки частиц, формы и состояния их поверхности.

При дальнейшем увеличении скорости потока перепад давления в слое остается неизменным, и линия «кривой псевдооживления» идет параллельно оси абсцисс. Постоянство значения перепада давления в слое (участок  $BC$ ) характеризуется равенством гидродинамического давления и веса слоя, приходящегося на единицу площади его поперечного сечения, и сохраняется до значения  $W_b$ , соответствующего *скорости витания*, выше которой частицы уносятся из слоя и наступает *режим пневмотранспорта*. В этом случае масса частиц в слое уменьшается и, следовательно, снижается гидравлическое сопротивление слоя.

Плотному слою на графике соответствуют линии  $OA$  и  $OB$ . Линия  $OA$  получена при постепенном увеличении скорости газа и соответствует перепаду давления в плотном слое, когда частицы слоя характеризуются первоначальной, более плотной упаковкой и меньшей порозностью. Линия  $OB$  соответствует перепаду давления в плотном слое, который образуется в результате постепенного снижения скорости потока при переходе от взвешенного слоя к плотному.

Перепад давления, соответствующий весу слоя, приходящегося на единицу площади его поперечного сечения, равен

$$\Delta p = H_0 g (\rho_t - \rho) (1 - \varepsilon_0),$$

где  $\rho_t$  и  $\rho$  — соответственно плотность твердых частиц и потока.



Зная вес слоя  $H_0 g (\rho_t - \rho) (1 - \varepsilon_0)$  и используя уравнение (XVIII.14), можно определить критическую скорость начала псевдооживления  $W_k$ .

Выражение для  $W_k$  зависит от того, какое значение  $\lambda$  принято в уравнении (XVIII.14) при определении  $\Delta p$  — по уравнению (XVIII.12) или (XVIII.13); этим во многом объясняются различия в окончательном уравнении для определения  $W_k$ , с которыми приходится сталкиваться при изучении специальной литературы.

Приняв, как это предложено О.М. Тодесом, для  $\Delta p$  расчетное уравнение (XVIII.15), запишем:

$$H_0 g (\rho_t - \rho) (1 - \varepsilon_0) = \left[ 150 \frac{(1 - \varepsilon_0)^2}{\varepsilon_0^3} \frac{W_k \mu}{d^2} + 1,75 \frac{(1 - \varepsilon_0)}{\varepsilon_0^3} \frac{W_k^2 \rho}{d} \right] H_0.$$

После преобразований получим уравнение для определения критической скорости начала псевдооживления

$$Re_k = \frac{Ar}{150 \frac{1 - \varepsilon_0}{\varepsilon_0^3} + \sqrt{1,75 \frac{1 - \varepsilon_0}{\varepsilon_0^3} \sqrt{Ar}}}, \quad (XVIII.17)$$

где  $Re_k = W_k d \rho / \mu$  — критерий Рейнольдса, соответствующий скорости  $W_k$  — начала псевдооживления;  $Ar = g d^3 (\rho_t - \rho) \rho / \mu^2$  — критерий Архимеда.

При беспорядочной засыпке слоя значение его порозности  $\varepsilon_0$  лежит в пределах от 0,35 до 0,45, и в среднем можно принять, что  $\varepsilon_0 = 0,4$ ; тогда уравнение (XVIII.17) запишем в виде

$$Re_k = \frac{Ar}{1400 + 5,22 \sqrt{Ar}}. \quad (XVIII.18)$$

Для определения скорости потока  $W$ , необходимой для достижения порозности слоя  $\varepsilon$ , наиболее удачной является формула О.М. Тодеса, В.Д. Горошко и Р.Б. Розенбаума, справедливая для ламинарного, переходного и турбулентного режимов:

$$Re = \frac{Ar \varepsilon^{4,75}}{18 + 0,61 \sqrt{Ar \varepsilon^{4,75}}}. \quad (XVIII.19)$$

При  $\varepsilon_0 = 0,4$  эта формула совпадает с уравнением (XVIII.18). Это же уравнение, решенное относительно  $\varepsilon$ , позволяет определить порозность взвешенного слоя при выбранном гидродинамическом режиме:

$$\varepsilon = \left[ \frac{18 Re + 0,36 Re^2}{Ar} \right]^{0,21}. \quad (XVIII.20)$$

Для гидродинамической характеристики псевдооживленного слоя часто используют понятие «число псевдооживления», которое представляет собой

отношение скорости потока при данной степени псевдоожижения  $W$  к критической скорости начала псевдоожижения  $W_k$ , т.е.  $K = W/W_k$ .

При  $\varepsilon = 1$ , что практически соответствует одиночной частице или весьма малой концентрации частиц в потоке, уравнение (XVIII.19) приобретает вид

$$Re_b = \frac{Ar}{18 + 0,61\sqrt{Ar}}. \quad (XVIII.21)$$

Это уравнение и рекомендуется в промышленной практике для определения скорости витания частиц  $W_b$ .

Для слоя, состоящего из частиц одинакового диаметра  $d$ , взвешенный (псевдоожиженный) слой может существовать при скорости потока  $W$ , находящейся в пределах  $W_k < W < W_b$ . Сопоставляя уравнения (XVIII.18) и (XVIII.21), получим

$$\frac{W_b}{W_k} = \frac{Re_b}{Re_k} = \frac{1400 + 5,22\sqrt{Ar}}{18 + 0,61\sqrt{Ar}}.$$

Тогда для очень мелких частиц (при малых критериях  $Ar$ )  $W_b/W_k \approx 1400/18 \approx 78$ , для крупных частиц (при больших критериях  $Ar$ )  $W_b/W_k \approx 5,22/0,61 \approx 8,6$ .

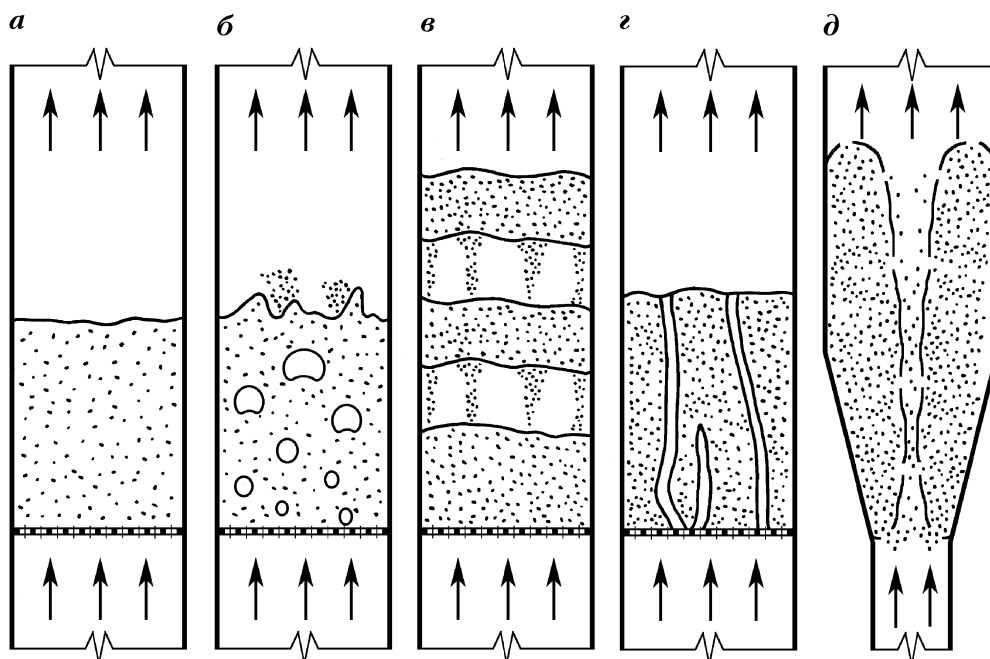
В промышленных условиях псевдоожиженный слой обычно состоит из частиц различного размера. Это объясняется трудностью изготовления частиц строго одинакового размера, истиранием или обрастанием (процесс непрерывного коксования) частиц с течением времени, а также необходимостью обеспечить более однородное псевдоожижение и другими причинами. Например, практика эксплуатации установок каталитического крекинга с псевдоожиженным слоем катализатора показала, что фракция катализатора должна быть широкой по гранулометрическому составу и содержать некоторое количество мелких частиц, способствующих более однородному псевдоожижению и предохраняющих более крупные частицы от истирания (мелкие частицы изолируют крупные частицы одну от другой).

Различие в размерах частиц, входящих в состав полидисперсного слоя, оказывает влияние на порозность слоя, режим псевдоожижения, однородность слоя и др. Такой слой может иметь меньшую порозность благодаря более плотной упаковке частиц и возможности размещения мелких частиц в каналах между крупными частицами. При псевдоожижении полидисперсного слоя скорость потока может оказаться недостаточной для взвешивания крупных частиц и значительно превысит скорость витания мелких, которые при этом выносятся из слоя. Для таких полидисперсных систем характерным показателем является диапазон изменения размеров частиц измеряемый отношением  $d_{max}/d_{min}$ . Существенную роль играет также гранулометрический состав слоя — сравнительно невысокая концентрация относительно крупных частиц допустима, особенно при наличии относительно мелких частиц.

Гидродинамические расчеты с использованием уравнений (XVIII.17) — (XVIII.20) для полидисперсного слоя затрудняет выбор расчетного диаметра частиц, учитывающего различие формы и размеров частиц и гранулометрический состав слоя. Неправильный выбор расчетного диаметра частицы может явиться источником значительных ошибок. Высокую точность расчетов можно получить, если эквивалентный расчетный диаметр частицы полидисперсного слоя определять экспериментально. Для этого со слоем данного материала необходимо провести хотя бы один опыт и определить скорость начала псевдоожижения и порозность неподвижного слоя, а затем из уравнения (XVIII.17) вычислить средний диаметр частиц, который и использовать для всех расчетов. При отсутствии экспериментальных данных средний диаметр частицы полидисперсного слоя следует находить при помощи уравнений (XVIII.6) и (XVIII.7).

Эффективность процессов, протекающих в псевдоожиженном слое, зависит от степени однородности слоя, т.е. от постоянства порозности (плотности) слоя в различных его частях при данном режиме. При взвешивании жидкостью слой практически всегда является однородным, в паровой же или газовой среде в слое наблюдается большая или меньшая неоднородность, которая проявляется в виде проскоков газовых пузырей через слой.

На рис. XVIII-3 схематически представлены основные разновидности



**Рис. XVIII-3. Разновидности псевдоожиженных систем:**  
*а* — однородный взвешенный слой; *б* — слой с барботажем пузырей; *в* — слой с поршнеобразованием; *г* — слой с каналообразованием; *д* — фонтанирующий слой

псевдоожиженных систем: однородный взвешенный слой (XVIII-3, *а*), с барботажем пузырей (XVIII-3, *б*), с поршнеобразованием (XVIII-3, *в*), с каналообразованием (XVIII-3, *г*), фонтанирующий слой (XVIII-3, *д*). Причины, обуславливающие неоднородность слоя, изучены еще недостаточно, а факторы, влияющие на его возникновение, многочисленны. Неоднородность псевдоожиженного слоя приводит к вибрации и повышенному износу стенок аппарата. При этом значительно ухудшается контакт оживающего агента с частицами, снижается эффективность массо- и теплопередачи, увеличивается унос частиц из слоя.

На характер псевдоожижения и структуру слоя оказывают влияние технологические (физические свойства оживающей среды, плотность твердых частиц, скорость оживающего агента, пульсации потока) и конструктивные (высота и диаметр слоя, форма аппарата и т.п.) параметры. Отмечено, например, что для данного газа повышение давления, обусловленное увеличением его плотности, приводит к улучшению однородности слоя и уменьшению уноса частиц из слоя.

При выборе гидродинамического режима работы аппарата необходимо учитывать вынос частиц из слоя. В большинстве случаев желательно, чтобы вынос частиц был минимальным, так как это облегчает работу пылеулавливающих устройств (например, циклонов, электрофильтров), сокращает потери и т.д. Однако в некоторых случаях, например в реакторах установок непрерывного коксования на порошкообразном коксе, стремятся к обратному, т.е. к тому, чтобы вынос частиц из слоя был сравнительно

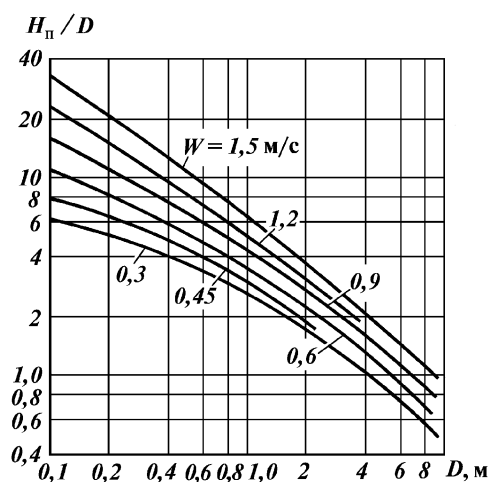


Рис. XVIII-4. График для определения сепарационного пространства  $H_{\text{п}}$

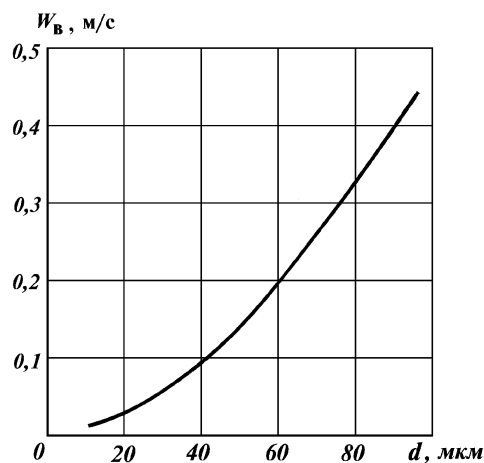


Рис. XVIII-5. График для определения скорости витания частиц естественного алюмосиликатного катализатора в потоке воздуха

высоким, поскольку таким путем удастся предохранить входные отверстия циклонов, установленных в реакторе, от закоксовывания.

Согласно исследованиям Зенца и Уайля, над слоем в пределах определенной высоты сепарационного пространства  $H_{\text{п}}$  вследствие разрушения газовых пузырей при выходе их из слоя эпюра скоростей потока является переменной и пульсирующей, поэтому в пределах этой высоты значительно влияние скорости потока на унос частиц из слоя. На высоте  $H > H_{\text{п}}$  скорость газового потока по сечению выравнивается, что ведет к снижению уноса частиц потоком газа.

Для количественного определения величины уноса частиц газом используется формула

$$\frac{G_{\text{т}}}{G_{\text{г}}} 10^2 = A \frac{W^4 C^{0,5} H_0^{0,35}}{d^{3,5} H^n \varphi} m_{\omega}^4, \quad (\text{XVIII.22})$$

где  $(G_{\text{т}}/G_{\text{г}})10^2$  — относительное количество частиц, унесенных потоком газа, % (масс.) на газ;  $W$  — скорость газа в свободном сечении аппарата, м/с;  $C$  — концентрация в слое мелких частиц, скорость витания которых равна или меньше  $W$ , %;  $H_0$  — высота слоя, мм;  $d$  — среднемассовый диаметр мелких частиц в слое, мм (значение  $d$  определяется по формуле  $d = \sum d_i x_i$ );  $H$  — высота сепарационного пространства (расстояние от уровня слоя до сечения ввода газа в циклоны), мм;  $\varphi$  — доля площади отверстий распределительной решетки, обычно эта величина составляет  $0,01 \div 0,05$ ;  $m_{\omega}$  — поправочный коэффициент, учитывающий физические свойства системы газ — твердое тело.

Численные значения величин  $A$  и  $n$  зависят от высоты сепарационного пространства.

Высоту  $H_{\pi}$  можно определить по графику (рис. XVIII-4) в зависимости от скорости потока  $W$  и диаметра аппарата  $D$ .

При высоте сепарационного пространства  $H \leq H_{\pi}$   $A = 10^{11}$  и  $n = 1$ , при  $H > H_{\pi}$   $A = 3,35 \cdot 10^7$ ,  $n = 0,273$ .

Уравнение (XVIII.22) получено на основании экспериментальных данных с использованием системы воздух — естественный алюмосиликатный катализатор; для перехода к другим системам используется коэффициент  $m_{\omega}$ , который определяется из приближенного уравнения

$$m_{\omega} \approx W'_B / W_B,$$

где  $W'_B$  — скорость витания частиц естественного алюмосиликатного катализатора плотностью  $2080 \text{ кг/м}^3$  в потоке воздуха при температуре  $20^\circ \text{C}$  и давлении  $0,101 \text{ МПа}$  (рис. XVIII-5);  $W_B$  — скорость витания частиц того же диаметра данного материала в потоке газа при рабочих условиях.

#### ДЛЯ ЭТОГО НЕОБХОДИМО

Если скорость движения потока превышает скорость витания частиц, то последние начинают двигаться в направлении движения потока и система достигает режима пневмотранспорта. Скорость движения твердых частиц  $W_T$  при пневмотранспорте меньше скорости движения транспортирующего потока  $W'_\pi$ , который как бы скользит относительно движущейся частицы с относительной скоростью  $W'_c = W'_\pi - W_T$ . Для данного гидродинамического режима восходящий поток пневмоподъемника характеризуется определенным значением порозности  $\epsilon$ , т.е. объемная концентрация транспортируемых частиц в этом потоке составляет  $1 - \epsilon$ . Относя скорость транспортирующего потока  $W'_\pi$  и скорость скольжения  $W'_c$  к полному сечению пневмоподъемника, можно записать:

$$\frac{W_c}{\epsilon} = \frac{W_\pi}{\epsilon} - W_T. \quad (\text{XVIII.23})$$

Как показано работами Тодеса, Горошко и Розенбаума, для режима вертикального пневмотранспорта в общем случае может быть использована зависимость (XVIII.19), полученная для "кипящего" слоя, если критерий Рейнольдса определяются по относительной скорости  $W_c$ , т.е.

$$\text{Re}_c = \frac{\text{Ar}\epsilon^{4,75}}{18 + 0,61\sqrt{\text{Ar}\epsilon^{4,75}}}, \quad (\text{XVIII.24})$$

где

$$\text{Re}_c = W_c dp / \mu.$$

Важнейшим показателем режима пневмотранспорта является *коэффициент взвеси*  $m$ , равный отношению массы транспортируемых твердых частиц  $G_t$  к массе транспортирующего агента  $G$ , т.е. равный числу килограммов частиц, поднимаемых 1 кг транспортирующего агента. Пневмотранспорт может работать при значениях коэффициента взвеси  $m$ , лежащих в сравнительно широких пределах. С увеличением коэффициента  $m$  сокращается расход транспортирующего агента, уменьшается скорость движения потока и частиц, но при этом увеличивается потеря напора вследствие роста концентрации частиц в потоке  $(1 - \varepsilon)$ . Поэтому для каждого конкретного случая выбор значения  $m$  предопределяется многими параметрами: затратами энергии, диаметром пневмоствола, степенью механического износа частиц при транспорте и т.п. При расчете пневмотранспорта используют также величину *подачи*  $\alpha = V_t/V$ , равную отношению объемов частиц  $V_t$  и транспортирующего агента  $V$ . Очевидно, что

$$m = \frac{G_t}{G} = \frac{V_t \rho_t}{V \rho} = \alpha \frac{\rho_t}{\rho},$$

где  $\rho_t$  и  $\rho$  — соответственно плотность твердых частиц и транспортирующего агента.

По отношению ко всему сечению пневмоствола  $F$  транспортируемые частицы занимают долю  $(1 - \varepsilon)$ , поэтому при скорости движения частиц  $W_t$

$$V_t = W_t (1 - \varepsilon) F.$$

Объем же транспортирующего агента  $V = W_{\Pi} F$ , откуда

$$\alpha = \frac{V_t}{V} = \frac{W_t (1 - \varepsilon)}{W_{\Pi}}. \quad (\text{XVIII.25})$$

Совместное решение уравнений (XVIII.23) и (XVIII.25) дает

$$W_{\Pi} = W_c \frac{1 - \varepsilon}{1 - \varepsilon(1 + \alpha)}. \quad (\text{XVIII.26})$$

Умножив левую и правую части уравнения (XVIII.26) на  $d\rho/\mu$ , получим

$$\text{Re}_{\Pi} = \text{Re}_c \frac{1 - \varepsilon}{1 - \varepsilon(1 + \alpha)},$$

где  $\text{Re}_{\Pi}$  и  $\text{Re}_c$  — критерий Рейнольдса, отнесенный соответственно к скорости потока  $W_{\Pi}$  и скорости скольжения  $W_c$ . С учетом уравнения (XVIII.24)

$$\text{Re}_{\Pi} = \frac{1 - \varepsilon}{1 - \varepsilon(1 + \alpha)} \frac{\text{Ar} \varepsilon^{4,75}}{18 + 0,61 \sqrt{\text{Ar} \varepsilon^{4,75}}}. \quad (\text{XVIII.27})$$

Данное уравнение связывает параметры частиц ( $\text{Ar}$ ), потока ( $\text{Re}_{\Pi}$ ), удельного расхода транспортирующего агента ( $\alpha$  или  $m$ ), структуру слоя  $\varepsilon$

и является основным уравнением для гидродинамического расчета пневмотранспорта.

Если заданы  $\alpha$  ( $m$ ), скорость потока  $W_{\Pi}$  ( $Re_{\Pi}$ ) и  $Ag$  ( $d$ ,  $\rho_t$ ), то методом последовательного приближения или при помощи специально построенных номограмм из уравнения (XVIII.27) может быть определена порозность транспортирующего потока  $\varepsilon$ , а следовательно, и концентрация частиц в пневмостволе:

$$\rho_{\Pi} = (1 - \varepsilon)\rho_t + \varepsilon\rho,$$

а при  $\rho_{\Pi} \gg \rho$

$$\rho_{\Pi} \approx (1 - \varepsilon)\rho_t.$$

Расчет пневмотранспорта возможен и в другой последовательности, когда известны  $Ag$ ,  $\alpha$  ( $m$ ), задаются  $\rho_{\Pi}$ , а следовательно, и  $\varepsilon$ , и из уравнения (XVIII.27) определяется  $Re_{\Pi}$  и скорость транспортирующего агента

$$W_{\Pi} = \frac{Re_{\Pi}\mu}{d\rho}.$$

По найденной скорости определяют необходимый диаметр пневмоствола. Скорость движения частиц определяется из уравнения (XVIII.25):

$$W_t = \frac{W_{\Pi}\alpha}{1 - \varepsilon}.$$

Из уравнений (XVIII.24) и (XVIII.21) следует, что при малой концентрации частиц, когда  $\varepsilon \rightarrow 1$ , скорость скольжения  $W_c$  стремится к скорости витания частиц  $W_b$ , а скорость транспортирующего потока  $W_{\Pi} = W_b + W_t$  [уравнение (XVIII.23)], поэтому при пневмотранспорте в сильно разбавленной фазе с достаточным приближением принимают

$$W_{\Pi} = W_b + W_t.$$

При повышении объемной концентрации транспортируемых частиц скорость скольжения  $W_c$  уменьшается. В пределе минимальное значение  $W_c$  соответствует возможной максимальной концентрации транспортируемых частиц, т.е. плотному слою с порозностью  $\varepsilon_0$ . Если  $\varepsilon \rightarrow \varepsilon_0$ , то по уравнению (XVIII.24)  $W_c$  стремится к значению критической скорости начала псевдооживления  $W_k$  [см. (XVIII.17)].

**Общая потеря напора**  $\Delta p$  при пневмотранспорте потока частиц на высоту  $H$  состоит из следующих величин.

*Статический напор*, равный весу столба твердых частиц и транспортирующего агента,

$$\Delta p_{ст} = Hg[1 - \varepsilon)\rho_t + \varepsilon\rho].$$

При использовании в качестве транспортирующего агента газов или паров сравнительно невысокого давления значение  $\rho$  обычно несоизмери-

мо мало по сравнению с  $\rho_T$ , поэтому без заметной погрешности принимают

$$\Delta p_{\text{ст}} = Hg(1 - \varepsilon)\rho_T.$$

*Потери напора на трение транспортирующего агента о стенки пневмоствола* определяются из выражения

$$\Delta p_1 = \lambda_1 \frac{H_1}{D} \frac{W_{\text{п}}^2}{2} \rho,$$

где  $\lambda_1$  — коэффициент гидравлического сопротивления;  $D$  — внутренний диаметр пневмоствола;  $H_1$  — приведенная длина пневмоствола с учетом местных сопротивлений.

*Потеря напора на трение транспортируемых частиц о стенки пневмоствола* равна

$$\Delta p_2 = \lambda_2 \frac{H_1}{D} \frac{W_T^2}{2} \rho_T (1 - \varepsilon), \quad (\text{XVIII.28})$$

где  $\lambda_2$  — коэффициент трения транспортируемых частиц о стенки пневмоствола ( $\lambda_2 \approx 0,05$ ).

*Потерю напора на разгон транспортируемого материала* находят из выражения

$$\Delta p_3 = \frac{4G_T W_T}{\pi D^2 g},$$

где  $G_T$  — количество транспортируемого материала, кг/с.

Таким образом,

$$\Delta p = \Delta p_{\text{ст}} + \Delta p_1 + \Delta p_2 + \Delta p_3.$$

Во многих случаях основную часть сопротивления составляет  $\Delta p_{\text{ст}}$ .

ÀÈÄÐÎ ÄÈÍ ÀÌ ÈÈÀ ÑÒÎ ВÊÎ Â, ÇÀÐÂÎ ÐÎ Â,  
ÐÀÑÎ ÐÀÄÄÈÈÐÂËÛÎ ÛÕ ÐÂØÂÎ È

При нисходящем движении мелкозернистого материала по трубопроводу (стояку) для обеспечения большей текучести и создания газового (парового) затвора, предотвращающего попадание среды из одного аппарата в другой, обычно предусматривается подача в трубопровод аэрирующего агента, например водяного пара, инертного газа и др. (рис. XVIII-6).

Правильный выбор гидродинамического режима стояка имеет большое значение для обеспечения нормальной работы технологической установки с циркулирующим в системе зернистым материалом; от выбранного режима зависят также расход аэрирующего агента и поперечные размеры стояка.

Введем следующие обозначения:  $G_T$  — масса движущегося по стояку



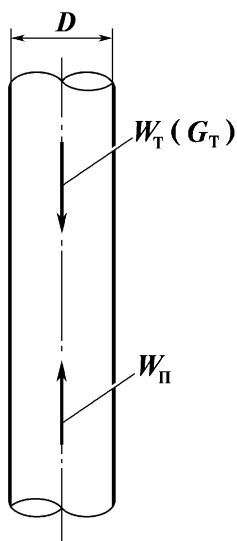


Рис. XVIII-6. Схема к расчету расхода аэрирующего агента в стояках

зернистого материала;  $\varepsilon$  и  $\rho$  — соответственно порозность и плотность слоя в стояке;  $W_{\Pi}$  — линейная скорость газового (парового) потока, поднимающегося вверх по стояку, отнесенная к полному сечению стояка;  $W_T$  — скорость движения твердой частицы.

Учитывая противоточное движение газа и частиц, скорость скольжения восходящего потока, обеспечивающую заданную порозность слоя  $\varepsilon$ , определяется уравнением (XVIII.23), но со знаком плюс:

$$\frac{W_c}{\varepsilon} = \frac{W_{\Pi}}{\varepsilon} + W_T,$$

откуда

$$W_{\Pi} = W_c - \varepsilon W_T. \quad (\text{XVIII.29})$$

Как было показано выше, для обеспечения порозности слоя в стояке  $\varepsilon$ , что соответствует также определенному значению плотности потока  $\rho_n$  [уравнение (XVIII.2)], скорость скольжения должна определяться уравнением

$$\text{Re}_c = \frac{\text{Ar}\varepsilon^{4,75}}{18 + 0,61\sqrt{\text{Ar}\varepsilon^{4,75}}}.$$

Из уравнения (XVIII.29) следует, что при неизменных прочих условиях скорость восходящего потока газа  $W_{\Pi}$  зависит от скорости движения частиц  $W_T$ , т.е. при данном расходе частиц  $G_T$  — от диаметра стояка  $D$ . Возможен частный случай, когда  $W_{\Pi} = 0$ , тогда  $W_c = \varepsilon W_T$ .

Приняв  $W_c = \varepsilon W_T$ , после подстановки в уравнение (XVIII.24) получим уравнение, из которого можно определить максимальную скорость движения частиц  $W_T$  в стояке:

$$\frac{\varepsilon W_T dp}{\mu} = \frac{A \varepsilon^{4,75}}{18 + 0,61 \sqrt{A \varepsilon^{4,75}}}.$$

Диаметр стояка следует выбирать таким, чтобы скорость движения частиц была несколько меньше этого максимального значения. Так, для установок каталитического крекинга с псевдоожиженным слоем катализатора скорость последнего в стояке рекомендуется выбирать в пределах от 0,6 до 1,0 м/с; при более низких скоростях значительно увеличивается диаметр стояка и наблюдается движение аэрирующего агента снизу вверх. При выбранной скорости  $W_T$  значения  $W_c$  и  $W_n$  определяются из уравнений (XVIII.24) и (XVIII.29).

Аэрирующий агент в количестве  $V$  расходуется также на заполнение свободного объема слоя между частицами. Объемный расход  $V$  аэрирующего агента определяется из соотношения объемов между частицами и самих частиц, т.е.

$$\frac{V \rho_T}{G_T} = \frac{\varepsilon}{1 - \varepsilon}.$$

Подставив значение  $\varepsilon$  из уравнения (XVIII.1) и выполнив преобразования, получим

$$V = \frac{G_T (\rho_T - \rho_n)}{\rho_T (\rho_n - \rho)}.$$

В большинстве случаев плотность аэрирующего агента  $\rho$  в стояке значительно меньше  $\rho_n$  и  $\rho_T$ , поэтому без большой погрешности можно записать:

$$V = \frac{G_T (\rho_T - \rho_n)}{\rho_T \rho_n}.$$

Общий объемный расход аэрирующего агента составит

$$V_0 = V + W_n F,$$

где  $F$  — площадь сечения стояка.

При нисходящем движении зернистого материала со сравнительно крупными гранулами нет необходимости в аэризации стояков, так как такой материал удовлетворительно перемещается и в плотном слое. Водяной пар или инертный газ в такие стояки вводится для обеспечения затвора.

На рис. XVIII-7 приведена схема, соответствующая случаю, когда гранулированный материал перемещается из аппарата с более низким давлением  $p_1$  в аппарат с более высоким давлением  $p_2$ . Высота стояка  $H_c$  в этом случае должна быть такой, чтобы вес столба материала в стояке превышал разность давлений в аппаратах  $p_2 - p_1$  и сопротивление трения при движении материала в стояке  $\Delta p_{тр}$ , т.е.

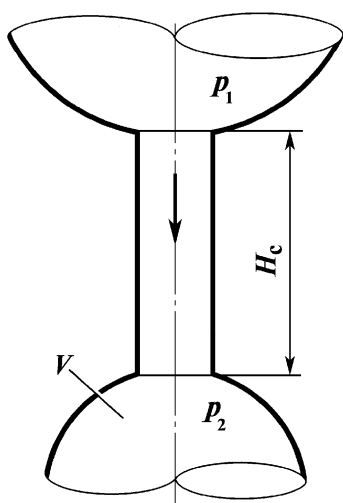
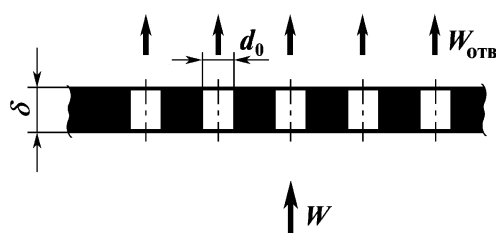


Рис. XVIII-7. Схема к расчету высоты стояков

Рис. XVIII-8. Схема газораспределительной решетки провального типа с круглыми отверстиями



$$H_c = k \frac{p_2 - p_1 + \Delta p_{тр}}{\rho_n g},$$

где  $k$  — коэффициент запаса ( $k=1,2+1,3$ );  $\rho_n$  — плотность потока.

Сопротивление  $\Delta p_{тр}$  определяется по уравнению (XVIII.28). Сопротивление, обусловленное трением газа (паров) о стенки стояка, мало, и им можно пренебречь.

Для создания затвора газ (пар) должен быть подан в стояк в таком количестве, чтобы его поток навстречу движущемуся гранулированному материалу обеспечил потерю напора по высоте стояка  $H$ , равную  $p_2 - p_1$ . Для определения расхода пара из уравнения (XVIII.15) рассчитывается относительная скорость  $W$ , а затем из уравнения (XVIII.16) — скорость восходящего потока газа  $W_n$ ; расход газа при этом будет равен

$$V = F W_n.$$

В аппаратах с кипящим слоем зернистого материала равномерность распределения оживающего агента по его сечению и эффективность контакта фаз в значительной степени зависят от конструкции газораспределительного устройства и гидродинамических условий его работы. Особенно это важно для псевдооживленного слоя относительно небольшой высоты. Обычно применяют газораспределительные устройства двух типов: провальные и беспровальные.

**Провальные газораспределительные решетки** представляют собой перфорированные полотна с отверстиями круглой (рис. XVIII-8) или прямоугольной формы, через которые при недостаточно высокой скорости газа зернистый материал может сыпаться в пространство под решеткой.

При малых скоростях газа в отверстиях  $W_{отв}$  в прилегающем к решетке объеме кипящего слоя образуются пузыри. С увеличением скорости газа на выходе из отверстий образуются факелы, которые распространя-

ются на большую или меньшую высоту слоя. Длина факела должна быть меньше высоты кипящего слоя.

Для плоских решеток провального типа важно определить скорость в отверстиях  $W_{\text{оп}}$ , при которой прекратится провал материала через отверстия. Прекращение провала является одновременно признаком равномерного распределения газа по сечению решетки. Величину  $W_{\text{оп}}$  определяют из выражения

$$\text{Re}_{\text{оп}} = \frac{\text{Ar}}{0,61\sqrt{\text{Ar} - 6}},$$

где  $\text{Re}_{\text{оп}} = W_{\text{оп}} d_{\text{max}} \rho / \mu$  — критерий Рейнольдса, соответствующий скорости  $W_{\text{оп}}$  — начала беспровальной работы решетки;  $\text{Ar} = g d_{\text{max}}^3 (\rho_{\text{т}} - \rho) \rho / \mu^2$  — критерий Архимеда.

При определении  $\text{Re}_{\text{оп}}$  и  $\text{Ar}$  используется  $d_{\text{max}}$ , характеризующий максимальный диаметр твердых частиц.

Для обеспечения беспровальной работы решетки скорость газа в ее отверстиях можно определять также из уравнения

$$W_{\text{оп}} = 100 \sqrt{\frac{d_{\text{max}} (\rho_{\text{н}} - \rho) g}{\rho}},$$

где  $\rho$  и  $\rho_{\text{н}}$  — соответственно плотность газа и насыпная плотность слоя.

Гидравлическое сопротивление решетки при прохождении через нее газа можно вычислить по уравнению

$$\Delta p_{\text{р}} = 0,5 \frac{1 - \varphi^2}{C^2} W_{\text{отв}}^2 \rho, \quad (\text{XVIII.30})$$

где  $W_{\text{отв}}$  — скорость газа в отверстиях решетки, м/с;  $\varphi$  — доля площади решетки, приходящаяся на отверстия;  $\rho$  — плотность газа, кг/м<sup>3</sup>;  $C$  — коэффициент сопротивления, зависящий от отношения диаметра отверстий решетки  $d_0$  к ее толщине  $\delta$  и определяемый по графику (рис. XVIII-9).

Чем больше сопротивление решетки, тем равномернее газ распределяется по отверстиям. Обычно сопротивление решетки равно сопротивлению псевдоожиженного слоя или несколько меньше его.

Сопротивление решеток можно рассчитывать также по известному уравнению гидравлики

$$\Delta p_{\text{р}} = \xi \frac{W_{\text{отв}}^2 \rho}{2},$$

где  $\xi$  — коэффициент гидравлического сопротивления решетки по газовой фазе, определяется в зависимости от ее геометрических параметров по одной из формул:

$$\text{для тонких решеток при } \frac{\delta}{d_0} \leq 0,4$$

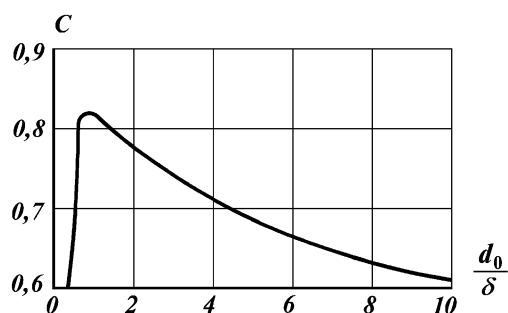


Рис. XVIII-9. График для определения коэффициента сопротивления в уравнении (XVIII.30)

$$\xi = \left( \frac{1}{\beta} - \varphi \right)^2;$$

для решеток с  $0,4 < \frac{\delta}{d_0} < 4,0$

$$\xi = \left( \frac{1}{\beta} - \frac{1}{\chi} \right)^2 + \left( \frac{1}{\chi} - \varphi \right)^2;$$

для решеток с  $\frac{\delta}{d_0} = 4,0$

$$\xi = \left( \frac{1}{\beta} - 1 \right)^2 + (1 - \varphi)^2;$$

для толстых решеток при  $\frac{\delta}{d_0} > 4,0$

$$\xi = \left( \frac{1}{\beta} - 1 \right)^2 + \lambda \frac{\delta - 4d_0}{d_0} + (1 - \varphi)^2,$$

где  $\beta$  — коэффициент сужения потока в узком сечении струи,

$$\beta = \frac{1}{1 + (1 - \varphi) \sqrt{\frac{0,5 + \varphi}{1 + \varphi}}};$$

$\chi$  — коэффициент выхода струи из отверстия,

$$\chi = \beta + (1 - \beta) \operatorname{th} \left( \frac{\delta}{d_0} - 0,4 \right);$$

$\lambda$  — коэффициент трения для гладких труб.

Приведенные выше формулы для расчета гидравлического сопротивления решетки действительны при движении незапыленного потока газа. Однако в некоторых реакторных аппаратах через отверстия решетки проходит поток газа вместе с твердыми частицами, что увеличивает гидравлическое сопротивление.

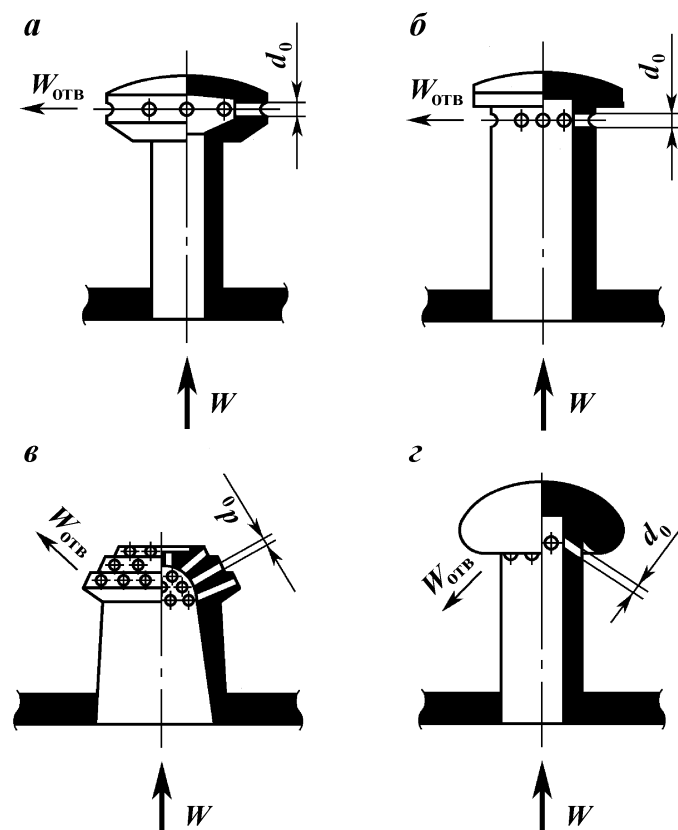


Рис. XVIII-10. Некоторые типы колпачков непровальных газораспределительных решеток:  
*a, б* — с горизонтальным расположением отверстий; *в, г* — с наклонным расположением  
отверстий снизу вверх; *г* — то же сверху вниз

Для расчета гидравлического сопротивления решетки при прохождении через нее потока газозвеси рекомендуется следующая зависимость:

$$\Delta p_p = \left( \xi + Km \right) \frac{W_{\text{отв}}^2 \rho}{2},$$

где  $\xi$  — коэффициент гидравлического сопротивления решетки по газовой фазе, определяемый по одной из приведенных выше формул;  $m$  — коэффициент взвеси, определяемый как отношение массовых расходов твердой и газовой фаз;  $K$  — коэффициент, зависящий от характеристик твердых частиц и распределительной решетки, определяется по уравнению

$$K = 0,552 d_s^{-0,5} \left( \frac{\delta}{d_0} \right)^{0,4} \left( \frac{\rho}{\rho_T} \right)^{0,2},$$

где  $d_s$  — эквивалентный диаметр частиц, мм.

**Непровальные распределительные решетки** обычно состоят из трубной решетки (плиты), в которой закреплены колпачки той или иной конструкции. В качестве примера на рис. XVIII-10 показаны варианты конструкций колпачков. Площадь поперечного сечения выходных отверстий колпачка меньше, чем площадь входных сечений патрубков, что позволяет создать достаточно большую скорость газа при выходе в слой. Чтобы уменьшить возможность образования пузырей, рекомендуется избегать столкновения газовых струй, выходящих из отверстий смежных колпачков.

Соппротивление колпачковой решетки можно определить по уравнению

$$\Delta p_p = 3,1(1 - \varphi^2)W_{отв}^2 \rho.$$