

НЕПОДВИЖНЫЕ ЗЕРНИСТЫЕ СЛОИ И ПСЕВДООЖИЖЕННЫЕ СЛОИ

В химической промышленности в различных процессах встречается движение жидкостей или газов через неподвижные слои зернистых или кусковых материалов. Например:

- 1) Мельчайшие слои осадка на фильтре
- 2) Частицы катализатора или адсорбента
- 3) Крупные насадочные тела в адсорбционной или ректификационной колоннах

Зернистый слой остается неподвижным только при небольших скоростях жидкостей или газов (Рис.15.1а). Однако, когда скорость достигает некоторой критической величины (скорость начала псевдооживления $v_{кр}$), слой перестаёт быть неподвижным, приобретает текучесть и переходит как бы в кипящее (псевдооживленное) состояние. В таком слое твёрдые частицы интенсивно перемещаются в потоке в различных направлениях (Рис. 15.1б), и весь слой напоминает кипящую жидкость. При дальнейшем увеличении скорости потока высота слоя продолжает возрастать вплоть до того момента, когда скорость достигает нового критического значения (скорость уноса), при котором слой разрушается и твёрдые частицы начинают уноситься потоком (рис 15.1в). Явление массового уноса твёрдых частиц потоком газа называют пневмотранспортом и используют в промышленности для перемещения сыпучих материалов.

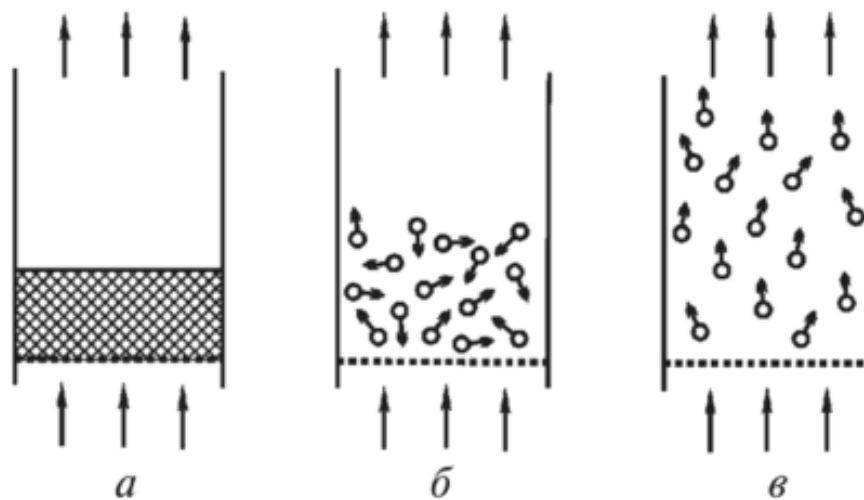


Рис. 15.1. Движение газа (жидкости) через слой твердых частиц:
 а – неподвижный слой; б – кипящий (псевдооживленный) слой;
 в – унос твердых частиц потоком

Состояние зернистого слоя может быть представлено в виде зависимости гидравлического сопротивления слоя ΔP от скорости потока газа или жидкости (сплошной фазы), поступающего снизу под слой (Рис.15.2).

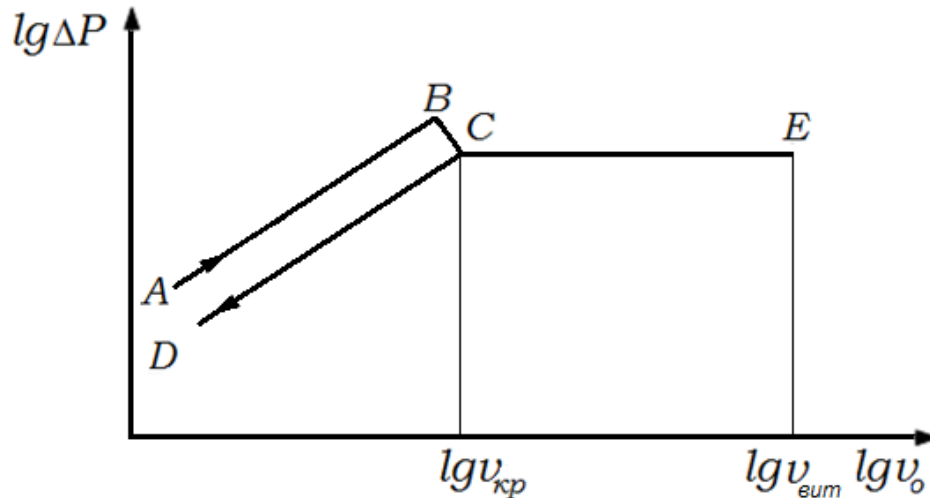


Рис. 15.2. Зависимость гидравлического сопротивления от скорости потока жидкости (или газа) в монодисперсном слое частиц.

По мере возрастания скорости потока сплошной фазы увеличивается гидравлическое сопротивление неподвижного слоя (линия АВ или в обратном направлении линия CD). Начало псевдооживления (при скорости потока v_{kp}) наступает при равенстве силы гидравлического сопротивления слоя весу всех его частиц. Данное 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 свободного витания частиц (или скоростью уноса) и обозначают символом v_{vit} .

При увеличении скорости сплошной фазы более скорости свободного витания v_{vit} возникает режим пневмотранспорта

Гидродинамика неподвижного слоя

Неподвижный зернистый слой широко используется в аппаратах фильтрования, ионного обмена, абсорбции, ректификации, экстракции, абсорбции, при использовании катализаторов в химических процессах и т.д.

При движении жидкости через зернистый слой, сплошная фаза заполняет все пространство между частицами, она одновременно движется внутри каналов неправильной формы, образованными этими частицами и обтекает отдельные частицы. Описание такого движения представляет собой смешанную задачу гидродинамики

Гидравлическое сопротивление зернистого слоя находят по уравнению такого же вида как в гидродинамике.

$$\Delta P = \lambda \cdot \frac{l}{d_s} \cdot \frac{\rho v^2}{2} \quad (15.1)$$

λ — общий коэффициент гидравлического сопротивления слоя. Он отражает как трение, так и местные сопротивления при движении по искривленным каналам.

$l = H_p$ - длина или реальная высота каналов;

d_s - эквивалентный диаметр канала

v — действительная скорость сплошной фазы в каналах слоя.

Свяжем эти параметры с характеристиками зернистого слоя:

a - удельной поверхностью слоя, $\text{м}^2/\text{м}^3$;

ε_0 - порозностью неподвижного слоя (долей свободного объема)

$$\varepsilon_0 = \frac{V_{св}}{V} \quad (15.2)$$

1) Пусть S — поперечное сечение аппарата, H_0 — высота неподвижного слоя

Тогда объем неподвижного слоя V :

$$V = S \cdot H_0 \quad (15.3)$$

Свободный объем неподвижного слоя $V_{св}$, т.е. объем просветов между частицами:

$$V_{св} = S \cdot H_0 \cdot \varepsilon_0 \quad (15.4)$$

Объем, занимаемый частицами:

$$V_i = S \cdot H_0 \cdot (1 - \varepsilon_0) \quad (15.5)$$

Поверхность частиц в слое A равна:

$$A = S \cdot H_0 \cdot a, \quad (15.6)$$

где a – удельная поверхность слоя.

Определим, чему равен эквивалентный диаметр канала слоя d_s .

$$d_s = \frac{4S_k}{\Pi} = \frac{4S\varepsilon_0}{\alpha} \cdot \frac{\alpha}{Sa} = \frac{4\varepsilon_0}{a}$$

где S_k – поверхность каналов слоя, Π – смоченный периметр каналов.

$$S_k = \frac{V_{св}}{H_p} = \frac{SH_0\varepsilon_0}{H_0\alpha} = \frac{S\varepsilon_0}{\alpha} \quad (15.7)$$

где α - параметр учитывающий кривизну каналов, равен отношению реальной длины каналов H_p к высоте слоя H , $\alpha > 1$.

$$\Pi = \frac{A}{H_p} = \frac{SH_0 a}{H_0\alpha} = \frac{Sa}{\alpha} \quad (15.8)$$

$$d_s = \frac{4\varepsilon_0}{a} \quad (15.9)$$

2) Выразим d_s через размер частиц d_u

Пусть в слое n частиц

Объем одной частицы

$$V_u = \frac{\pi d_u^3}{6} = \frac{SH_0(1-\varepsilon_0)}{n} \quad (15.10)$$

Поверхность одной частицы

$$A_u = \frac{\pi d_u^2}{\varphi} = \frac{SH_0 a}{n} \quad (15.11)$$

где φ - фактор формы, равен отношению поверхности шара к поверхности частицы того объема; $\varphi = 1$ для шара, $\varphi = 0,69$ для цилиндра, $\varphi = 0,32$ для диска.

Найдем отношение объема частицы V_u к ее поверхности A_u :

$$\frac{V_u}{A_u} = \frac{SH_0(1-\varepsilon_0)}{n} \cdot \frac{n}{SH_0 a} = \frac{1-\varepsilon_0}{a} = \frac{\pi d_u^3}{6} \cdot \frac{\varphi}{\pi d_u^2} = \frac{d_u \varphi}{6} \quad (15.12)$$

$$a = \frac{6(1-\varepsilon_0)}{\varphi d_u} \quad (15.13)$$

$$d_s = \frac{4\varepsilon}{a} = \frac{4\varepsilon \varphi d_u}{6(1-\varepsilon)}$$

$$d_s = \frac{2\varepsilon\varphi d_u}{3(1-\varepsilon)} \quad (15.13)$$

Для слоёв с небольшой полидисперсностью при расчете следует использовать величины среднего диаметра, определяемого по формуле:

$$d_{cp} = \left(\sum_1^N \frac{x_i}{d_i} \right)^{-1} \quad (15.14)$$

где d_i – диаметр i -й фракции, x_i – массовая доля i -й фракции.

3) Действительная скорость сплошной фазы в зернистом слое v трудно определяемая величина. В практических расчетах вместо нее используют фиктивную скорость сплошной фазы v_0 . Исходя из выражения для объемного расхода $\dot{V} = v_0 \cdot S = v \cdot S \cdot \varepsilon$, получаем соотношение между действительной и фиктивной скоростью:

$$v = \frac{v_0}{\varepsilon_0} \quad (15.15)$$

4) Получим выражение для гидравлического сопротивления зернистого слоя.

Из уравнений (15.3) и (15.4) следует:

Примем $\alpha=1$, тогда

$$H_p = H_0 = l \quad (15.16)$$

Подставим выражения (15.13) и (15.15) в формулу для ΔP (15.1):

$$\Delta P = \lambda \cdot \frac{l \cdot 6(1-\varepsilon_0)}{4\varepsilon_0 \varphi d_u} \cdot \frac{\rho v_0^2}{\varepsilon_0^2 \cdot 2} = \frac{3(1-\varepsilon_0) \cdot H_0}{2 \cdot \varepsilon_0^3 \varphi d_u} \cdot \lambda \frac{\rho v_0^2}{2} \quad (15.17)$$

Критерий Рейнольдса при осаждении может быть выражен через действительную Re или фиктивную скорость Re_0 :

$$Re = \frac{v d \rho}{\mu} = \frac{v_0 \rho}{\varepsilon_0 \mu} \cdot \frac{4\varepsilon_0}{a} = \frac{4v_0 \rho}{\mu} \cdot \frac{1}{a} = \frac{4v_0 \rho}{\mu} \cdot \frac{\varphi d_u}{6(1-\varepsilon_0)} = \frac{4\varphi}{6(1-\varepsilon_0)} \cdot \frac{v_0 d_u \rho}{\mu} = \frac{2\varphi}{3(1-\varepsilon_0)} Re_0$$

$$Re = \frac{2\varphi}{3(1-\varepsilon_0)} Re_0 \quad (15.18)$$

$$Re_0 = \frac{v_0 d_u \rho}{\mu} \quad (15.19)$$

Экспериментально была найдена зависимость коэффициента сопротивления при движении жидкости через неподвижный зернистый слой λ от критерия Рейнольдса Re :

$$\lambda = \frac{133}{Re} + 2,34 \quad (15.20)$$

Уравнение (15.17), записанное с учетом (15.20), называется уравнением Эргуна:

$$\Delta P_{неп} = 150 \frac{(1 - \varepsilon_0)^2}{\varphi^2 \varepsilon_0^3} \frac{H_0}{d_u^2} \mu v_0 + 1,75 \frac{(1 - \varepsilon_0)}{\varphi \varepsilon_0^3} \cdot \frac{H_0}{d_u} \rho v_0^2 \quad (15.21)$$

где ΔP – гидравлическое сопротивление неподвижного слоя;

v_0 – фиктивная скорость сплошной фазы;

d_u – диаметр частицы (диаметр эквивалентного шара);

H_0 – высота неподвижного слоя;

ε_0 – порозность неподвижного слоя;

$$\varepsilon_0 = 1 - \frac{\rho_{нас}}{\rho_u} \quad (15.22)$$

$\rho_{нас}$ – насыпная плотность слоя;

ρ_u – плотность частицы;

φ – фактор формы;

ρ – плотность сплошной фазы

μ – динамическая вязкость сплошной фазы.

На Рис.15.3. приведена зависимость высоты слоя от скорости сплошной фазы.

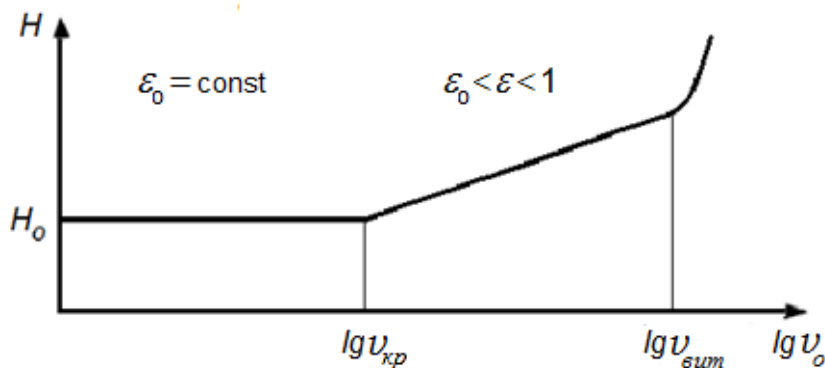


Рис. 15.3. Зависимость высоты слоя от скорости сплошной фазы.

Гидродинамика кипящего (псевдооживленного) слоя

Псевдооживление обладает низким гидравлическим сопротивлением и высоким значением удельной поверхности контакта фаз из-за малого размера дисперсной твердой фазы. Аппараты с кипящим слоем широко используются для перемещения и смешивания сыпучих материалов, для проведения процессов обжига, теплообмена, сушки, адсорбции, каталитических и других процессов.

С увеличением скорости потока промежутки между частицами увеличиваются. Частицы приходят в движение, и образуется кипящий или псевдооживленный слой, т.к. масса мелких твердых частиц в результате непрерывного перемешивания в восходящем потоке жидкости приходит в легкоподвижное состояние, напоминая кипящую жидкость.

При дальнейшем возрастании скорости газа градиент скорости у каждой твердой частицы и силы вязкости, вызываемые этим градиентом, увеличиваются, что приводит к увеличению сечения межзерновых каналов.

Состояние и условия существования взвешенного слоя зависят от скорости восходящего потока газа (или жидкости), а также от физико-химических свойств системы - плотности, вязкости, размеров частиц и т. д.

Гидравлическое сопротивление псевдооживленного слоя постоянно и равно весу частиц, отнесённому к площади поперечного сечения аппарата.

$$\Delta P_{nc} = \frac{m_u g}{S} = \frac{HS(1-\varepsilon) \cdot (\rho_u - \rho)g}{S}$$
$$\Delta P_{nc} = H(1-\varepsilon) \cdot (\rho_u - \rho)g \quad (15.23)$$

Тогда можно записать:

$$H(1-\varepsilon) = H_0(1-\varepsilon_0) \quad (15.24)$$

Скорость сплошной фазы, соответствующая переходу от неподвижного состояния зернистого слоя к псевдооживленному, называется критической или скоростью начала псевдооживления. При этой скорости гидравлическое сопротивление неподвижного слоя равно гидравлическому сопротивлению псевдооживленного слоя.

Для определения скорости начала псевдооживления приравняем ΔP_{nc} (15.21) и ΔP_{nc} (15.23):

$$150 \frac{(1-\varepsilon_0)^2}{\varphi^2 \varepsilon_0^3} \frac{H_0}{d_u^2} \mu v_{кр} p + 1,75 \frac{(1-\varepsilon_0)}{\varphi \varepsilon_0^3} \cdot \frac{H_0}{d_u} \rho v_{кр}^2 = H (1-\varepsilon) \cdot (\rho_u - \rho) g \quad (15.25)$$

После сокращения и с учетом (15.24):

$$150 \frac{(1-\varepsilon_0) \mu v_{кр}}{\varepsilon_0^3 \varphi^2 d_u^2} + 1,75 \frac{v_{кр}^2 \rho}{\varepsilon_0^3 \varphi d_u} = (\rho_u - \rho) g \quad (15.26)$$

Умножим на $d_u^3 \cdot \rho / \mu^2$ и представим уравнение в критериальном виде:

$$150 \frac{(1-\varepsilon_0) v_{кр} d_u \rho}{\varepsilon_0^3 \varphi^2 \mu} + 1,75 \frac{v_{кр}^2 d_u^2 \rho}{\varepsilon_0^3 \varphi \mu^2} = \frac{d_u^3 \rho^2 g}{\mu^2} \cdot \frac{\rho_u - \rho}{\rho} \quad (15.27)$$

$$150 \frac{(1-\varepsilon_0)}{\varepsilon_0^3 \varphi^2} Re_{0кр} + 1,75 \frac{Re_{0кр}^2}{\varepsilon_0^3 \varphi} = Ar \quad (15.28)$$

где $Re_{0кр}$ - критерий Рейнольдса, соответствующий началу псевдооживления:

$$Re_{0кр} = \frac{v_{кр} d_u \rho}{\mu} \quad (15.29)$$

Ar - критерий Архимеда

$$Ar = \frac{d_u^3 \rho^2 g}{\mu^2} \cdot \frac{\rho_u - \rho}{\rho} \quad (15.30)$$

Решением уравнения (15.28) является следующее выражение:

$$Re_{0кр} = \frac{Ar}{1400 + 5,22 \sqrt{Ar}} \quad (15.31)$$

Из уравнений (15.31) и (15.29) можно получить значение скорости начала псевдооживления.

Вторая критическая скорость соответствует наступлению следующего режима - уноса или пневмотранспорта. Эта скорость носит название скорости свободного витания и может быть рассчитана как скорость свободного осаждения частиц. Скорость уноса из полидисперсных слоёв определяется по диаметру наименьших частиц.

Скорость свободного витания наступает при $\varphi = 1$ и рассчитывается с использованием следующих формул:

$$Re_{sum} = \frac{Ar}{18 + 0,575 \sqrt{Ar}} \quad (15.32)$$

$$Re_{0_{\text{взм}}} = \frac{v_{\text{взм}} d_u \rho}{\mu} \quad (15.33)$$

Таким образом, область существования псевдооживленного слоя простирается от скорости начала псевдооживления ($v_{\text{кр}}$) до скорости свободного витания ($v_{\text{взм}}$). Рабочую фиктивную скорость в псевдооживленной области (v_0) задают с помощью числа псевдооживления K_w , характеризующего интенсивность перемешивания слоя:

$$K_w = \frac{v_0}{v_{\text{кр}}} \quad (15.34)$$

В расчете псевдооживления используют следующие формулы для критерия Re_0 , вычисленного через рабочую фиктивную скорость в псевдооживленной области (v_0), и соответствующего значения порозности псевдооживленного слоя ε :

$$Re = \frac{Ar \cdot \varepsilon^{4,75}}{18 + 0,575 \sqrt{Ar \cdot \varepsilon^{4,75}}} \quad (15.35)$$

$$\varepsilon = \left(\frac{18 Re + 0,36 Re^2}{Ar} \right)^{0,21} \quad (15.36)$$

Конструкции аппаратов с псевдооживленным слоем

Сушилка с одноступенчатым аппаратом кипящего слоя:

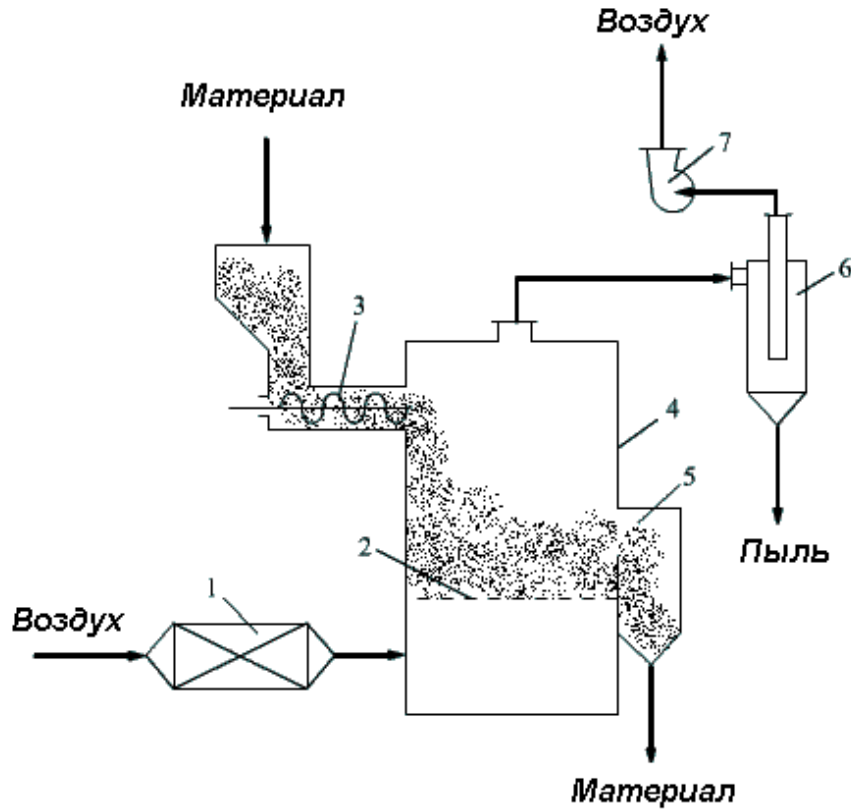


Рис.4. Сушилка с одноступенчатым аппаратом кипящего слоя:

1- калорифер; 2 - распределительная решетка; 3 - шнековый питатель;
4 - корпус сушилки; 5 - разгрузочное устройство; 6 - циклон; 7 - вентилятор.

Достоинства:

Стабильность процесса.

Установка компактна.

Из-за интенсивного перемешивания влажность материала равномерно распределена.

Недостатки:

Нельзя сушить материалы, трудно поддающиеся псевдооживлению (с крупными частицами, очень влажные, слипающиеся).

Большой расход энергии.

Плохое использование теплоты.

Колонный экстрактор с псевдооживленным слоем

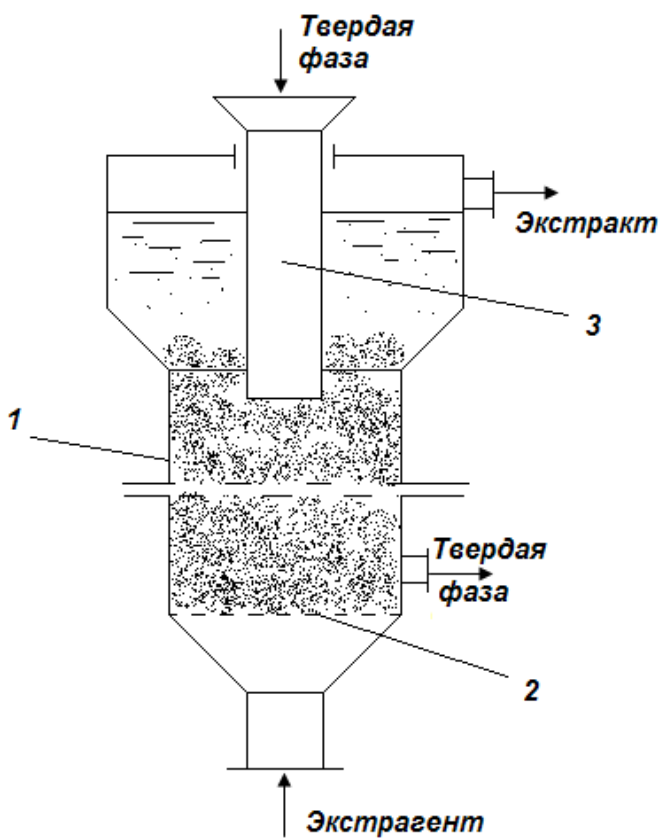


Рис.5. Колонный экстрактор:

1. корпус;
2. распределительная решетка;
3. труба для загрузки твердого материала

Достоинства:

- Высокая (97%) степень насыщения раствора;
- Невысокая стоимость изготовления и эксплуатации;
- Осевший материал может быть легко растворён или выгружен без потерь раствора.

Применение: Используется интенсивного растворения сыпучих материалов.

Многоступенчатый адсорбер с псевдооживленным слоем

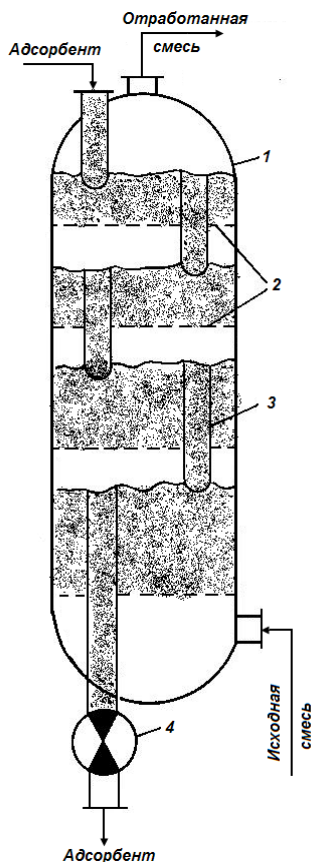


Рис.15.8. Многоступенчатый адсорбер с псевдооживленным слоем:

- 1 - корпус; 2 - распределительные решетки;
- 3 - перегородочная труба; 4 - затвор-регулятор.

Достоинства:

- 1) Турбулизация потока газа интенсифицирует массопередачу в газовой фазе;
- 2) Снижение диффузионное сопротивление в твёрдой фазе из-за малого размера частиц;
- 3) Перемешивание приводит к выравниванию температуры;
- 4) Легко отводить избыток тепла;
- 5) Высокие скорости процесса и большие производительности установок.

Недостатки:

- 1) Сильное истирание частиц адсорбентов в газовых потоках.
- 2) Структура потоков: полное смешение для частиц твёрдой фазы и близкое к полному смешению для сплошной фазы в слое.

Применение. Такие адсорберы применяются, например, для очистки отходящих газов вязкозных производств.