

Лекция 14.

РАЗДЕЛЕНИЕ ГЕТЕРОГЕННЫХ СИСТЕМ ОСАЖДЕНИЕ, ОТСТОЙНИКИ

В зависимости от фаз и размеров дисперсных частиц неоднородные системы подразделяются на суспензии (жидкость + твердые частицы), эмульсии (жидкость + жидкость), пену (жидкость + газ), дым (твердые частицы $d < 5\text{мкм}$ + газ), пыль (твердые частицы $d > 5\text{мкм}$ + газ), туман (жидкость + газ).

Разделение гетерогенных систем производится с целью удаления частиц из газов или жидкостей для их очистки или выделения ценных компонентов.

Методы разделения гетерогенных систем - различны, зависят от системы, физических свойств фаз (вязкость, плотность), размеров, концентраций дисперсной фазы.

При осаждении происходит разделение гетерогенных систем под действием силы тяжести, центробежной силы, электростатических сил в следующих процессах:

- Отстаивание;
- Разделение в циклонах, отстойное центрифугирование
- Электроочистка.

Осаждение под действием сил тяжести (отстаивание)

Кинетика осаждения

Сопротивление сред движущемуся телу зависит от формы тела и режима его обтекания. При ламинарном движении тело окружено пограничным слоем жидкости. Слои жидкости плавно обтекают тело. С увеличением скорости осаждения пограничный слой начинает отрываться от поверхности тела.

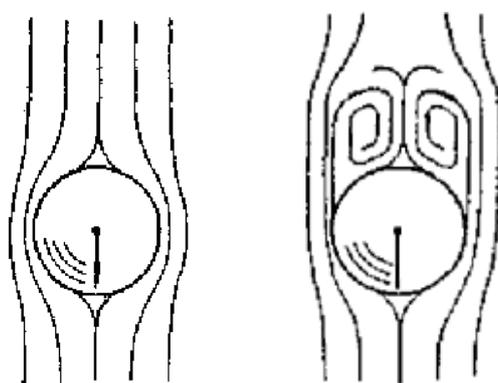


Рис.14-1.

За двигающимся телом понижается давление и образуются завихрения. Таким образом, образуется разность давлений на лобовую и кормовую поверхности, и она больше, чем при ламинарном обтекании.

При дальнейшем увеличении критерия Re наступает такая область, в которой лобовое сопротивление становится преобладающим и сопротивлением трения можно пренебречь. Наступает автомодельный режим, в котором сопротивление не зависит от скорости.

Сила сопротивления среды $F_{сопр}$ пропорциональна сечению частицы S и квадрату скорости осаждения v :

$$F_{сопр} = \zeta S \frac{\rho_{ср} v^2}{2} \quad (14.1)$$

где ζ - коэффициент сопротивления

Скорость осаждения частицы v постоянна, т.к. частиц сила тяжести частицы в среде уравновешивается силой сопротивления:

$$F_g - F_{арх} = F_{сопр} \quad (14.2)$$

$$mg - m_{ср}g = \zeta S \frac{\rho_{ср} v^2}{2} \quad (14.3)$$

где $F_g = mg$ - сила тяжести, $F_{арх} = m_{ср}g$ - сила выталкивания, m - масса частицы, $m_{ср}$ - масса среды в объеме частицы, ρ - плотность частицы, $\rho_{ср}$ - плотность среды.

Массу шарообразной частицы можно записать как:

$$m = \rho V = \rho \frac{\pi d^3}{6} \quad (14.4)$$

где d - диаметр частицы.

Подставим выражения для действующих на частицу сил и сечения частицы S :

$$mg - m_{ср}g = \xi S \frac{\rho v^2}{2} \quad (14.5)$$

$$\rho \frac{\pi d^3}{6} g - \rho_{ср} \frac{\pi d^3}{6} g = \zeta \cdot \frac{\pi d^2}{4} \cdot \frac{\rho_{ср} v^2}{2} \quad (14.6)$$

$$v = \sqrt{\frac{4dg}{3\zeta} \cdot \frac{\rho - \rho_{ср}}{\rho}} \quad (14.7)$$

Для сферических твердых частиц в безразмерной форме уравнение (14.7) имеет следующий вид:

$$\zeta \cdot Re^2 = \frac{4}{3} Ar \quad (14.8)$$

Критерий Рейнольдса при осаждении:

$$Re = \frac{v d \rho_{cp}}{\mu_{cp}} \quad (14.9)$$

Где v , d – скорость осаждения и диаметр шарообразной частицы, ρ_{cp} и μ_{cp} – плотность и вязкость среды.

Определяющим линейным размером частицы нешарообразной формы служит диаметр эквивалент шара – диаметр шара, имеющего такой же объем, что и данная частица.

Критерий Архимеда:

$$Ar = \frac{d^3 \rho_{cp}^2 g}{\mu_{cp}^2} \cdot \frac{\rho - \rho_{cp}}{\rho_{cp}} \quad (14.10)$$

На основании экспериментальных данных получена зависимость коэффициента сопротивления ζ от критерия Рейнольдса Re , Рис.14-2.

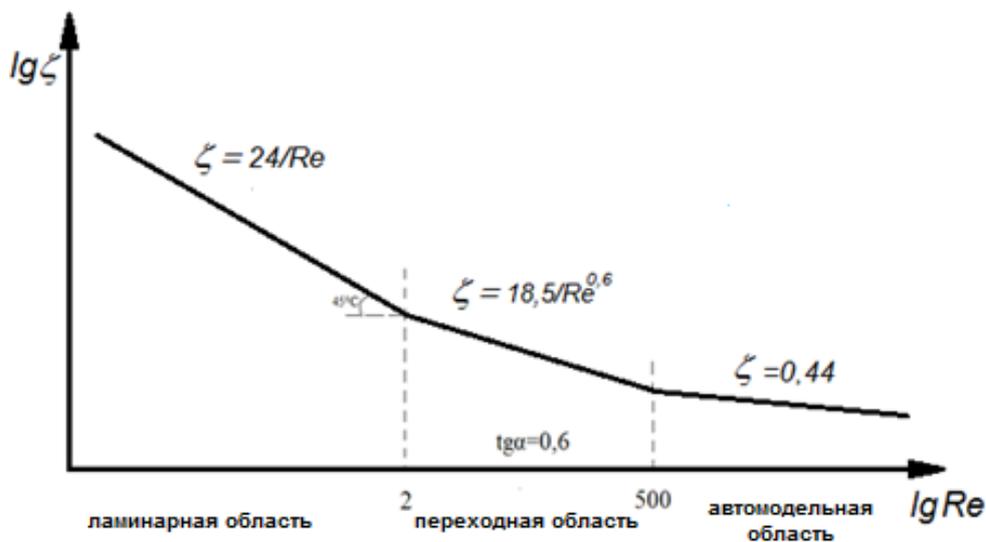


Рис.14-2. Зависимость коэффициента сопротивления ζ от критерия Рейнольдса Re .

Согласно графику можно выделить 3 области:

- 1) Ламинарная область (область действия закона Стокса) характерна для осаждения мелких частиц. В этой области гидравлическое сопротивление осаждению прямо пропорционально скорости $\Delta P \sim v^1$.

$$Re < 2$$

$$\zeta = 24/Re \quad (14.11)$$

$$Re = \frac{Ar}{18} \quad (14.12)$$

$$Ar < 36$$

2) Переходная область – наиболее часто возникает при осаждении частиц. В этой зоне гидравлическое сопротивление осаждению возрастает быстрее, чем в ламинарной области: $\Delta P \sim v^{1,4}$.

$$2 \leq Re \leq 500$$

$$\zeta = 18,5/Re^{0,6} \quad (14.13)$$

$$Re = 0,152 Ar^{0,714} \quad (14.14)$$

$$36 \leq Ar \leq 83\ 000$$

3) Автомодельная область - зона действия закона Ньютона.

В этой области гидравлическое сопротивление осаждению пропорционально квадрату скорости $\Delta P \sim v^2$. Коэффициент сопротивления не зависит от скорости/

$$Re > 500$$

$$\zeta = 44$$

$$Re = 1,74 \sqrt{Ar} \quad (14.15)$$

$$Ar > 83\ 000$$

Для тел не шарообразной формы сопротивление больше, чем для шарообразной.

Для всех режимов свободного осаждения можно пользоваться следующей формулой:

$$Re = \frac{Ar}{18 + 0,575 \sqrt{Ar}} \quad (14.16)$$

Последовательность расчета скорости свободного осаждения частицы v:

Свободное осаждение наблюдается, если частицы не влияют друг на друга.

1. Рассчитываем критерий Архимеда Ar по формуле (14.10) и определяем режим осаждения частицы;
2. Вычисляем критерий Рейнольдса Re по формулам (14.12), (14.14), (14.15)
3. Рассчитываем скорость осаждения шарообразной частицы из формулы (14.9)
4. Уточняем скорость осаждения, если частица не шарообразная по формуле:

$$v_{\text{нелифр}} = \varphi v$$

где φ – фактор формы, равен 1 для шарообразных частиц

$\varphi = 0,8 \div 0,95$ для округлых частиц, $\varphi = 0,44$ для пластинчатых частиц.

Стесненное осаждение

При концентрации частиц в суспензии более 5% они начинают влиять друг на друга. Такое осаждение называется стесненным, при этом скорость осаждения снижается.

Параметр, с помощью которого оценивается степень стесненности, называется порозностью, равный объемной доле жидкости в суспензии

$$\varepsilon = \frac{V}{V_{\text{сусп}}} \quad (14.17)$$

Для стесненного осаждения используют эмпирическую формулу:

$$Re_{cm} = \frac{Ar \cdot \varepsilon^{4,75}}{18 + 0,575 \sqrt{Ar \cdot \varepsilon^{4,75}}} \quad (14.18)$$

Если осаждается полидисперсная фаза, то скорость осаждения самых мелких частиц самая низкая. Такой слой осаждается более сложно: скорость осаждения крупных частиц замедляется; скорость осаждения самых мелких увеличивается – возникает, так называемое, коллективное осаждение.

Последовательность расчета скорости стесненного осаждения

- 1) Рассчитываем критерий Архимеда Ar по формуле (14.10);
- 2) Вычисляем критерий Рейнольдса Re_{cm} по формуле (14.18) с учетом (14.17);
- 3) Рассчитываем скорость стесненного осаждения шарообразной частицы из формулы (14.9);
- 4) Уточняем скорость осаждения, если частица не шарообразная.

ОТСТОЙНИКИ

Материальный баланс процесса разделения суспензий

При разделении суспензий образуется осветленная жидкость и осадок. В идеале осветленная жидкость не должна содержать твердых частиц. Влажный осадок состоит из твердых частиц и содержит некоторое количество жидкости.

$$\left. \begin{aligned} \dot{m}_{\text{сусп}} &= \dot{m}_{\text{осв}} + \dot{m}_{\text{ос}} \\ \dot{m}_{\text{сусп}} \bar{x}_{\text{сусп}} &= \dot{m}_{\text{осв}} \bar{x}_{\text{осв}} + \dot{m}_{\text{ос}} \bar{x}_{\text{ос}} \end{aligned} \right\} \quad (14.19)$$

$\dot{m}_{\text{сусп}}$ - массовый расход исходной суспензии; $\dot{m}_{\text{осв}}$ - массовый расход осветленной жидкости; $\dot{m}_{\text{ос}}$ - массовый расход осадка; $\bar{x}_{\text{сусп}}$, $\bar{x}_{\text{осв}}$, $\bar{x}_{\text{ос}}$ - массовая концентрация твердой фазы в суспензии, осветленной жидкости и в осадке, соответственно.

$$\dot{m}_{\text{осв}} = \dot{m}_{\text{сусп}} \frac{\bar{x}_{\text{ос}} - \bar{x}_{\text{сусп}}}{\bar{x}_{\text{ос}} - \bar{x}_{\text{осв}}} \quad (14.20)$$

Поверхность осаждения

Рассмотрим отстойник в виде параллелепипеда.

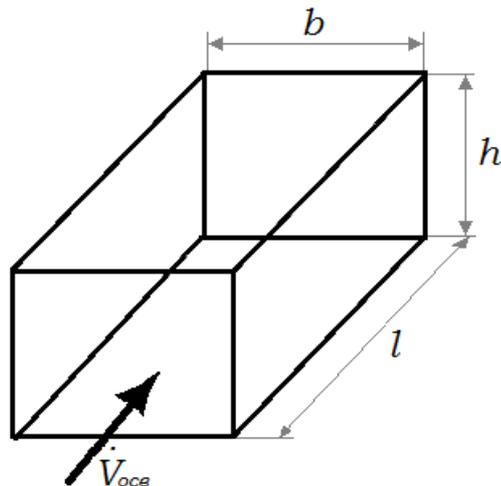


Рис.14-3.Схема отстойника

Объёмная производительность по осветленной жидкости:

$$V_{\text{осв}} = v_{\text{зоп}} S = v_{\text{зоп}} \cdot b \cdot h \quad (14.21)$$

где $v_{\text{зоп}}$ - средняя скорость, с которой жидкость перемещается в отстойнике

Время пребывания жидкости в отстойнике τ :

$$\tau = \frac{l}{v_{\text{зоп}}} \quad (14.22)$$

За это время необходимо полностью осветлить жидкость, т.е. осадить все частицы, включая находящиеся на максимальном расстоянии от дна отстойника, т.е. на расстоянии h :

$$\tau = \frac{h}{v} \quad (14.23)$$

где v – скорость осаждения частицы

Тогда из уравнений (14.22) и (14.23) можно записать:

$$l/v_{\text{зоп}} = h/v \quad (14.24)$$

$$l \cdot b \cdot h / V_{\text{осс}} = h/v \quad (14.25)$$

Обозначим поверхность осаждения А

$$A = l \cdot b \quad (14.26)$$

Тогда А равно:

$$A = V_{\text{осс}} / v \quad (14.27)$$

Выразим объемный расход осветленной жидкости через массовый расход

$$V_{\text{осс}} = \dot{m}_{\text{осс}} / \rho_{\text{осс}} \quad (14.28)$$

Подставим выражения (14.28) и (14.20) в уравнение (14.27) и получим поверхность отстойника

$$A = \frac{\dot{m}_{\text{осс}}}{\rho_{\text{осс}} \cdot v} = \frac{\dot{m}_{\text{сусп}}}{\rho_{\text{осс}} \cdot v} \cdot \frac{\bar{x}_{\text{ос}} - \bar{x}_{\text{сусп}}}{\bar{x}_{\text{ос}} - \bar{x}_{\text{осс}}} \quad (14.29)$$

На практике рассчитанную поверхность отстаивания увеличивают на 30-35 %.

Конструкции отстойников

Наиболее распространёнными процессами разделения гетерогенных систем являются процессы разделения суспензий, образующихся в ходе химических реакций с выпадением осадка, в процессе кристаллизации твёрдых веществ из их насыщенных растворов, в результате мокрой очистки газов и во многих других процессах.

Грубые суспензии с невысокой долей твёрдой фазы, имеющие сравнительно крупные частицы, плотность которых заметно выше плотности жидкости, способны разделяться под действием силы тяжести – седиментировать. Эти системы разделяют обычно отстаиванием в таких аппаратах, как одноярусные и многоярусные отстойники непрерывного действия.

Одноярусный отстойник непрерывного действия

Отстаивание суспензий проводят в аппаратах, называемых *отстойниками*. Отстойники для сгущения суспензий называют *сгустителями*, а для классификации твёрдых частиц на фракции – *классификаторами*. Широко распространены отстойники непрерывного действия с гребковой мешалкой (Рис.14-5). Они представляют собой

цилиндрический резервуар с коническим дном. В резервуаре расположена мешалка, снабжённая гребками, которые непрерывно перемещают осадок к центральному разгрузочному штуцеру. Кроме того, гребки мешалки разрушают слой осадка, способствуя удалению из него макрообъёмов жидкости, то есть способствуют обезвоживанию осадка.

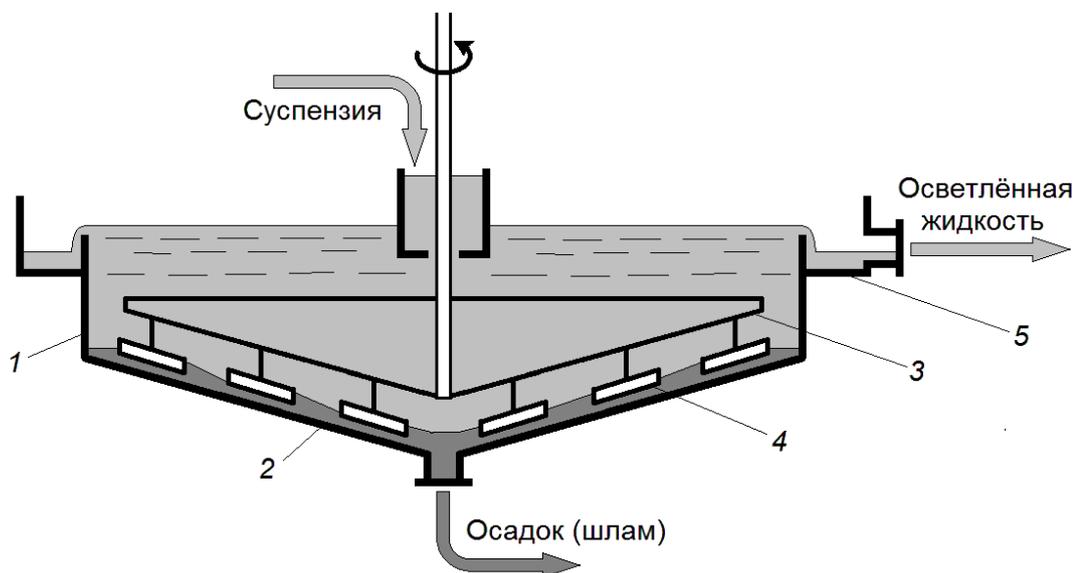


Рис. 14-5. Отстойник непрерывного действия:

1 – корпус; 2 – днище; 3 – гребковая мешалка; 4 – нож (гребок);
5 – кольцевой желоб для стока осветлённой жидкости

Частота вращения мешалки незначительна (менее половины оборота в минуту), поэтому процесс осаждения не нарушается. Суспензия непрерывно поступает по трубе в середину резервуара. Осветлённая жидкость переливается в кольцевой желоб и удаляется через штуцер. Осадок (шлам), представляющий собой сгущённую суспензию, удаляется через штуцер в коническом днище.

Отстойники с гребковой мешалкой обеспечивают однородность осадка и позволяют освободить его от воды до концентрации твёрдой фазы 35–55 %. Работа таких отстойников полностью автоматизирована. К недостаткам этих аппаратов следует отнести их громоздкость; диаметр нормализованных аппаратов от 1,8 до 30 м, в отдельных случаях применяются отстойники диаметром до 100 м. На рис. 49 представлены промышленные отстойники большого диаметра, применяемые для очистки сточных вод.

Многоярусный отстойник непрерывного действия

Для уменьшения площади, занимаемой отстойниками, применяют многоярусные отстойники. Они несложны по конструкции и обладают большой поверхностью.

Многоярусный отстойник непрерывного действия с коническими полками представлен на Рис.14-6. Поступающая в аппарат суспензия распределяется по каналам между коническими полками, на поверхности которых осаждаются твёрдые частицы. Осадок сползает по наклонной поверхности к стенкам корпуса и перемещается в нижнюю часть аппарата, откуда выводится. Осветлённая жидкость поступает в центральную трубу и выводится из верхней части аппарата.

Помимо большой поверхности осаждения к достоинствам отстойников этого типа относятся отсутствие движущихся частей и простота обслуживания. Однако влажность пульпы в них больше, чем влажность шлама в отстойниках с гребковой мешалкой.

Отстойник для разделения эмульсий

На Рис.14-7 показан отстойник непрерывного действия для разделения эмульсий. Он представляет собой горизонтальный резервуар с перфорированной перегородкой, которая предотвращает возмущение жидкости в отстойнике струёй эмульсии, поступающей в аппарат. Поперечное сечение отстойника выбирают таким, чтобы скорость течения жидкости в корпусе не превышала несколько миллиметров в секунду и режим течения был ламинарным, что предупреждает смешение фаз и улучшает процесс отстаивания. Расслоившиеся легкая и тяжёлая фазы выводятся с противоположенной стороны отстойника. Трубопровод для вывода тяжёлой фазы соединён с атмосферой для предотвращения засифонивания.

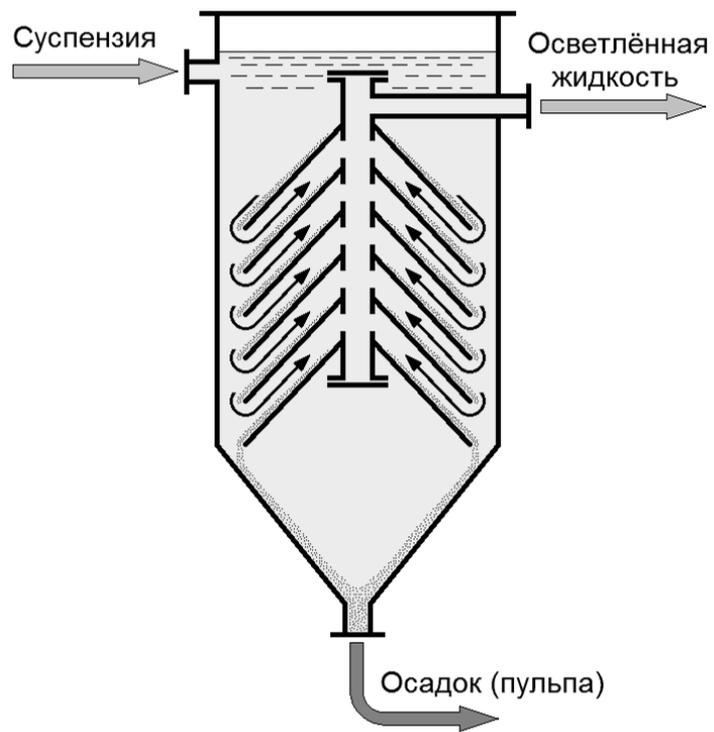


Рис. 14-6. Многоярусный отстойник непрерывного действия с коническими полками

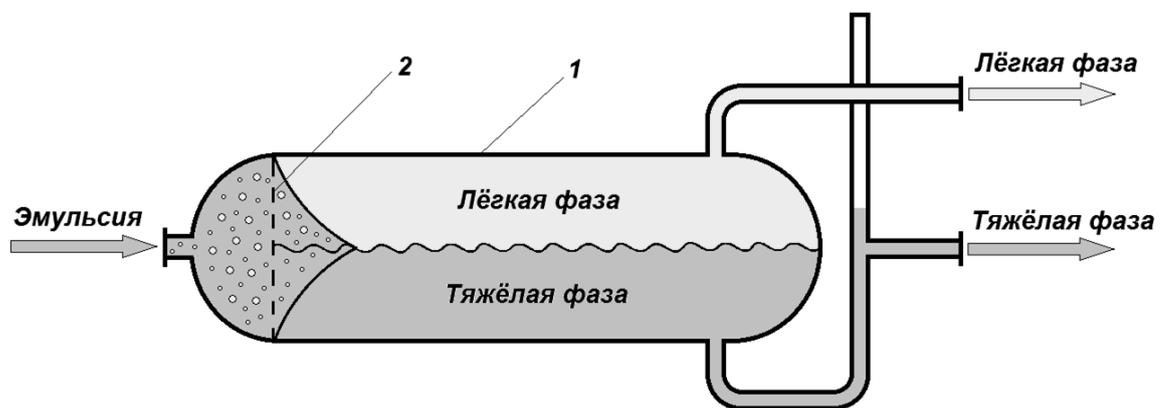


Рис. 14-7. Отстойник непрерывного действия для разделения суспензий:

1 – корпус; 2 – перфорированная перегородка

Достоинства и недостатки отстойников.

Преимущество отстойников заключено в

- простоте устройства и эксплуатации;
- большой поверхности осаждения;
- высокой надежности оборудования;
- повышенной экономичностью;
- возможности работать при высоких производительностях.

Основной недостаток отстойников – громоздкость, а также

- большая глубина (от 7 до 9 м) вертикальных отстойников, что значительно удорожает их строительную стоимость в слабых грунтах и при высоком стоянии грунтовых вод;
- невозможность обеспечить устойчивый гидравлический режим вследствие изменения плотности потока суспензии по сечению отстойника, в разное время суток, при различной температуре, концентрации твердой фазы и т.д.;
- высокая цена горизонтальных отстойников.