

1.6 Гидродинамика гетерогенных систем

1.6.1 Классификация гетерогенных систем, их роль и место в технологических процессах

В химической технологии перерабатываются вещества как в чистом виде – жидкие, газообразные, твердые, так и в виде разнообразных смесей. При этом простые вещества принято называть фазами или компонентами (газовая фаза, жидкая фаза и т. д.), а сложные смеси – системами из нескольких фаз или компонентов.

В зависимости от состава сложные системы подразделяются на гомогенные и гетерогенные.

Гомогенными называются системы, имеющие во всех своих частях одинаковые свойства (например, плотность, вязкость, теплоемкость и т. д.). К числу гомогенных систем относятся водные растворы кислот, щелочей, спиртов, а также газовые смеси.

Гетерогенные системы являются неоднородными в своем объеме, состоящими из частиц двух или более фаз. Любая гетерогенная система включает сплошную (внешнюю, дисперсионную) фазу и распределенную (внутреннюю, дисперсную). Сплошную фазу принято еще называть несущей средой.

В зависимости от состава системы и состояния фаз различают следующие разновидности гетерогенных систем:

1) суспензии (сплошная фаза – жидкость; распределенная – твердые частицы). В зависимости от размера твердых частиц суспензии делят на:

грубые ($d_{\text{ч}} > 100$ мкм); тонкие ($0,5 < d_{\text{ч}} < 100$ мкм);

мути ($0,1 < d_{\text{ч}} < 0,5$ мкм); коллоидные растворы ($d_{\text{ч}} < 0,1$ мкм).

2) эмульсии (сплошная фаза – жидкость; распределенная – нерастворимая в сплошной фазе жидкость). В зависимости от размера капель распределенной жидкости выделяют устойчивые эмульсии ($d_{\text{к}} < 0,5$ мкм) и расслаивающиеся ($d_{\text{к}} > 0,5$ мкм);

3) пены (сплошная фаза – жидкость, распределенная – газ);

4) пыли и дымы (сплошная фаза – газ, распределенная – твердые частицы). В пыли размер твердых частиц ($5 < d_{\text{ч}} < 100$ мкм), в дыме ($d_{\text{ч}} < 5$ мкм);

5) туманы и газо-капельные взвеси (сплошная фаза – газ, распределенная – жидкость). В туманах размер капель не превышает 3 мкм.

Пыли, дымы, туманы объединяют названием аэрозоли.

В эмульсиях, пенах и газо-капельных взвесах при изменении объемных концентраций фаз и гидродинамической обстановки возможно явление инверсии: когда распределенная фаза становится сплошной, а сплошная –

распределенной. В данных системах также может наблюдаться коалесценция дисперсных частиц: их одновременно протекающие распад и слияние.

В промышленности зачастую диспергируют одну фазу в другой для того, чтобы увеличить скорость протекания процессов (химических, тепловых, массообменных). В результате диспергирования увеличивается поверхность контакта взаимодействующих фаз.

В виде дисперсных систем зачастую получают продукты химических взаимодействий, основные и побочные продукты производства. При этом, возникающие гетерогенные системы, подвергают разделению на окончательной или промежуточных стадиях производства. Разделение дисперсных систем преследует цель не только получения фаз (продуктов) в чистом виде, но и улавливание вредных веществ из выбросов в окружающую среду, а также предотвращение потерь ценных продуктов из-за этих выбросов.

1.6.2 Движение тел в жидкости

Проведение ряда процессов разделения связано с движением твердых частиц в капельных жидкостях или газах (например, осаждение твердых частиц из суспензий и пылей под действием силы тяжести и инерционных сил и др.). Для расчетов процессов разделения гетерогенных систем важнейшую роль играет решение задачи по определению скорости движения твердых тел в жидкости.

При движении тела в жидкости (или при обтекании неподвижного тела движущейся жидкостью), возникает сила сопротивления R , которая направлена в сторону, обратную движению тела. Величина этой силы зависит от режима движения, размеров тела и его формы, свойств жидкости.

Как и при движении жидкости в каналах различают ламинарный и турбулентный режим движения частиц (их обтекания) (см. рис. 6.1).

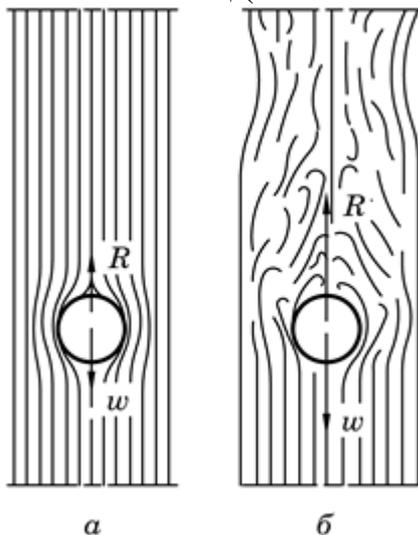


Рис. 6.1 – Схема движения частицы в жидкости при:
а – ламинарном режиме; б – турбулентном режиме

При ламинарном движении поток плавно обтекает частицу (см. рис. 6.1, *а*) и главную роль играют силы сопротивления трения в слое жидкости возле поверхности частицы.

При турбулентном обтекании с тыльной стороны тела образуются вихри (см. рис. 6.1, *б*), скорость движения жидкости в которых велика. Поэтому в этой зоне наблюдается значительное по сравнению с лобовой зоной понижение статического давления, что существенно увеличивает силу сопротивления. Т. е. в турбулентном режиме сопротивление движению тела, обусловленное силами инерции, приобретает решающее значение.

Силу сопротивления среды движению тела R , H , можно определить по формуле:

$$R = \xi S \frac{\rho w^2}{2}, \quad (6.1)$$

где ξ – коэффициент сопротивления тела;

S – площадь его сечения в плоскости, перпендикулярной направлению скорости, m^2 ;

ρ – плотность жидкости, kg/m^3 ;

w – скорость движения тела в жидкости (обтекания тела жидкостью), m/s .

Величина ξ может быть рассчитана по критериальной зависимости вида $\xi = f(Re)$, где Re – число (критерий) Рейнольдса. Значение Re вычисляют по формуле:

$$Re = \frac{w d_{эк} \rho}{\mu}, \quad (6.2)$$

где $d_{эк}$ – эквивалентный диаметр частицы, m ;

μ – динамическая вязкость жидкости, $Pa \cdot s$.

Для сферических частиц эквивалентный диаметр $d_{эк}$ принимают равным диаметру частиц d . Для частиц нешарообразной формы в качестве $d_{эк}$ принимают диаметр эквивалентного шара, имеющего такой же объем, что и данная частица.

Тогда из формулы объема шара

$$d_{эк} = \sqrt[3]{\frac{6V}{\pi}} = \sqrt[3]{\frac{6m}{\pi \rho_ч}}, \quad (6.3)$$

где V – объем частицы нешарообразной формы, m^3 ;

m – масса частицы, kg ;

$\rho_ч$ – плотность материала частицы, kg/m^3 .

Для частиц шарообразной формы экспериментально установлено, что ламинарный режим наблюдается при значениях $Re < 2$, и коэффициент сопротивления определяется по зависимости:

$$\xi = \frac{24}{Re}. \quad (6.4)$$

Для переходной области турбулентного режима ($2 < Re < 500$) коэффициент сопротивления частицы рассчитывается по формуле:

$$\xi = \frac{18,5}{Re^{0,6}}. \quad (6.5)$$

В интервале $500 < Re < 2 \cdot 10^5$ влияние трения вырождается, и зависимость ξ от Re становится автомодельной, т. е. не зависящей от Re . В этой автомодельной области турбулентного режима коэффициент сопротивления имеет постоянное значение:

$$\xi = 0,44. \quad (6.6)$$

При $Re \approx 2 \cdot 10^5$ наступает кризис сопротивления и значение ξ падает в 4÷5 раз (см. рис. 6.2).

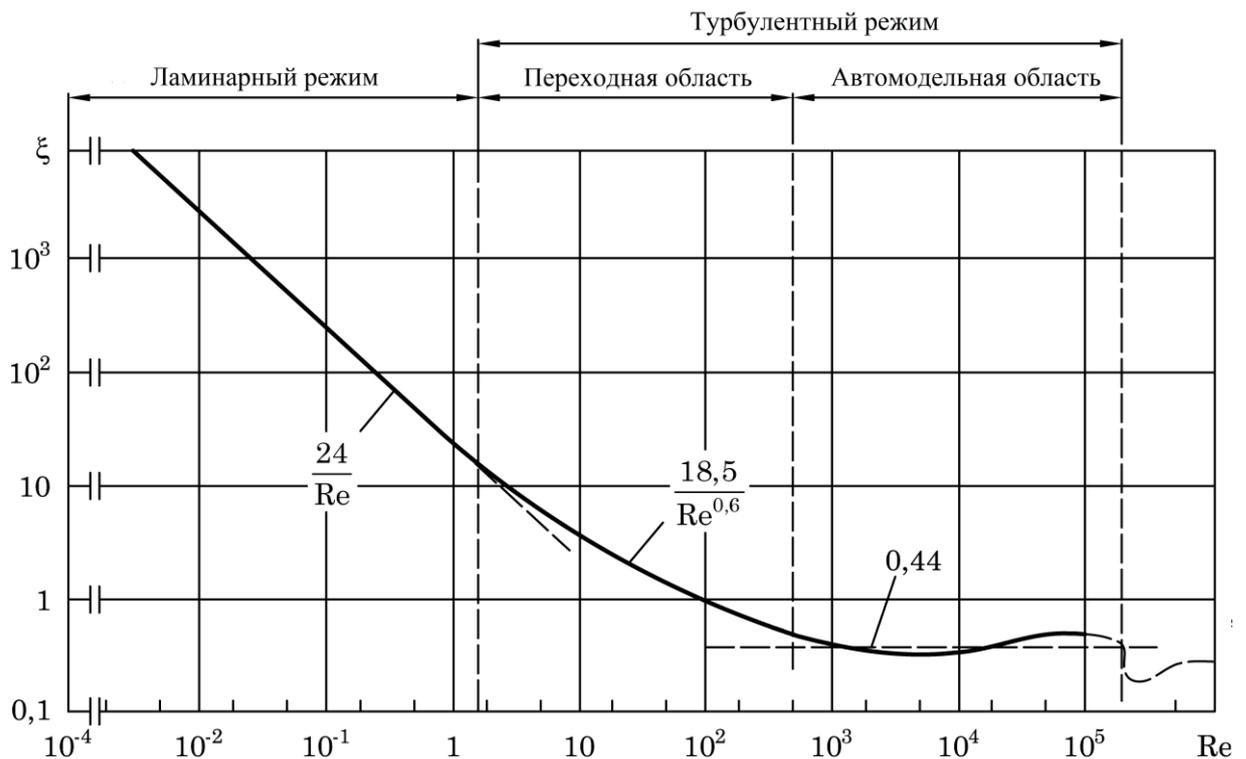


Рис. 6.2 – Зависимость коэффициента сопротивления от числа Рейнольдса для шарообразной частицы

Из анализа формул (6.4)–(6.6) видно, что в ламинарном режиме движения частицы сила сопротивления R пропорциональна скорости ее обтекания в первой степени ($R \sim w$), в переходной области турбулентного

режима – пропорциональна скорости в степени 1,4 ($R \sim w^{1,4}$), а в автомодельной области – квадрату скорости ($R \sim w^2$).

Для тел, отличающихся по форме от шара, значения коэффициента сопротивления ξ больше и зависят дополнительно от фактора формы частицы Φ , который вычисляется следующим образом:

$$\Phi = \frac{F_{\text{ш}}}{F}, \quad (6.7)$$

где $F_{\text{ш}}$ – площадь поверхности шара, имеющего объем, равный объему частицы, м^2 ;

F – площадь поверхность частицы, м^2 .

Таким образом, для некруглых частиц $\xi = f(\text{Re}, \Phi)$. Значения фактора формы определяются опытным путем и приводятся в справочной литературе.

1.6.3 Осаждение частицы под действием силы тяжести

1.6.3.1 Аналитический метод определения скорости осаждения в состоянии динамического равновесия

На частицу, погруженную в жидкость действуют следующие силы (см. рис. 6.3): тяжести G (направлена вниз) и выталкивающая – сила Архимеда A , (направлена вверх).

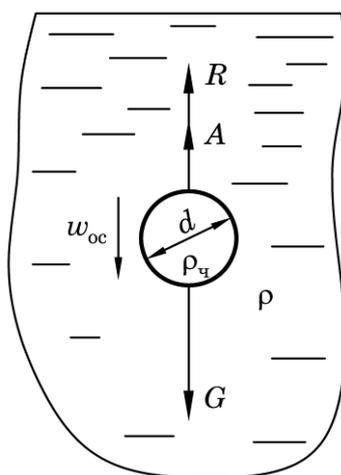


Рис. 6.3 – Силы действующие на тело, которое осаждается в жидкости

Для сферической частицы (тела) можно записать:

$$G = mg = \frac{\pi d^3}{6} \rho_{\text{ч}} g; \quad (6.8)$$

$$A = V \rho g = \frac{\pi d^3}{6} \rho g, \quad (6.9)$$

где m – масса частицы, кг;

g – ускорение силы тяжести, м/с²;

V – объем частицы (объем жидкости, вытесненной частицей), м³.

Если $G < A$ ($\rho_{\text{ч}} < \rho$), то частица всплывает, при $G = A$ ($\rho_{\text{ч}} = \rho$) – плавает. Если же $G > A$ ($\rho_{\text{ч}} > \rho$), то она осаждается, т. е. движется вниз. При движении частицы возникает сила сопротивления среды R , которая направлена против направления скорости w и вычисляется по формуле (6.1):

$$R = \xi \frac{\pi d^2}{4} \frac{\rho w^2}{2}. \quad (6.10)$$

По мере возрастания скорости растет и сила сопротивления. В какой-то момент времени наступит состояние динамического равновесия, для которого справедливо уравнение:

$$G = A + R \quad \text{или} \quad G - A = R. \quad (6.11)$$

С этого момента времени движение частицы станет равномерным, т.е. частица будет двигаться вниз с постоянной скоростью. Эту скорость называют скоростью осаждения $w_{\text{ос}}$.

Баланс сил, действующих на частицу в этом случае можно записать в следующем развернутом виде:

$$\frac{\pi d^3}{6} (\rho_{\text{ч}} - \rho) g = \xi \frac{\pi d^2}{4} \frac{\rho w_{\text{ос}}^2}{2}. \quad (6.12)$$

Отсюда скорость осаждения будет равна

$$w_{\text{ос}} = \sqrt{\frac{4dg(\rho_{\text{ч}} - \rho)}{3\xi\rho}}. \quad (6.13)$$

Для ламинарного режима согласно формуле (6.4)

$$\xi = \frac{24}{\text{Re}} = \frac{24\mu}{w_{\text{ос}}d\rho}. \quad (6.14)$$

После подстановки ξ , представленного выражением (6.14), в уравнение динамического равновесия (6.13) получим формулу Стокса для расчета скорости осаждения частиц в ламинарном режиме:

$$w_{\text{ос}} = \frac{d^2(\rho_{\text{ч}} - \rho)g}{18\mu}. \quad (6.15)$$

Приняв граничное для ламинарного режима осаждения число Рейнольдса $\text{Re} = 2$, можно рассчитать критический (максимальный) размер частиц d_{max} , для которых возможно осаждение в ламинарном режиме:

$$d_{\max} = \sqrt[3]{\frac{36\mu^2}{\rho g(\rho_{\text{ч}} - \rho)}}. \quad (6.16)$$

При $Re < 1 \cdot 10^{-4}$ на скорость осаждения начинает влиять тепловое движение молекул жидкости. Величина скорости в этом случае меньше рассчитанной по формуле Стокса. При некотором критическом размере частиц вследствие теплового движения молекул осаждение их прекращается. Например, пылевые частицы размером менее 0,1 мкм в воздухе практически не осаждаются.

Для переходной области турбулентного режима из уравнения (6.13) с учетом выражения (6.5) скорость осаждения вычисляется по формуле:

$$w_{\text{ос}} = \frac{0,78d^{1,14}(\rho_{\text{ч}} - \rho)^{0,715}}{\rho^{0,285}\mu^{0,43}}. \quad (6.17)$$

Для автомодельной области турбулентного режима ($\xi = 0,44$) скорость осаждения определяется по зависимости:

$$w_{\text{ос}} = 5,46\sqrt{\frac{d(\rho_{\text{ч}} - \rho)}{\rho}}. \quad (6.18)$$

Очевидно, что для расчетов скорости осаждения по формулам (6.15), (6.17) и (6.18) необходимо знать режим осаждения, т. е. значение числа Рейнольдса Re . Однако, не зная $w_{\text{ос}}$, не определить и число Re . Поэтому по приведенным выше зависимостям скорость осаждения определяют методом перебора с последующей проверкой их применимости. Этот метод трудоемок.

1.6.3.2 Метод Лященко для определения скорости осаждения

Лященко П.В. предложил аналитический метод, исключаящий перебор расчетных формул при определении скорости осаждения. Для этого в общее уравнение (6.13) подставляют скорость осаждения выраженное из критерия

Рейнольдса $w_{\text{ос}} = \frac{Re\mu}{d\rho}$ и возводят обе части уравнения в квадрат:

$$\frac{Re^2\mu^2}{d^2\rho^2} = \frac{4}{3} \cdot \frac{dg(\rho_{\text{ч}} - \rho)}{\xi\rho}. \quad (6.19)$$

После перегруппировки получают следующее выражение:

$$Re^2\xi = \frac{4}{3} \cdot \frac{d^3\rho g(\rho_{\text{ч}} - \rho)}{\mu^2}. \quad (6.20)$$

Комплекс размерных физических величин в правой части уравнения является безразмерным, его называют критерием Архимеда Ar :

$$Ar = \frac{d^3 \rho g (\rho_{\text{ч}} - \rho)}{\mu^2}. \quad (6.21)$$

Выражение (6.20) с учетом (6.21) переписывается в следующем виде:

$$Re^2 \xi = \frac{4}{3} Ar. \quad (6.22)$$

Подставив граничные значения Re в уравнение (6.22), определяем, что:

– ламинарный режим осаждения возможен при $Ar < 36$;

– переходная область турбулентного режима существует при $36 < Ar < 83000$;

– автомодельная область турбулентного режима наблюдается при $Ar > 83000$.

Как видно из формулы (6.21), в критерий Архимеда Ar не входит скорость осаждения частиц. Рассчитав значение Ar можно сразу определиться с режимом осаждения и, используя соответствующую формулу (6.15), (6.17) или (6.18), вычислить скорость осаждения w_{oc} .

Если в уравнение (6.22) подставить значения коэффициента ξ для различных режимов осаждения можно получить частные критериальные уравнения взаимосвязи критериев Re и Ar , пригодные для расчета скорости осаждения:

– для ламинарного режима:

$$Re = \frac{Ar}{18}; \quad (6.23)$$

– для переходной области турбулентного режима:

$$Re = 0,152 Ar^{0,715}; \quad (6.24)$$

– для автомодельной области турбулентного режима:

$$Re = 1,74 \sqrt{Ar}. \quad (6.25)$$

Уравнения (6.23) – (6.25) можно интегрировать единой зависимостью для расчета скорости осаждения – формулой Годеса:

$$Re = \frac{Ar}{18 + 0,575 \sqrt{Ar}}. \quad (6.26)$$

При расчете скорости осаждения частиц несферической формы w'_{oc} вводят поправочный коэффициент – коэффициент формы φ :

$$w'_{oc} = \varphi w_{oc}. \quad (6.26)$$

Значение коэффициента меньше единицы и зависит от формы частицы. Для частиц округлой формы $\varphi \approx 0,77$; угловатой – $\varphi \approx 0,66$; игольчатой – $\varphi \approx 0,58$; для пластинчатой – $\varphi \approx 0,43$.

Все приведенные выше зависимости относятся к расчету скорости осаждения одиночных частиц – свободному осаждению. Свободное осаждение – это осаждение, не осложненное наличием в жидкости других частиц, пузырей, инородных капель и других включений, влиянием элементов сосуда, емкости, аппарата на движение частиц.

1.6.3.3 Расчет скорости осаждения по графическим зависимостям $Ly = f(Ar)$ и $Re = f(Ar)$ (диаграмма Лященко)

Для оценки режима осаждения может быть использован также критерий Ly (Лященко) который имеет следующую взаимосвязь с критериями Re и Ar :

$$Ly = \frac{Re^3}{Ar}. \quad (6.27)$$

Используя уравнения (6.2) и (6.21) для расчета соответствующих критериев получим формулу для критерия Лященко:

$$Ly = \frac{w_{ос}^3 \rho^2}{\mu(\rho_ч - \rho)g}. \quad (6.28)$$

Подставив граничные значения критериев Re и Ar в уравнение (6.27), определяем, что:

- ламинарный режим осаждения наблюдается при $Ly < 0,222$;
- переходная область турбулентного режима существует при $0,222 < Ly < 1506$;
- автомодельная область турбулентного режима при $Ly > 1506$.

В формулу критерия Лященко не входит размер частиц d . Поэтому, рассчитав по известной скорости осаждения величину Ly , можно определить режим осаждения, а затем – размер частиц, осаждающихся с данной скоростью.

Удобными для технических расчетов являются графические зависимости $Re = f(Ar)$ и $Ly = f(Ar, \varphi)$ для турбулентного режима осаждения, представленные на так называемой диаграмме Лященко (см. рис. 6.4).

Порядок определения скорости осаждения по диаграмме следующий:

- 1) по известному диаметру частицы d рассчитывают критерий Ar ;
- 2) по графической зависимости $Re = f(Ar)$ или $Ly = f(Ar, \varphi)$, определяют значения Re или Ly ;

3) рассчитывают скорость осаждения w_{oc} по значению Re (формула (6.2)) или Ly (формула (6.28)).

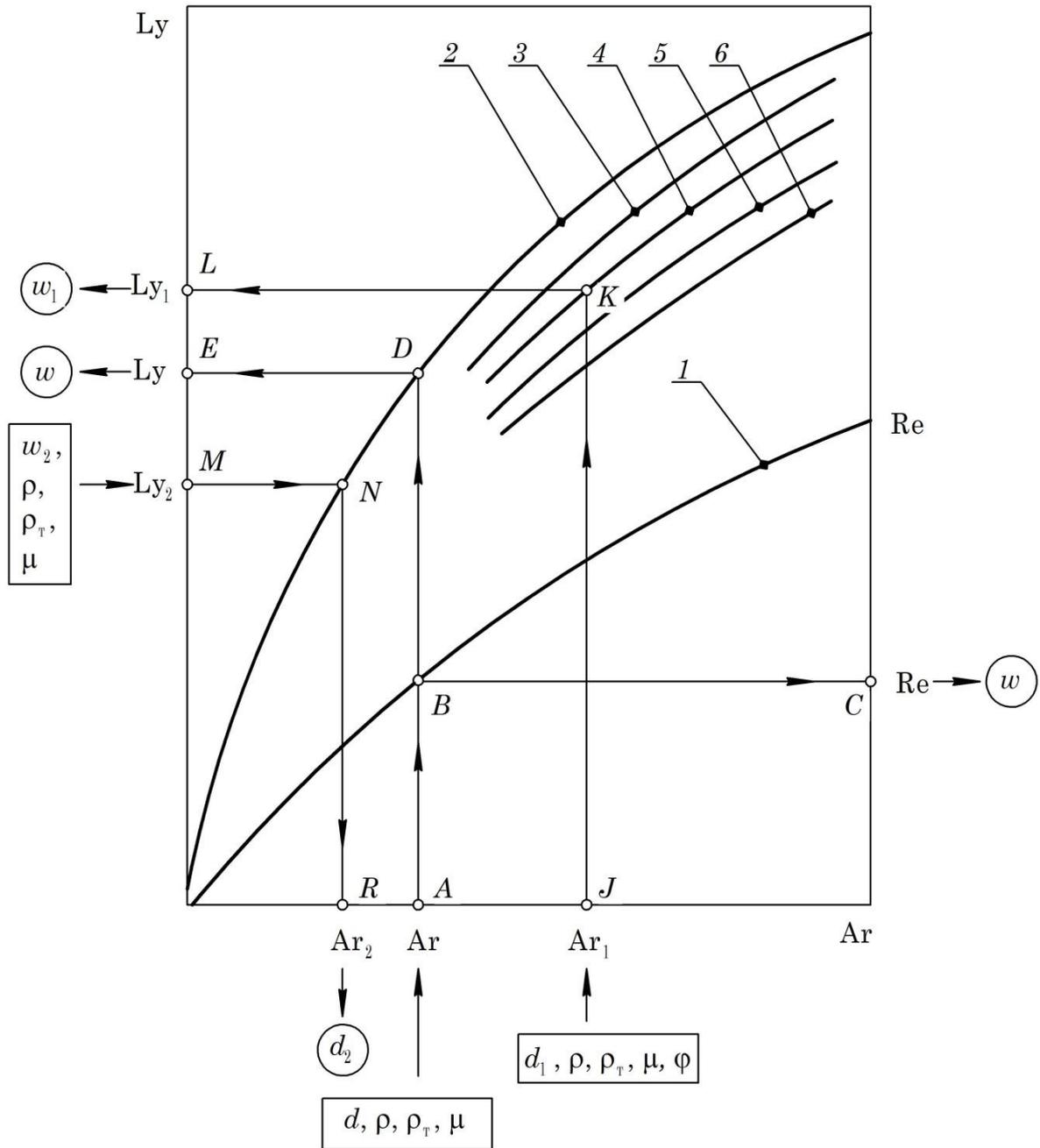


Рис. 6.4 – Диаграмма Лященко

для определения скорости гравитационного осаждения:

1 – $Re = f(Ar)$, сферические частицы; 2–6 – $Ly = f(Ar, \phi)$;

2 – сферические частицы; 3 – округлые частицы; 4 – угловатые частицы;
5 – игольчатые частицы; 6 – пластинчатые частицы

При $Ar < 36$, что соответствует ламинарному режиму, графические зависимости Лященко непригодны. В таком случае скорость осаждения рассчитывают по формуле Стокса (6.15).

С использованием диаграммы Лященко возможно и выполнение обратной задачи – определение размера частиц по скорости их гравитационного осаждения. Для этого выполняют следующие действия:

- 1) по известной скорости осаждения частицы w_2 рассчитывают критерий Lu_2 ;
- 2) по графической зависимости $Lu = f(Ar, \varphi)$, определяют значения Ar_2 ;
- 3) по значению критерия Ar_2 из формулы (6.21) выражают искомый диаметр частиц d_2 .

1.6.3.4 Влияние температуры и давления на скорость осаждения

Влияние температуры и давления на скорость осаждения можно проследить с помощью формулы Стокса (6.15), которая справедлива для ламинарного режима осаждения:

$$w_{oc} = \frac{d^2(\rho_{ч} - \rho)g}{18\mu}.$$

У жидкостей с повышением температуры уменьшается плотность и более существенно вязкость, следовательно, согласно формулы Стокса, скорость осаждения увеличивается. Поэтому разделение суспензий рекомендуется проводить при повышенных температурах.

У газов с повышением температуры плотность уменьшается незначительно, но зато более существенно увеличивается вязкость, следовательно скорость осаждения уменьшается. Т. е. в случае разделения пылегазовых смесей процесс желательно вести при пониженных температурах.

Давление не оказывает существенного влияния на плотность и вязкость жидкостей, следовательно, мало влияет и на w_{oc} . Для газов с ростом давления растет их плотность и незначительно вязкость. В результате w_{oc} снижается, что видно из формулы Стокса.

1.6.4 Методы разделения гетерогенных систем, выбор метода разделения

Известны следующие методы разделения гетерогенных систем:

- осаждение;
- фильтрование;
- центрифугирование;
- мокрая очистка газов.

При осаждении взвешенные частицы (твердые или жидкие), распределенные в жидкости или в газе, отделяются от сплошной фазы под

действием гравитационных (отстаивание), инерционных (в т. ч. центробежных), а также электростатических сил.

Фильтрация – разделение с помощью пористой перегородки, способной пропускать сплошную фазу (газ или жидкость) и задерживать взвешенные (твердые, жидкие) частицы.

Центрифугирование – процесс разделения суспензий и эмульсий в поле центробежных сил по принципам осаждения или фильтрации.

Мокрая очистка газов – процесс улавливания взвешенных в газе частиц жидкостью.

Выбор метода разделения зависит:

- от природы разделяемой системы (суспензия, эмульсия, газокапельная взвесь и т. д.);
- от размера и концентрации взвешенных частиц;
- от разности плотностей сплошной и распределенной фаз;
- от вязкости сплошной фазы;
- от требуемого качества (степени) разделения.

1.6.5 Материальный баланс разделения

Рассмотрим материальный баланс процесса на примере разделения суспензии (см. рис.6.5). На разделение поступает $G_{см}$, кг, суспензии, в результате разделения получают $G_{осв}$, кг, осветленной жидкости и $G_{ос}$, кг, осадка. Массовые концентрации твердой фазы в суспензии, осветленной жидкости и осадке $x_{см}$, $x_{осв}$, $x_{ос}$, кг/кг, соответственно.

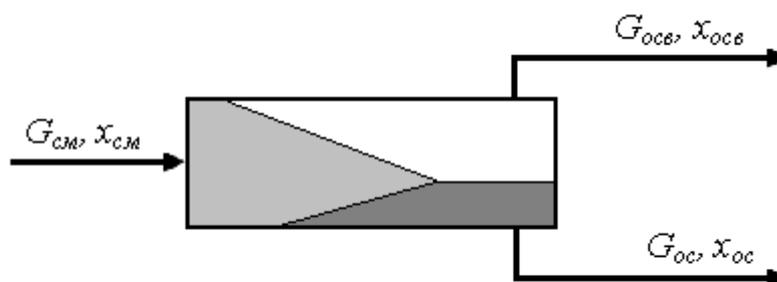


Рис. 6.5 – Схема процесса разделения суспензии

Согласно закону сохранения массы, без учета потерь, можно записать следующие материальные балансы:

– по всему веществу

$$G_{см} = G_{осв} + G_{ос}; \quad (6.29)$$

– по распределенной (твердой) фазе

$$G_{см}x_{см} = G_{осв}x_{осв} + G_{ос}x_{ос}; \quad (6.30)$$

– по сплошной (жидкой) фазе

$$G_{\text{см}}(1 - x_{\text{см}}) = G_{\text{осв}}(1 - x_{\text{осв}}) + G_{\text{ос}}(1 - x_{\text{ос}}). \quad (6.31)$$

Решая систему из двух записанных уравнений (например (6.29) и (6.30)) можно определить расход осветленной жидкости

$$G_{\text{осв}} = G_{\text{см}} \frac{x_{\text{ос}} - x_{\text{см}}}{x_{\text{ос}} - x_{\text{осв}}}. \quad (6.32)$$

Уравнение материального баланса можно также записать через объемные расходы исходной смеси и продуктов разделения, используя объемные ($\text{м}^3/\text{м}^3$) или объемно-массовые ($\text{кг}/\text{м}^3$) концентрации распределенной фазы.

В уравнениях (6.29) – (6.32) при описании непрерывных процессов разделения количества продуктов (кг) заменяются на их расходы (кг/с).

Важнейшим показателем эффективности разделения является степень разделения (улавливания, очистки) η . Используя указанные уравнения материального баланса степень разделения можно определить по формуле:

$$\eta = \frac{G_{\text{ул}}}{G_{\text{вх}}} = \frac{G_{\text{ос}}x_{\text{ос}}}{G_{\text{см}}x_{\text{см}}} = \frac{G_{\text{см}}x_{\text{см}} - G_{\text{осв}}x_{\text{осв}}}{G_{\text{см}}x_{\text{см}}}, \quad (6.33)$$

где $G_{\text{ул}}$ и $G_{\text{вх}}$ – количество (расход) фазы, уловленной (отделенной) в аппарате, и количество (расход) этой же фазы на входе в аппарат соответственно, кг (кг/с).

1.6.6 Отстаивание

Разделение гетерогенных систем за счет гравитационного осаждения взвешенных частиц называется отстаиванием, а аппараты для проведения процесса отстаивания – отстойниками. У отстойников для гравитационной очистки газов от пыли имеется собственное наименование – пылеосадительные камеры.

1.6.6.1 Расчет отстойников

Основной характеристикой процесса отстаивания является скорость осаждения $w_{\text{ос}}$, основной характеристикой аппарата – поверхность осаждения $F_{\text{ос}}$.

Приведенные выше закономерности разделения неоднородных систем в поле сил тяжести являются справедливыми для одиночных частиц или сильно разбавленных суспензий в большом объеме.

На практике чаще наблюдается стесненное осаждение. При значительных концентрациях взвешенных частиц на характер их движения

влияет их взаимодействие с другими частицами, с жидкостью, возмущенным движением других частиц. Скорость стесненного осаждения $w_{ст}$ меньше скорости свободного осаждения $w_{св}$. С ростом концентрации взвешенных частиц возрастает вероятность их взаимодействия, скорость осаждения падает. На практике зачастую принимают

$$w_{ст} = 0,5w_{св}. \quad (6.34)$$

Частица осядет в отстойнике, если время пребывания $\tau_{пр}$ разделяемой среды в аппарате будет больше времени осаждения частицы $\tau_{ос}$. Для отстойника непрерывного действия, имеющего форму параллелепипеда (см. рис. 6.6), обозначим: высота – h , длина – l , ширина – b .

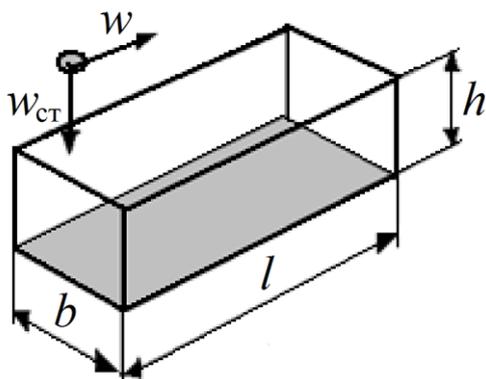


Рис. 6.6 – К расчету размеров и производительности отстойника

Объемный расход разделяемой смеси через отстойник (осветленной фазы) V , $\text{м}^3/\text{с}$:

$$V = whb, \quad (6.35)$$

где w – средняя скорость течения разделяемой среды в отстойнике, $\text{м}/\text{с}$.

Время пребывания разделяемой среды в отстойнике:

$$\tau_{пр} = \frac{l}{w} = \frac{lhb}{V}. \quad (6.36)$$

Максимально возможное время осаждения частицы рассчитывается исходя из условия, что частица по вертикали проходит путь, равный h со скоростью $w_{ст}$:

$$\tau_{ос} = \frac{h}{w_{ст}}. \quad (6.37)$$

Учитывая, что $\tau_{пр} \geq \tau_{ос}$, можно записать

$$\frac{lhb}{V} \geq \frac{h}{w_{ст}}; \quad (6.38)$$

$$lb \geq \frac{V}{w_{\text{ст}}}. \quad (6.39)$$

Поверхность осаждения (горизонтальная проекция днища) отстойника $F_{\text{ос}}$, м², равна:

$$F_{\text{ос}} = lb. \quad (6.40)$$

Из выражений (6.39) и (6.40) следует, что при осаждении в отстойнике частиц со скоростью $w_{\text{ст}}$ необходимо выполнение условия:

$$F_{\text{ос}} \geq \frac{V}{w_{\text{ст}}}. \quad (6.40)$$

Из уравнения (6.40) видно, что теоретически производительность отстойника не зависит от его глубины, а зависит от поверхности осаждения. Действительное значение $F_{\text{ос}}$ принимают на 30–35% больше его минимального расчетного значения. Этим запасом учитывают изменения условий отстаивания по длине отстойника (изменение концентрации взвешенных частиц), неравномерности течения разделяемой среды и др. отклонения работы реального аппарата от идеальной модели.

1.6.6.2 Конструкции отстойников

Отстойники с гребковой мешалкой.

Предназначены для разделения (осветления) больших количеств суспензий. Производительность аппарата по сгущенному осадку может достигать 3000 т/сутки.

Устройство отстойника показано на рис. 6.7. Основными частями аппарата являются: корпус 1 (цилиндрическая железобетонная или стальная чаша) с коническим днищем; кольцевой желоб 2; гребковая мешалка 3.

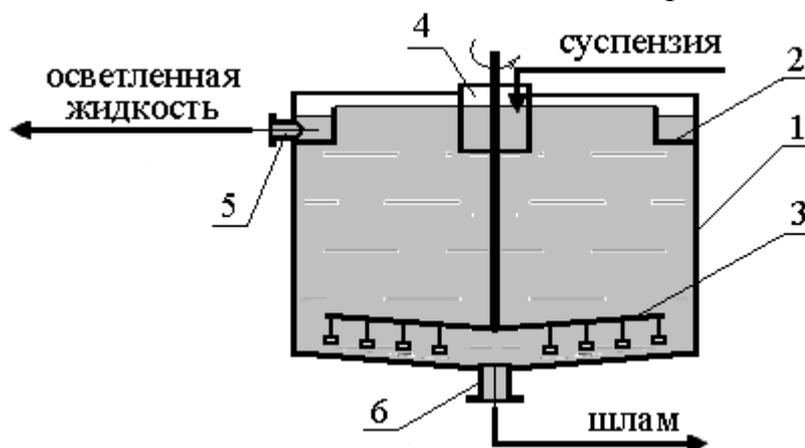


Рис. 6.7 – Отстойник с гребковой мешалкой:

1 – корпус; 2 – кольцевой желоб; 3 – мешалка; 4 – штуцер для подвода суспензии; 5 – штуцер для отвода осветленной жидкости; 6 – штуцер для удаления шлама (осадка)

Принцип действия отстойника следующий. Суспензия через штуцер 4 поступает в центральную зону аппарата, равномерно распределяется по сечению аппарата и движется от центра к периферии. При этом происходит осаждение взвешенных частиц на днище, а осветленная жидкость попадает в кольцевой желоб 2 по всему его периметру и отводится из аппарата через штуцер 5. Слой осевших частиц (шлам) взмучивается медленно вращающейся гребковой мешалкой 3, перемещается к штуцеру 6 и через него отводится из отстойника. Частота вращения мешалки, очень мала (не более 0,5 об/мин), поэтому ее движение практически не нарушает ход процесса осаждения. За счет взмучивания осадок эффективно обезвоживается.

С целью повышения производительности отстойники могут быть многоярусными (рис. 6.8). С целью увеличения эффективности их объединяют в каскады (соединяют последовательно).

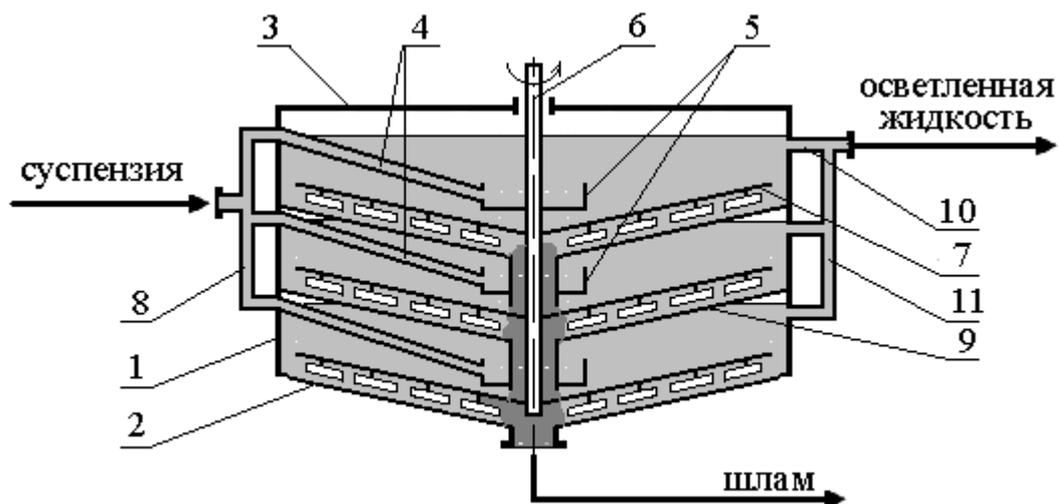


Рис. 6.8 – Многоярусный отстойник с гребковой мешалкой:

1 – корпус; 2 – днище; 3 – крышка; 4 – трубы для подвода суспензии; 5 – устройства подачи суспензии; 6 – вал мешалки; 7 – штанги с гребками; 8 – коллектор подачи суспензии; 9 – днище яруса (перегородка); 10 – труба отвода осветленной жидкости; 11 – коллектор сбора осветленной жидкости

Достоинства отстойника: простота, равномерная плотность и хорошее обезвоживание осадка. Недостаток – громоздкость (до 100 м диаметром). Существенного увеличения производительности отстойника достигают за счет установки в нем конических полок.

Отстойник для эмульсий.

Аппарат предназначен для разделение нестойких эмульсий.

Устройство отстойника показано на рис. 6.9. Он имеет горизонтальный цилиндрический корпус 1 с вертикальной перфорированной распределительной перегородкой 2. Для предотвращения

несанкционированного опорожнения отстойник снабжен устройством разрыва сифона 6.

Жидкость подается в отстойник через штуцер 3, равномерно распределяется по его сечению с помощью перегородки 2. Перемещение жидкости по отстойнику ламинарное, продольная скорость составляет несколько миллиметров в секунду. Под действием сил тяжести из эмульсии выделяются легкая и тяжелая фазы. Легкая фаза поднимается вверх, а тяжелая – опускается вниз. На каком-то расстоянии от перегородки между легкой и тяжелой фазами устанавливается четкая граница раздела. Легкую фазу в этой зоне отстойника отводят через штуцер 4, а тяжелую – через штуцер 5.

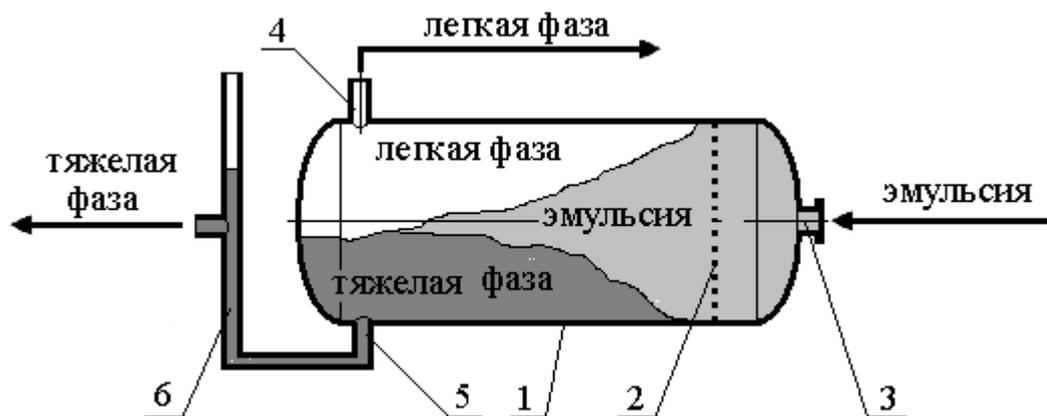


Рис. 6.9 – Отстойник для разделения эмульсий:

1 – корпус; 2 – распределительная перегородка; 3 – штуцер для подвода эмульсии; 4 и 5 – штуцера для отвода легкой и тяжелой фаз соответственно; 6 – устройство для разрыва сифона

Полочная пылеосадительная камера.

Аппарат предназначен для предварительной (грубой) очистки газов от пыли.

Устройство пылеосадительной камеры показано на рис. 6.10. Камера имеет корпус 1 призматической формы с установленными внутри его горизонтальными полками 2 (могут быть поворотными) и вертикальной распределительной (отражательной) перегородкой 3. Имеются также штуцера (патрубки) для входа запыленного и выхода очищенного газа 4 и 5 соответственно. Отражательная перегородка 3 смонтирована внутри корпуса у штуцера для выхода газа.

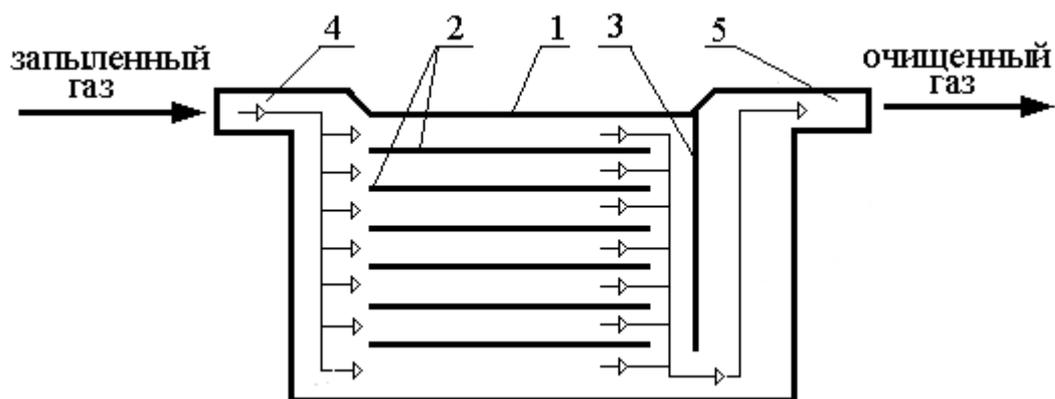


Рис. 6.10 – Полочная пылеосадительная камера:

1 – корпус; 2 – полки; 3 – распределительная перегородка; 4 – штуцер для подачи запыленного газа; 5 – штуцер для выхода очищенного газа

Принцип действия камеры следующий. Газ входит в корпус аппарата 1 через штуцер 4. Благодаря наличию распределительной перегородки 3 он равномерно распределяется между полками. При движении газа между полками пыль оседает на них, частично пыль осаждается и возле отражательной перегородки 3 за счет инерционных сил (резкий поворот потока у перегородки). Расстояние между полками составляет от 0,1 до 0,4 м. По мере накопления пыли на полках ее убирают из камеры ручными скребками (либо смывают водой, либо стряхивают при повороте полок и воздействии вибратора).

Полочные пылеосадительные камеры эффективно улавливают грубую (с размером частиц больше 100 мкм) пыль. Они довольно громоздки и при этом малопродуктивны. Однако данные аппараты выигрывают по сравнению с пылеосадительными газоходами (полыми пылеосадительными камерами) по всем показателям работы. Для обеспечения непрерывной работы газоочистных установок пылеосадительные камеры соединяют параллельно. В таком случае аппараты работают попеременно.

1.6.7 Гидродинамика зернистого слоя

Слой твердого материала, состоящий из отдельных элементов (частиц), не связанных друг с другом, называют зернистым. Зернистые слои могут быть монодисперсными (состоят из частиц одинакового размера и формы) и полидисперсными (частицы различных размеров и формы). Они могут находиться как в неподвижном, так и во взвешенном состоянии. Частицы слоя, находящегося во взвешенном состоянии, омываются по всей поверхности другой фазой (газом или жидкостью) и перемещаются.

В химических и родственных процессах и аппаратах зернистый слой может быть представлен частицами (гранулами) катализатора, адсорбента, насадкой аппаратов, слоем осадка и т. д. В указанных случаях через слой протекает жидкость или газ. Задача такого течения рассматривается как смешанная (обтекание тел и движение в каналах между телами).

1.6.7.1 Движение жидкости (газа) через неподвижный слой зернистого материала. Основные характеристики зернистого слоя

Одной из важнейших задач, решаемых при расчетах и проектировании аппаратов с неподвижными зернистыми слоями, является задача по определению гидравлического сопротивления этих слоев. Гидравлическое сопротивление неподвижного зернистого слоя Δp , Па, определяют по зависимости, аналогичной той, что используется для определения потерь давления на трение в трубопроводах:

$$\Delta p = \lambda \frac{l}{d_{\text{э}}} \frac{\rho w_{\text{д}}^2}{2}, \quad (6.41)$$

где λ – общий коэффициент трения, учитывающий как потери давления на трение, так и на местных сопротивлениях;

l – средняя длина каналов в слое (принимают $l \approx h$, где h – высота слоя), м;

$d_{\text{э}}$ – эквивалентный диаметр каналов в слое, м;

ρ – плотность среды, движущейся в каналах, кг/м³;

$w_{\text{д}}$ – скорость среды в каналах слоя (действительная скорость), м/с.

Эквивалентный диаметр каналов $d_{\text{э}}$ может быть определен через величины удельной поверхности слоя и его свободного объема (порозности).

Удельная поверхность слоя – это суммарная поверхность всех частиц единицы объема зернистого слоя a , м²/м³:

$$a = \frac{F_{\text{ч}}}{V_{\text{сл}}}, \quad (6.42)$$

где $F_{\text{ч}}$ – суммарной поверхности всех частиц слоя (поверхности каналов слоя), м^2 ;

$V_{\text{сл}}$ – объем слоя, м^3 .

Порозность – это доля свободного объема (объема, не занятого частицами) в зернистом слое ε , $\text{м}^3/\text{м}^3$:

$$\varepsilon = \frac{V_{\text{сл}} - V_{\text{ч}}}{V_{\text{сл}}}, \quad (6.43)$$

где $V_{\text{ч}}$ – объем частиц в слое, м^3 .

Эквивалентный диаметр каналов $d_{\text{э}}$, м, определяют по формуле:

$$d_{\text{э}} = \frac{4\varepsilon}{a}. \quad (6.44)$$

Для полидисперсного слоя средний размер частицы определяют следующим образом:

$$d = \frac{1}{\sum_{i=1}^n \frac{x_i}{d_i}}, \quad (6.45)$$

где x_i – массовая (объемная) доля частиц среднего размера d_i в слое, $\text{кг}/\text{кг}$ ($\text{м}^3/\text{м}^3$).

Для потока в зернистом слое различают действительную $w_{\text{д}}$, м/с, и фиктивную w , м/с, скорости. Фиктивная скорость представляет собой отношение объемного расхода среды ко всей площади поперечного сечения слоя (аппарата), а действительная скорость – отношение объемного расхода среды к суммарному поперечному сечению каналов слоя. Поэтому соотношение между этими скоростями определяется по формуле:

$$w_{\text{д}} = \frac{w}{\varepsilon}. \quad (6.46)$$

Очевидно, что действительная скорость жидкости (газа) в каналах слоя $w_{\text{д}}$ больше фиктивной w , т. к. $\varepsilon < 1$.

При движении жидкости (газа) через зернистый слой также различают ламинарный и турбулентный режимы. В турбулентном режиме существует область автомодельного течения. Критерий Рейнольдса Re , характеризующий области существования различных режимов течения через зернистый слой, можно выразить через удельную поверхность слоя a и фиктивную скорость w :

$$Re = \frac{w_{\text{д}} d_{\text{э}} \rho}{\mu} = \frac{w}{\varepsilon} \frac{4\varepsilon}{a} \rho = \frac{4w\rho}{a\mu}, \quad (6.47)$$

где μ – динамический коэффициент вязкости жидкости (газа), Па·с.

Турбулентный режим наблюдается при меньших значениях Re , чем при движении потока в прямых каналах. Ламинарный режим существует при $Re < 50$, автомодельность при турбулентном режиме течения наступает при $Re > 7000$.

В результате обобщения экспериментальных данных получена универсальная зависимость, пригодная для расчета коэффициента трения λ для всех режимов течения жидкости (газа) через зернистый слой:

$$\lambda = \frac{133}{Re} + 2,34. \quad (6.48)$$

Из формулы (6.48) следует, что при $Re < 1$ коэффициент трения с достаточной точностью можно рассчитать по зависимости:

$$\lambda = \frac{133}{Re}. \quad (6.49)$$

При $Re > 7000$ (автомодельная область турбулентного режима) принимают $\lambda = 2,34$.

Порозность ε зернистого слоя зависит как от формы и размера частиц, так и от способа засыпки в слой, а также от соотношения поперечных размеров частиц и аппарата. Для сферических частиц ε находится в пределах от 0,35 до 0,45. В расчетах ее, как правило, принимают равной 0,4. При свободной загрузке зернистого материала (внавал) плотность упаковки частиц у стенок аппарата значительно меньше, чем в центре, особенно при сопоставимых поперечных размерах частиц и аппарата. С целью нормального распределения потоков в промышленных аппаратах размер частиц не должен превышать 10% от диаметра аппарата. Невыполнение этого условия ведет к усилению пристеночного эффекта. Газ (жидкость) перетекает из центральной зоны с большей плотностью упаковки частиц в зону у стенок, где частицы размещены менее плотно. Пристеночный эффект вызывает уменьшение эффективности процессов в аппаратах с неподвижными зернистыми слоями вследствие байпасирования (проскока) части среды вдоль стенки, т. е. мимо зоны контакта.

1.6.7.2 Гидродинамика зернистого слоя в состояниях псевдооживления и уноса

Если газ (жидкость) проходит через зернистый слой снизу вверх, то при некоторых скоростях потока под действием подъемных сил (трения, лобового сопротивления, архимедовой) частицы материала переходят в состояние неустойчивого динамического равновесия. Визуально слой материала в таком состоянии похож на кипящую жидкость: частицы хаотически перемещаются в слое, подобно пузырькам пара в кипящей

жидкости. Данное состояние слоя получило название «кипящего» (взвешенного, псевдооживленного).

Рассмотрим поведение зернистого слоя и его параметры при изменении скорости восходящего потока газа (жидкости) через него. При относительно малых фиктивных скоростях среды w частицы в слое неподвижны, среда как бы фильтруется через слой, т. к. подъемные силы не превышают по своей величине сил тяжести (см. рис. 6.11, *a*). Порозность ε_0 , высота h_0 , удельная поверхность неподвижного слоя при этом не изменяются (см. рис. 6.12). Гидравлическое сопротивление слоя увеличивается с ростом скорости согласно формуле (6.41).

При каком-то критическом значении фиктивной скорости $w_{кр1}$ (первая критическая скорость, скорость начала псевдооживления) слой приобретает подвижность, его высота h и порозность ε при дальнейшем росте фиктивной скорости потока среды увеличиваются (см. рис. 6.12). При этом слой имеет четкую верхнюю границу, а частицы двигаются внутри этого слоя хаотически не покидая его (см. рис. 6.11, *б*). Слой в данных условиях находится в псевдооживленном («кипящем») состоянии.

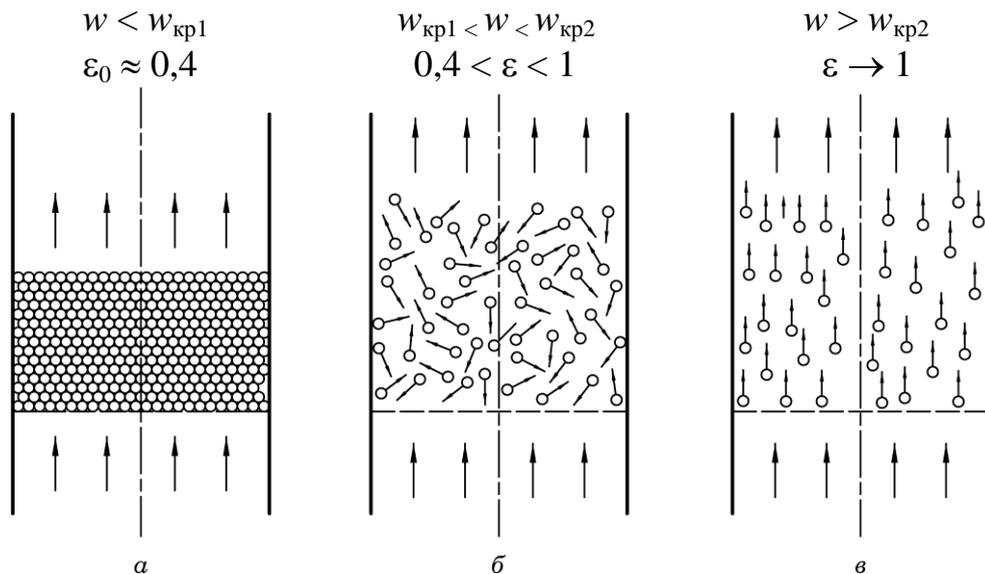


Рис. 6.11 – Схемы структур и поведения частиц зернистого слоя в различных состояниях:

a – неподвижном; *б* – псевдооживленном; *в* – уноса

При дальнейшем увеличении скорости и превышения ею некоторого критического значения $w_{кр2}$ (вторая критическая скорость, скорость свободного витания частиц) частицы приобретают упорядоченное движение (см. рис. 6.11, *в*). Направление этого движения частиц совпадает с направлением движения потока среды. Наступает состояние уноса (пневмотранспорта) частиц. Указанное явление используется в промышленности для транспортировки сыпучих материалов газовыми или жидкими средами.

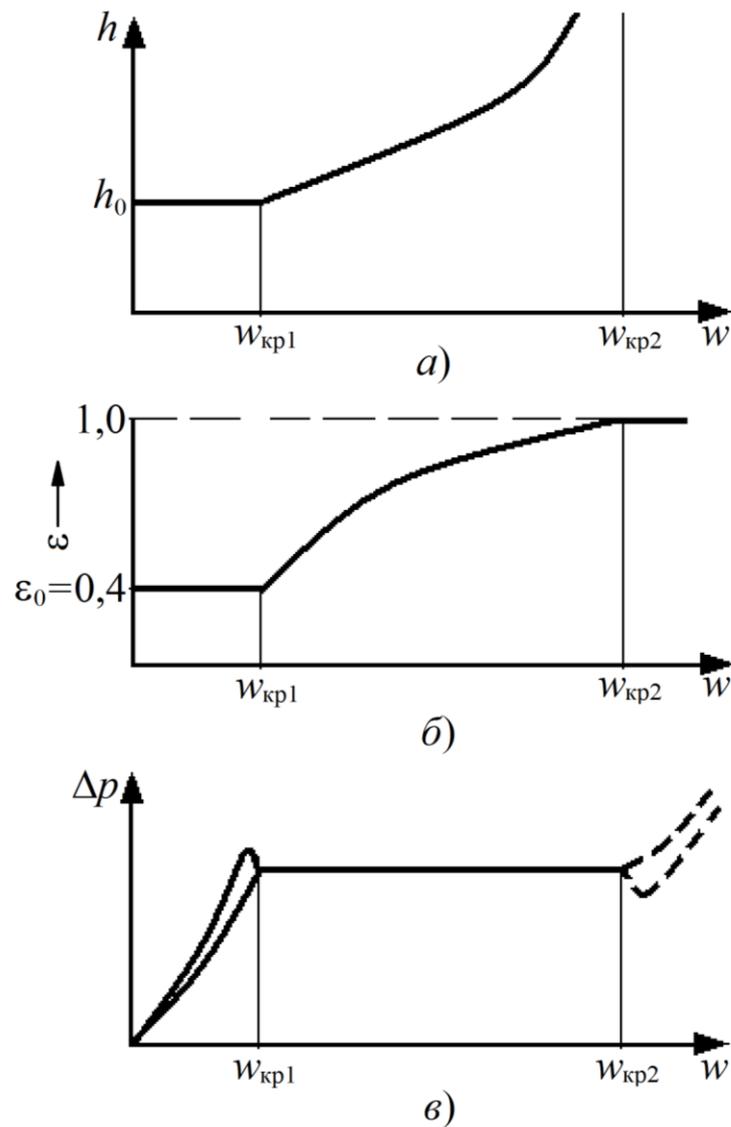


Рис. 6.12 – Графики зависимостей высоты h (а), порозности ε (б) и гидравлического сопротивления Δp (в) зернистого слоя от величины фиктивной скорости w восходящего потока газа (жидкости)

Переход зернистого слоя из одного состояния в другое и его поведение можно объяснить следующим образом. При движении среды через слой на его частицы действуют следующие силы: сила тяжести G (направлена вниз) и сила Архимеда A и сила сопротивления среды R (направлены вверх). Величины сил A и G не зависят от скорости среды: сила тяжести G зависит от размера и плотности частиц; сила Архимеда A – от размера частиц и плотности среды. Величина силы сопротивления R зависит от размера частиц, свойств среды (плотности и вязкости) и ее действительной скорости (скорости обтекания частиц). Для неподвижного слоя действительная скорость среды пропорциональна фиктивной. С ростом скорости w растет сила сопротивления R . Эта сила в целом для слоя может быть определена как произведение его гидравлического сопротивления Δp на его же поперечное сечение S .

При достижении скорости газа значения $w_{кр1}$ сила сопротивления R становится равной разности сил тяжести G и Архимеда A . Частицы переходят в состояние неустойчивого динамического равновесия, малейшие пульсации скорости в потоке побуждают эти частицы к движению. Слой переходит в «кипящее» состояние. При дальнейшем повышении скорости (выше $w_{кр1}$) слой увеличивает свой объем и порозность. За счет увеличения порозности при возрастании фиктивной скорости действительная скорость – скорость обтекания частиц, остается постоянной. Т.к. в данном случае гидравлическое сопротивление представляет собой отношение разности сил сопротивления и Архимеда к поперечному сечению слоя, то оно во всем диапазоне скоростей при существовании «кипящего слоя» его гидравлическое сопротивление Δp остается постоянным.

При значительном увеличении скорости среды до значения $w_{кр2}$ порозность слоя стремится к единице ($\varepsilon \rightarrow 1$). В этом случае действительная скорость обтекания частиц по величине приближается к фиктивной. Рост действительной скорости ведет к тому, что сила сопротивления среды за вычетом силы Архимеда начинает преобладать над силой тяжести. В таком случае частицы движутся в одном направлении с потоком, начинается их пневмотранспорт. За счет уноса снижается вес слоя, и поэтому вначале его гидравлическое сопротивление несколько падает, но при дальнейшем увеличении скорости оно растет. Механизм начала уноса частиц сходен по величинам действующих на них сил механизму свободного осаждения этих же частиц в неподвижной среде. Поэтому значение $w_{кр2}$ может быть рассчитана по тем же уравнениям, что и скорость их свободного осаждения.

При уменьшении скорости движения среды через предварительно ожиженный слой может наблюдаться явление гистерезиса перепада давлений. При одних и тех же значениях скорости у неподвижного слоя после ожижения сопротивление меньше, чем до ожижения (см. рис. 6.12, в). Это обусловлено тем, что после ожижения слой разрыхлен, порозность его в неподвижном состоянии при этом больше, чем до ожижения, в чем легко убедиться экспериментально, измерив высоту слоя.

В некоторых случаях при переходе слоя из неподвижного состояния в кипящее наблюдают небольшое падение гидравлического сопротивления (см. рис. 6.12, в). Оно вызвано тем, что при переходе во взвешенное состояние между частицами преодолеваются силы механического сцепления. При неправильной форме частиц силы механического сцепления могут иметь ощутимую величину.

Сопротивление взвешенного слоя Δp , согласно изложенным ранее положениям, вычисляется через его вес G и силу Архимеда A по формуле:

$$\Delta p = \frac{G - A}{S} = \frac{mg - A}{S}, \quad (6.50)$$

где S – площадь поперечного сечения зернистого слоя (аппарата), м^2 ;
 m – масса частиц в слое, кг;
 g – ускорение свободного падения, $\text{м}/\text{с}^2$.

В свою очередь вес слоя и действующая на него сила Архимеда вычисляются следующим образом:

$$G = \rho_{\text{ч}} V_{\text{ч}} g = \rho_{\text{ч}} V_{\text{сл}} (1 - \varepsilon) g = \rho_{\text{ч}} h S (1 - \varepsilon) g; \quad (6.51)$$

$$A = \rho V_{\text{ч}} g = \rho V_{\text{сл}} (1 - \varepsilon) g = \rho h S (1 - \varepsilon) g, \quad (6.52)$$

где $\rho_{\text{ч}}$ и ρ – плотность материала частиц и ожижающей среды соответственно, $\text{кг}/\text{м}^3$;

$V_{\text{ч}}$ и $V_{\text{сл}}$ – объемы частиц в слое и слоя соответственно, м^3 .

Из зависимостей (6.50)–(6.52) следует:

$$\Delta p = (\rho_{\text{ч}} - \rho) h (1 - \varepsilon) g. \quad (6.53)$$

Для неподвижного и псевдооживленного слоев в одном и том же аппарате объемы загруженных твердых частиц одинаковы. При этом объем частиц в неподвижном слое вычисляется по формуле:

$$V_{\text{ч}} = V_0 (1 - \varepsilon_0) = h_0 S (1 - \varepsilon_0), \quad (6.54)$$

где h_0 – высота неподвижного слоя, м;

ε_0 – порозность неподвижного слоя, $\text{м}^3/\text{м}^3$.

Тогда гидравлическое сопротивление псевдооживленного слоя определяется через параметры неподвижного слоя по зависимости:

$$\Delta p = (\rho_{\text{ч}} - \rho) h_0 (1 - \varepsilon_0) g. \quad (6.55)$$

Из зависимостей (6.53) и (6.55) получают уравнение взаимосвязи высот псевдооживленного и неподвижного зернистых слоев с их порозностью:

$$h = h_0 \frac{1 - \varepsilon_0}{1 - \varepsilon}. \quad (6.56)$$

В инженерной практике важно установить диапазон скоростей ожижающего агента соответствующий существованию взвешенного слоя, т.е. значения первой и второй критических скоростей.

Скорость начала псевдооживления с точностью $\pm 20\%$ может быть определена по следующей критериальной зависимости:

$$\text{Re}_{\text{кр1}} = \frac{\text{Ar}}{1400 + 5,22\sqrt{\text{Ar}}}, \quad (6.57)$$

где $\text{Re}_{\text{кр1}}$ – число Рейнольдса, соответствующее скорости начала псевдооживления зернистого слоя;

Ar – число Архимеда для частиц зернистого слоя.

Значения $Re_{кр1}$ и Ar вычисляют по формулам:

$$Re_{кр1} = \frac{w_{кр1} d \rho}{\mu}; \quad (6.58)$$

$$Ar = \frac{d^3 \rho (\rho_{ч} - \rho) g}{\mu}, \quad (6.59)$$

где d – эквивалентный диаметр частиц зернистого соя, м;
 μ – динамическая вязкость оживающей среды, Па·с.

Скорость свободного витания частиц (начала уноса) определяют по той же критериальной зависимости, что и скорость их свободного осаждения:

$$Re_{кр2} = \frac{Ar}{18 + 0,575 \sqrt{Ar}}, \quad (6.60)$$

где $Re_{кр2}$ – число Рейнольдса, соответствующее скорости начала уноса частиц.

$$Re_{кр2} = \frac{w_{кр2} d \rho}{\mu}. \quad (6.61)$$

Слой твердых частиц будет находиться во взвешенном состоянии, если фиктивная скорость оживающего агента w (рабочая скорость) будет выше $w_{кр1}$ но ниже $w_{кр2}$, т.е. $w_{кр1} < w < w_{кр2}$.

Отношение величины рабочей скорости к первой критической называют числом псевдооживения K_V (K_W):

$$K_V = \frac{w}{w_{кр1}}. \quad (6.62)$$

Значение $K_V > 1$. При отсутствии опытных данных величина K_V может быть определена через предельное число псевдооживения $K_{пр}$:

$$K_{пр} = \frac{w_{кр2}}{w_{кр1}}. \quad (6.63)$$

Если $K_{пр}$ превышает 40÷50, то число псевдооживения выбирают в интервале от 3 до 7, если $K_{пр} < 20÷30$, то значение K_V можно выбирать в пределах от 1,5 до 3.

Порозность слоя в состоянии псевдооживения ε определяют по критериальному уравнению:

$$\varepsilon = \left(\frac{18\text{Re} + 0,36\text{Re}^2}{\text{Ar}} \right)^{0,21} \quad (6.64)$$

В формуле (6.64) значение критерия Re определяют по рабочей скорости. Если в результате расчета по формуле (6.64) получено, что $\varepsilon < 0,4$, то слой неподвижен (принимаем $\varepsilon = 0,4$); если же получено, что $\varepsilon > 1$, то слой находится в состоянии уноса (принимаем $\varepsilon = 1$).

Для решения практических задач по гидродинамике взвешенного слоя можно использовать графическую зависимость $\text{Lu} = f(\text{Ar}, \varepsilon)$ – диаграмму Лященко для зернистого слоя. Вид этой диаграммы упрощенно показан на рис. 6.13.

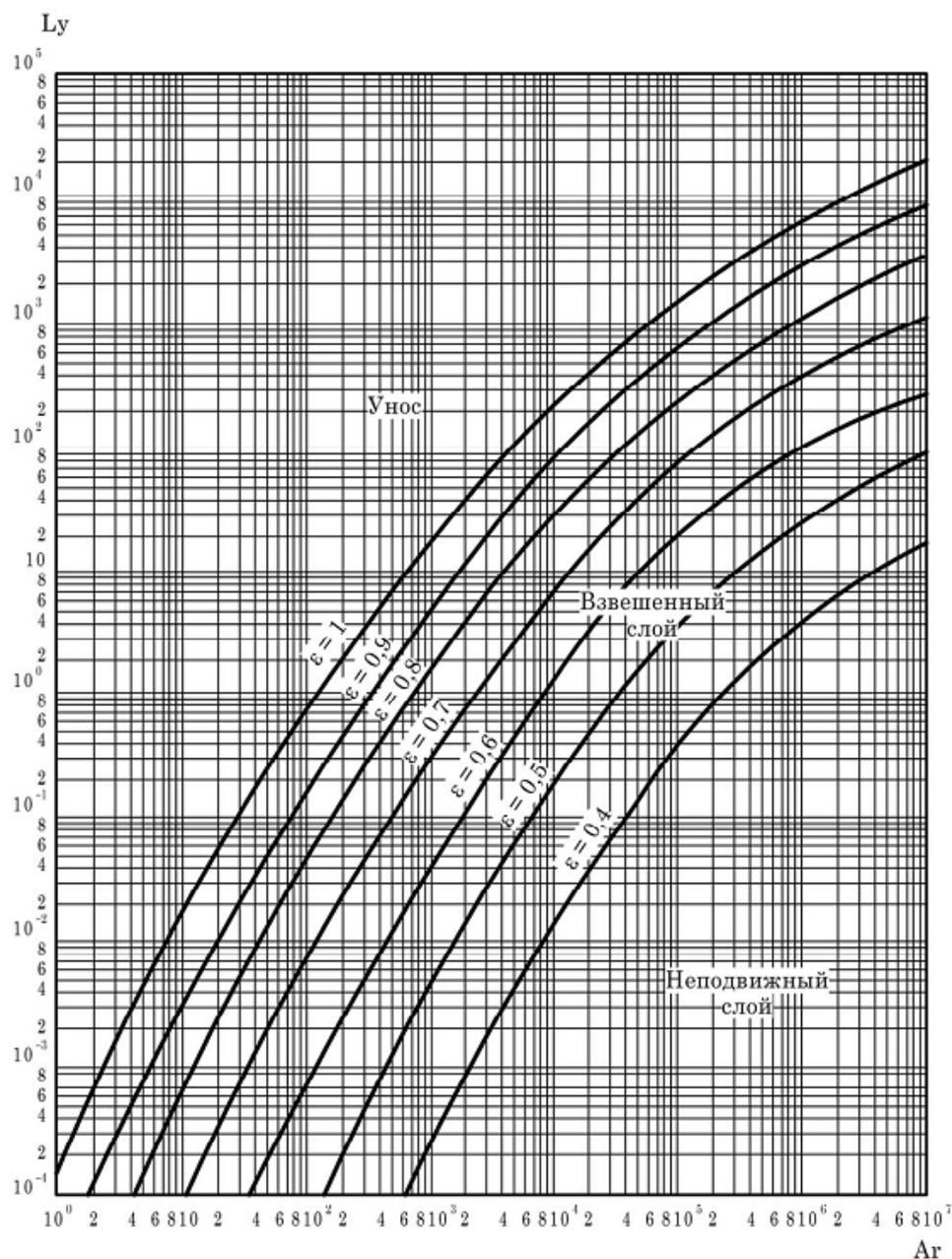


Рис. 6.13 – диаграмма Лященко для зернистого слоя

На диаграмме имеется три области:

- область, лежащая ниже линии $\varepsilon = 0,4$ соответствует неподвижному слою;
- область, находящаяся между линиями $\varepsilon = 0,4$ и $\varepsilon = 1$ соответствует псевдооживленному слою;
- область выше линии $\varepsilon = 1$ соответствует состоянию уноса частиц.

На рис. 6.14 показано выполнение некоторых типичных задач при использовании диаграммы $Ly = f(Ar, \varepsilon)$.

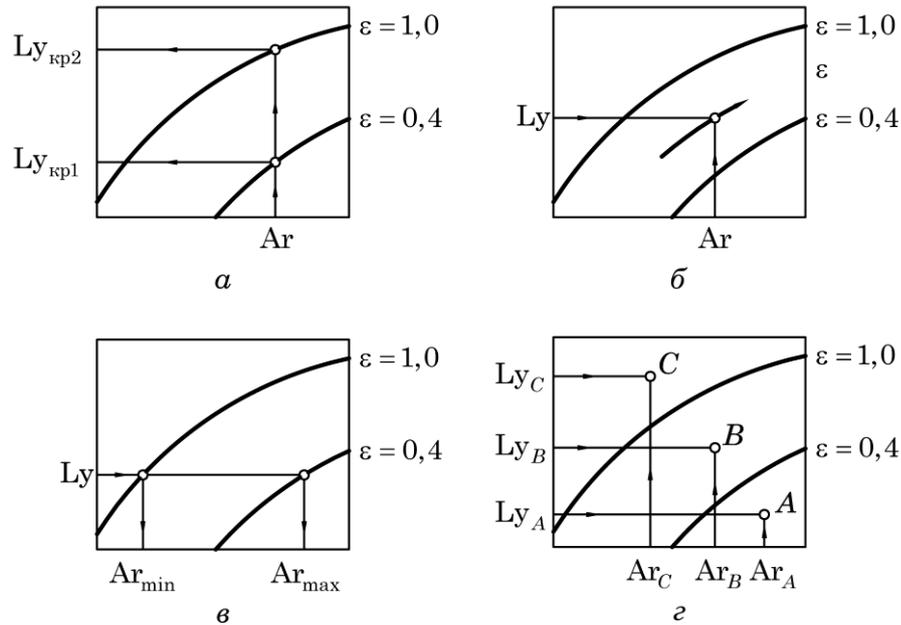


Рис. 6.14 – Примеры использования графической зависимости $Ly = f(Ar, \varepsilon)$:

- a* – определение первой критической $w_{кр1}$ и второй критической $w_{кр2}$ скоростей при известном диаметре частицы d ;
- б* – определение порозности псевдооживленного слоя при известной рабочей скорости w и диаметре частицы d ;
- в* – определение минимального d_{min} и максимального d_{max} диаметра частиц в псевдооживленном состоянии при известной рабочей скорости w ;
- г* – определение состояния частицы по ее известному диаметру d и рабочей скорости оживающего агента w

a) определение критических скоростей $w_{кр1}$ и $w_{кр2}$ по известному диаметру частиц d :

$$d \rightarrow Ar \begin{array}{l} \xrightarrow{\varepsilon = 0,4} Ly_{кр1} \rightarrow w_{кр1} ; \\ \xrightarrow{\varepsilon = 1,0} Ly_{кр2} \rightarrow w_{кр2} \end{array}$$

б) определение порозности псевдооживленного слоя по известным рабочей скорости w и диаметре частицы d :

$$\left. \begin{array}{l} d \rightarrow Ar \\ w \rightarrow Ly \end{array} \right\} \rightarrow \varepsilon;$$

в) определение диапазона частиц находящихся во взвешенном состоянии по известной рабочей скорости w :

$$w \rightarrow Ly \quad \begin{array}{l} \xrightarrow{\varepsilon = 0,4} Ar_{\max} \rightarrow d_{\max} ; \\ \xrightarrow{\varepsilon = 1,0} Ar_{\min} \rightarrow d_{\min} \end{array}$$

г) определение состояния частиц по известным диаметру частиц и рабочей скорости:

$$\left. \begin{array}{l} d \rightarrow Ar \\ w \rightarrow Ly \end{array} \right\} \rightarrow \varepsilon, \quad \begin{array}{ll} \varepsilon < 0,4 & - \text{ неподвижный слой (точка А)} \\ 0,4 < \varepsilon < 1 & - \text{ взвешенный слой (точка В) .} \\ \varepsilon > 1 & - \text{ пневмотранспорт (точка С)} \end{array}$$

Кипящий слой твердых частиц широко применяется для интенсификации процессов в системах газ–твердое, жидкость–твердое: сушка, адсорбция, обжиг, сжигание топлива, каталитические гетерогенные реакционные процессы.

Достоинства аппаратов с кипящим слоем по сравнению с неподвижным:

- высокая интенсивность процессов из-за развитой поверхности контакта фаз (материал мелко раздроблен, практически отсутствуют застойные зоны);

- интенсивное перемешивание материала и достижение за счет этого равномерности распределения параметров материала в слое (температуры, концентрации и т. д.);

- простое управление процессом, его легко автоматизировать, а также проводить в непрерывном режиме из-за текучести слоя;

- постоянство гидравлического сопротивления при изменении нагрузки по сплошной (газовой или жидкой) фазе.

Недостатки аппаратов с кипящим слоем:

- в аппаратах протекает интенсивный эрозионный износ их стенок и самих частиц, поэтому они мало пригодны для работы с мягкими хрупкими и абразивными материалами;

- разрушение частиц материала вызывает значительный выброс пыли из аппаратов КС, возникает потребность в эффективных дорогостоящих и энергоемких системах пылегазоочистки;

- псевдооживленным слоям могут быть присущи неоднородности их плотности по высоте (поршнеобразование в высоких узких аппаратах) и по поперечному сечению (каналообразование в аппаратах с относительно невысокими слоями); канало- и поршнеобразование приводят к снижению

эффективности аппаратов из-за значительного проскока оживающей среды практически без контакта с твердыми частицами;

– в одноступенчатых аппаратах невозможно организовать противоток фаз, что снижает их эффективность;

– при работе с диэлектриками существует опасность накопления статического электричества и возникновения электрических разрядов (искр) между частицами, что может привести к возникновению взрыва или пожара.

Некоторые конструктивные особенности аппаратов с кипящим слоем (аппаратов КС):

1) аппарат КС имеет постоянное по высоте поперечное сечение при работе с материалом, состав которого можно считать приближенно монодисперсным.

2) расширяющееся по высоте поперечное сечение имеют аппараты при работе с полидисперсным материалом (нижнее узкое сечение обеспечивает условия для псевдооживления наиболее крупных частиц; верхнее широкое обеспечивает снижение скорости потока таким образом, что предотвращается унос мелких частиц).

3) каскадные (многоступенчатые) аппараты КС используются для обеспечения проведения взаимодействия фаз в их противотоке.

4) аппараты КС с фонтанирующим слоем применяются для обеспечения более активного перемешивания полидисперсного материала и снижения слипания (агломерации) частиц.

5) аппараты с виброкипящим слоем, а также с механическим перемешиванием зернистого слоя применяются для предотвращения каналообразования и возникновения застойных зон.

1.6.7.3 Пневмотранспорт зернистых материалов

Состояние уноса слоя зернистого материала используют для его транспортировки. Метод транспортировки зернистого материала с помощью газовой транспортирующей фазой называют пневмотранспортом. Зернистый материал при этом перемещают в трубопроводах.

Использование пневмотранспорта позволяет:

– обеспечить герметичность перемещения;

– создавать гибкие в пространстве транспортные трассы, в том числе изменяемой конфигурации;

– полностью автоматизировать транспортные операции;

– экономить на капиталовложениях;

– транспортировать с большой скоростью горячие, токсичные и другие опасные материалы.

Недостатками систем пневмотранспорта являются:

– эрозия и быстрый износ трубопроводов;

– разрушение частиц материала при его транспортировке;

- повышенный удельный расход энергии;
- значительное пылеобразование и возможность накопления статического электричества.

Трубопроводные системы пневмотранспорта делят на низконапорные, средненапорные и высоконапорные. Скорость потока газа (воздуха) в них обычно составляет от 20 до 30 м/с. Эти системы бывают всасывающими (низко- и средненапорные) и нагнетательными (средне- и высоконапорные).

Принципиальная схема всасывающей системы пневмотранспорта представлена на рис. 6.15. Установка состоит из транспортного трубопровода 1 с заборным устройством 2, циклона 3, бункера 4, фильтра 5, вентилятора (компрессора) 6 и бункера-пылесборника 7. Система транспортировки работает под давлением ниже атмосферного. За счет динамического воздействия потока воздуха материал засасывается в трубопровод 1 через заборное устройство 2. Достигая циклона 3, материал отделяется от газа в нем. Материал из циклона 3 перегружается в бункер 4, а газ поступает на доочистку в фильтр 5 и вентилятором 6 выбрасывается в атмосферу.

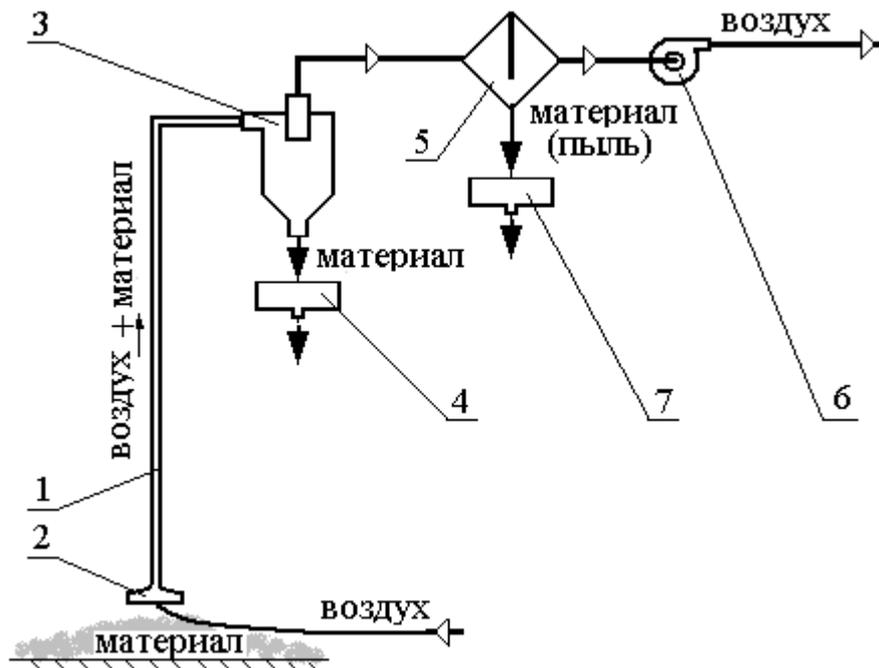


Рис. 6.15 – Схема всасывающей системы пневмотранспорта:

1 – транспортный трубопровод; 2 – заборное устройство; 3 – циклон;
4 – бункер; 5 – фильтр; 6 – вентилятор; 7 – бункер-пылесборник

Установка пневмотранспорта нагнетательного типа (см. рис. 6.16) состоит из компрессора 1, транспортного трубопровода 2 с загрузочным устройством (питателем) 3, циклона 4, бункера 5, фильтра 6 и бункера-пылесборника 7. Воздух компрессором 1 с большой скоростью нагнетается в трубопровод 2. Туда же питателем 3 подается материал. Полученная газовзвесь частиц твердого материала движется по трубопроводу к

потребителю. В циклоне 4 твердый материал отделяется от воздуха и выгружается в бункер 5. Затем воздух поступает на доочистку в фильтр 6.

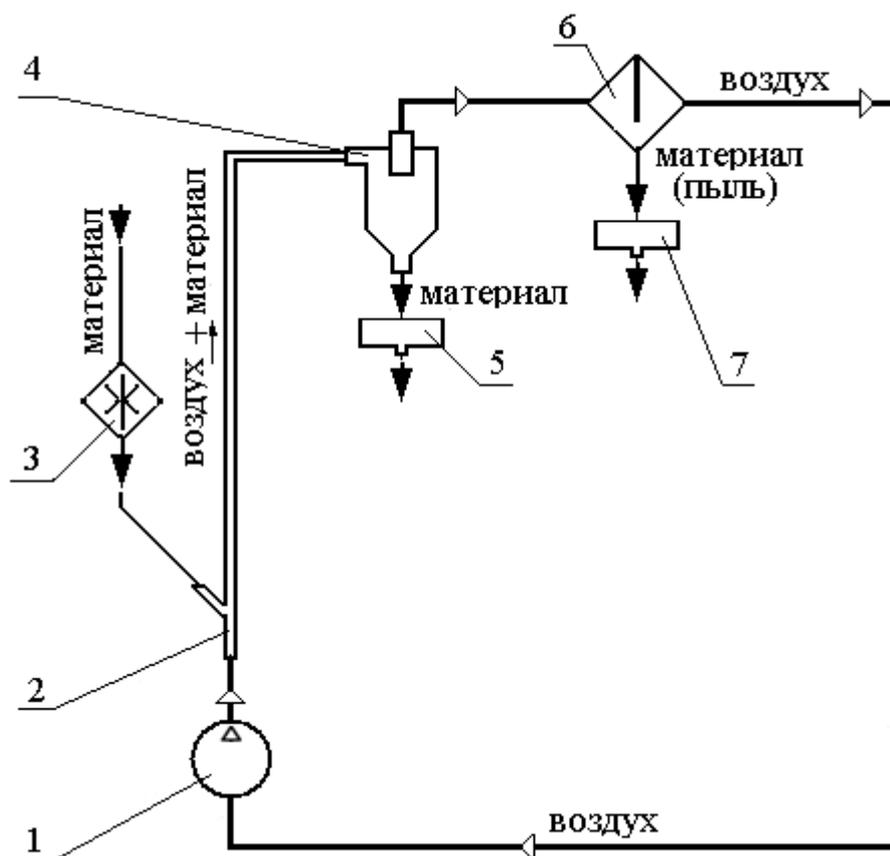


Рис. 6.16 – Схема нагнетательной системы пневмотранспорта:
 1 – компрессор; 2 – транспортный трубопровод; 3 – питатель;
 4 – циклон; 5 – бункер; 6 – фильтр; 7 – бункер-пылесборник

В трубопроводных системах пневмотранспорта возможно совмещение теплообменных и массообменных процессов с транспортировкой материала. В низконапорных системах пневмотранспорта материал перемещается на малые расстояния. Высота подъема материала в них составляет до 15 м, расстояние транспортировки – до 30 м при перепаде давлений до 10 кПа. Размер перемещаемых твердых частиц может достигать 15 мм, а массовая доля твердого материала в транспортирующем его воздухе 2 кг/кг. Средненапорные системы пневмотранспорта, работающие при перепаде давления до 0,13 МПа, используются для транспортировки материала на расстояния до 100 м при его массовой доле в воздухе от 5 до 40 кг/кг. Высоконапорный пневмотранспорт использует воздух с давлением до 0,5 МПа. Нагнетательные системы пневмотранспорта, как показано на рис. 6.16, могут быть замкнутыми по транспортирующему воздуху.

При расчете систем пневмотранспорта скорость газа в транспортном трубопроводе принимают примерно в 1,5–2 раза больше, чем скорость витания наибольших частиц транспортируемого материала.