

ВВЕДЕНИЕ

К гидромеханическим процессам относятся такие процессы, скорость которых определяется законами гидродинамики – науки о движении жидкостей и газов. К этим процессам относятся перемещение жидкостей, сжатие и перемещение газов, разделение жидких и газовых неоднородных систем в поле сил тяжести (отстаивание), в поле центробежных сил (центрифугирование), а также под действием разности давлений при движении через пористый слой (фильтрация) и перемешивание жидкостей.

Неоднородными, или гетерогенными, системами называют системы, состоящие из двух или нескольких фаз. Фазы, составляющие систему, могут быть, в принципе, механически отделены одна от другой.

Любая неоднородная бинарная система состоит из дисперсной (внутренней) фазы и сплошной (внешней) фазы, в которой распределены частицы дисперсной фазы.

В зависимости от физического состояния фаз различают: суспензии, эмульсии, пены, пыли, дымы и туманы.

Суспензии – неоднородные системы, состоящие из жидкости и взвешенных в ней твердых частиц.

Эмульсии – системы, состоящие из жидкости и распределенных в ней капель другой жидкости, не смешивающейся с первой.

Пены – системы, состоящие из газа и распределенных в ней пузырьков газа.

Пыли и дымы – системы, состоящие из газа и распределенных в нем частиц твердого вещества. Пыли образуются обычно при механическом распределении частиц в газе (при дроблении, смешивании и транспортировке твердых материалов и др.). Дымы получаются в процессах конденсации паров (газов) при переходе их в жидкое или твердое состояние. При образовании дисперсной фазы из частиц жидкости возникают системы, называемые *туманами*.

Задачи разделения неоднородных систем встречаются в теплоэнергетике, химической, нефтехимической и многих других отраслях промышленности.

1. ОСАЖДЕНИЕ

Суспензии классифицируются на грубые, тонкие и взвеси. Очистка воды и других жидкостей от грубодисперсных примесей осуществляется обычно отстаиванием.

Отстаивание является более экономичным процессом, чем другие процессы разделения неоднородных систем, например фильтрование. Кроме того, разделение фильтрованием ускоряется при прочих равных условиях в случае предварительного сгущения фильтруемого материала. Поэтому отстаивание часто используют в качестве первичного процесса разделения, стремясь удалить возможно большие количества вещества из сплошной фазы.

При отстаивании неоднородных систем наблюдается постепенное увеличение концентрации диспергированных частиц в аппарате по направлению сверху вниз (рис. 1.1). Над слоем осадка (зона 1) образуется зона сгущенной суспензии (зона 2), в которой происходит *стесненное осаждение* частиц, сопровождающееся трением между частицами и их взаимными столкновениями. При этом более мелкие частицы тормозят движение более крупных, а частицы больших размеров увлекают за собой мелкие частицы, укоряя их движение. В результате наблюдается тенденция к сближению скоростей осаждения частиц различных размеров; возникает *коллективное*, или *солидарное*, осаждение частиц с близкими скоростями в каждом сечении аппарата, но с различными скоростями частиц по мере приближения к днищу аппарата. Замедление объясняется тормозящим действием жидкости, вытесняемой осаждающимися частицами и движущейся от неподвижной перегородки (днища) в направлении, обратном движению частиц.

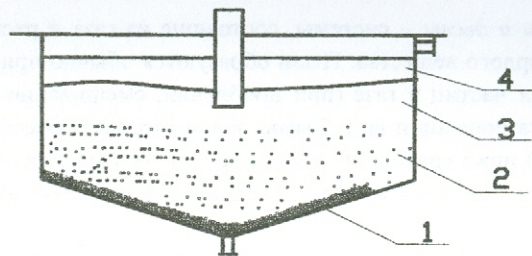


Рис. 1.1. Схема процесса отстаивания:

- 1 — слой осадка (шлам); 2 — зона сгущенной суспензии;
3 — зона свободного осаждения; 4 — осветленная жидкость

Как видно из рис. 1.1, образуется ясно выраженная граница между зоной стесненного осаждения (зона 2) и находящейся выше зоной свободного осаждения (зона 3), над которой располагается осветленная жидкость (зона 4). Такая схема несколько упрощает действительную картину процесса осаждения, которая обычно является еще более сложной вследствие образования между указанными выше основными зонами промежуточных (переходных) зон.

1.1. Конструкции отстойников

Отстаивание дисперсной фазы и жидкостей проводят в аппаратах, называемых отстойниками, или сгустителями. Различают аппараты периодического, непрерывного и полунепрерывного действия, причем непрерывно действующие отстойники, в свою очередь, делятся на одноярусные, двухъярусные и многоярусные.

Размеры и форма аппаратов периодического действия зависят от концентрации диспергированной фазы и размеров ее частиц. Чем крупнее частицы и чем больше их плотность, тем меньший диаметр может иметь аппарат. Скорость отстаивания существенно зависит от температуры, с изменением которой изменится вязкость жидкости.

Для отстаивания небольших количеств жидкости применяют отстойники в виде цилиндрических вертикально установленных резервуаров с коническим днищем, имеющим кран или люк для разгрузки осадка и несколько кранов для слива жидкости, установленных на корпусе на разной высоте.

Для отстаивания значительных количеств жидкости, например для очистки сточных вод, используют бетонные бассейны больших размеров или несколько последовательно соединенных резервуаров, работающих полунепрерывным способом: жидкость поступает и удаляется непрерывно, а осадок выгружается из аппарата периодически.

На рис. 1.2 показан отстойник полунепрерывного действия с наклонными перегородками.

Исходная суспензия подается через штуцер 1 в корпус 2 аппарата, внутри которого расположены наклонные перегородки 3, направляющие поток попеременно вверх и вниз. Наличие перегородок увеличивает время пребывания жидкости и поверхность осаждения в аппарате. Осадок собирается в конических днищах (бункерах) 4, откуда периодически удаляется в осветленную жидкость непрерывно отводится из отстойника через штуцер 5.

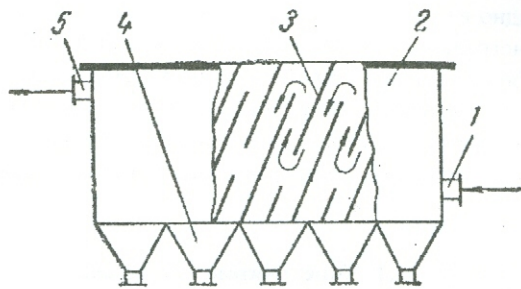


Рис. 1.2. Отстойник с наклонными перегородками:
1 – штуцер ввода исходной суспензии; 2 – корпус;
3 – наклонные перегородки; 4 – бункера для осадка;
5 – штуцер для отвода осветленной воды

Отстойник непрерывного действия с гребковой мешалкой (рис. 1.3) представляет собой невысокий цилиндрический резервуар 1 с плоским слегка коническим днищем и внутренним кольцевым желобом 2 вдоль верхнего края аппарата. В резервуаре установлена мешалка 3 с наклонными лопастями, на которых имеются гребки 4 для непрерывного перемещения осаждающегося материала к разгрузочному отверстию 7. Одновременно гребки слегка

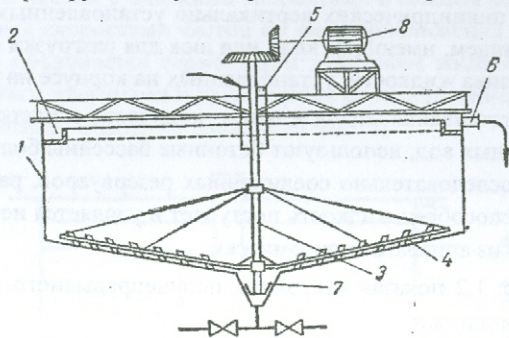


Рис. 1.3. Отстойник непрерывного действия с гребковой мешалкой:
1 – корпус; 2 – кольцевой желоб; 3 – мешалка; 4 – лопасти с гребками;
5 – труба для подачи исходной суспензии; 6 – штуцер для вывода осветленной жидкости; 7 – разгрузочное устройство для осадка (шлама);
8 – электродвигатель

взбалтывают осадок, способствуя этим более эффективному его обезвоживанию. Мешалка делает от 0,015 до 0,5 об/мин, т.е. вращается настолько медленно, что не нарушает процесса осаждения. Исходная жидкость непрерывно подается через трубу 5 в середину резервуара. Осветленная жидкость переливается в кольцевой желоб и удаляется через штуцер 6. Осадок (шлам) – текучая сгущенная суспензия (с концентрацией твердой фазы не более – 35–55 %) – удаляется из резервуара при помощи диафрагмового насоса. Вал мешалки приводится во вращение от электродвигателя 8 через редуктор.

При необходимости установки ряда отстойников значительных диаметров занимаемая ими площадь будет велика. В целях уменьшения этой площади применяют многоярусные отстойники, состоящие из нескольких аппаратов, установленных друг на друга. Различают многоярусные отстойники закрытого и сбалансированного типов.

Простейший многоярусный отстойник закрытого типа (рис. 1.4, а) представляет собой несколько отстойников, поставленных друг на друга и имеющих общий вал для гребковых мешалок и соответственно – общий привод. На рис. 1.4 для простоты показаны лишь два расположенных один над другим отстойника. В местах прохода вала сквозь днище каждого отстойника установлены уплотняющие сальники. Таким образом, в этих отстойниках слив осветленной жидкости и выгрузка осадка осуществляется отдельно из каждого яруса.

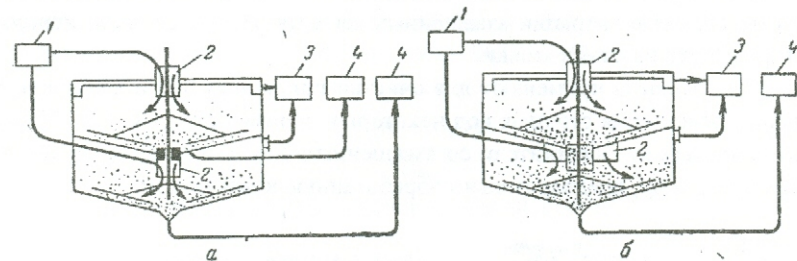


Рис. 1.4. Многоярусные отстойники закрытого (а) и сбалансированного (б) типов:

1 – распределитель исходной суспензии; 2 – труба-стакан для ввода суспензии в каждый ярус; 3 – коллектор для сбора осветленной жидкости;
4 – сборник осадка (шлама)

Более совершенным являются многоярусные отстойники сбалансированного, или уравновешенного типа (рис. 1.4, б). Такие отстойники также имеют общие вал и привод, но, в отличие от отстойников закрытого типа, их

ярус последовательно соединены по шламу: стакан для удаления шлама из каждого вышерасположенного яруса опущен нижним концом в слой сгущенного шлама нижерасположенного яруса.

Отстойники работают следующим образом: исходная суспензия из распределительного устройства 1 подается через стаканы 2 в каждый ярус. Сгущенный осадок при применении отстойника закрытого типа удаляется раздельно из каждого яруса в сборники 4, а в случае отстойника сбалансированного типа — только из нижнего яруса.

Песколовки применяют для предварительного выделения минеральных и органических загрязнений (0,2–0,25 мм) из сточных вод. Горизонтальные песколовки представляют собой резервуары с треугольным или трапециевидным поперечным сечением. Глубина песколовок 0,25–1 м. Скорость движения воды в них не превышает 0,3 м/с. Разновидностью горизонтальных песколовок являются песколовки с круговым движением воды в виде круглого резервуара конической формы с периферийным лотком для протекания сточной воды. Осадок собирается в коническом днище, откуда его направляют на переработку или в отвал. Применяются при расходах до 7000 м³/сут. Вертикальные песколовки имеют прямоугольную или круглую форму, в них сточные воды движутся с вертикальным восходящим потоком со скоростью 0,05 м/с.

Конструкцию песколовки выбирают в зависимости от количества сточных вод, концентрации взвешенных веществ. Наиболее часто используют горизонтальные песколовки.

Осветлители применяют для очистки природных вод и для предварительного осветления сточных вод некоторых производств (рис. 1.5). Используют, в частности, осветлители со взвешенным слоем осадка, через который пропускают воду, предварительно обработанную коагулянтном.

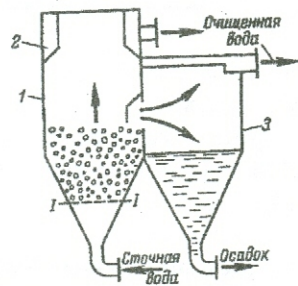


Рис. 1.5. Блок осветлителя:

- 1 — осветлитель;
- 2 — желоб;
- 3 — осадкоуплотнитель

Конструкции осветлителей весьма разнообразны и отличаются по следующим признакам: 1) по форме рабочей камеры; 2) по наличию или отсут-

ствию дырчатого днища под слоем взвешенного осадка; 3) по способу удаления избыточного осадка; 4) по конструкции и месту расположению осадкоуплотнителей.

Для интенсификации процесса первичного отстаивания труднооседающих веществ на станциях биологической очистки применяют отстойники-осветлители с естественной аэрацией, которые представляют собой вертикальные отстойники с внутренней камерой флокуляции.

1.2. Определение поверхности осаждения

Отстойники проектируются в расчете на осаждение самых мелких частиц, находящихся в исходной смеси. Поэтому время пребывания смеси, обрабатываемой в данном аппарате, должно быть больше времени осаждения или в пределе равно времени, необходимому для стесненного осаждения частиц наименьшего размера на дно аппарата с заданной высоты.

Для описания в критериальной форме процесса осаждения шарообразной частицы в неподвижной неограниченной среде могут быть применены критерии подобия: Архимеда Ar , Лященко Ly и Рейнольдса Re .

Наиболее удобной формой критериальной зависимости является $Ly = f(Ar)$.

При так называемом ламинарном режиме осаждения, когда критерии имеют значения $Ar < 3,6$; $Ly < 2 \cdot 10^{-3}$; $Re < 0,2$, Стоксом теоретически получена следующая формула для скорости осаждения $w_{ос}$ (в м/с) шарообразной частицы:

$$w_{ос} = \frac{d^2(\rho - \rho_c)g}{18\mu_c} \quad (1.1)$$

Для осаждения частицы в газовой среде формула (1.1) упрощается:

$$w_{ос} = \frac{d^2\rho g}{18\mu_c} \quad (1.2)$$

так как в этом случае величиной ρ_c можно пренебречь.

В формулах (1.1) и (1.2): d — диаметр шарообразной частицы, м; ρ — плотность частицы, кг/м³; ρ_c — плотность среды, кг/м³; μ_c — динамический коэффициент вязкости среды, Па·с (см. приложение); $g = 9,81 \text{ м/с}^2$ — ускорение свободного падения.

Определение скорости осаждения шарообразной одиночной частицы в неподвижной неограниченной среде по обобщенному методу, пригодному при любом режиме осаждения, осуществляют следующим образом.

Определяют критерий Архимеда:

$$Ar = Ga \frac{\Delta\rho}{\rho_c} = \frac{Re^2}{Fr} \frac{\rho - \rho_c}{\rho_c} = \frac{d^3(\rho - \rho_c)\rho_c g}{\mu_c^2}, \quad (1.3)$$

где $Ga = Re^2/Fr$ – критерий Галилея.

Для осаждения в газовой среде:

$$Ar = d^3 \rho \rho_c g / \mu_c^2. \quad (1.4)$$

По найденному значению критерия Ar определяют критерий Re или критерий Ly (рис. 1.6):

$$Ly = \frac{Re^3}{Ar} = \frac{Re Fr \rho_c}{\rho - \rho_c} = \frac{w_{oc}^3 \rho_c^2}{\mu_c (\rho - \rho_c) g} \quad (1.5)$$

либо (если среда – газ)

$$Ly = \frac{w_{oc}^3 \rho_c^2}{\mu_c \rho g}. \quad (1.6)$$

Далее вычисляют скорость осаждения:

$$w_{oc} = \frac{Re \mu_c}{\rho_c d} \quad (1.7)$$

или

$$w_{oc} = \sqrt[3]{Ly \mu_c (\rho - \rho_c) g / \rho_c^2}. \quad (1.8)$$

Для частицы неправильной формы скорость осаждения определяют тем же путем из критерия Лященко, но с подстановкой в критерий Архимеда вместо d величины d_3 .

Эквивалентный диаметр d_3 частицы неправильной формы вычисляют как диаметр условного шара, объем которого V равен объему тела неправильной формы:

$$d_3 = \sqrt[3]{6V/\pi} = 1,24 \sqrt[3]{M/\rho}, \quad (1.9)$$

где M – масса частицы, кг.

Диаметр осаждающейся шарообразной частицы при известной скорости осаждения находят обратным путем, т.е. вычисляют сначала критерий Лященко

$$Ly = \frac{w_{oc}^3 \rho_c^2}{\mu_c (\rho - \rho_c) g}$$

и по найденному значению Ly определяют критерий Ar (рис. 1.6); из последнего по формуле (1.3) вычисляют диаметр шарообразной частицы.

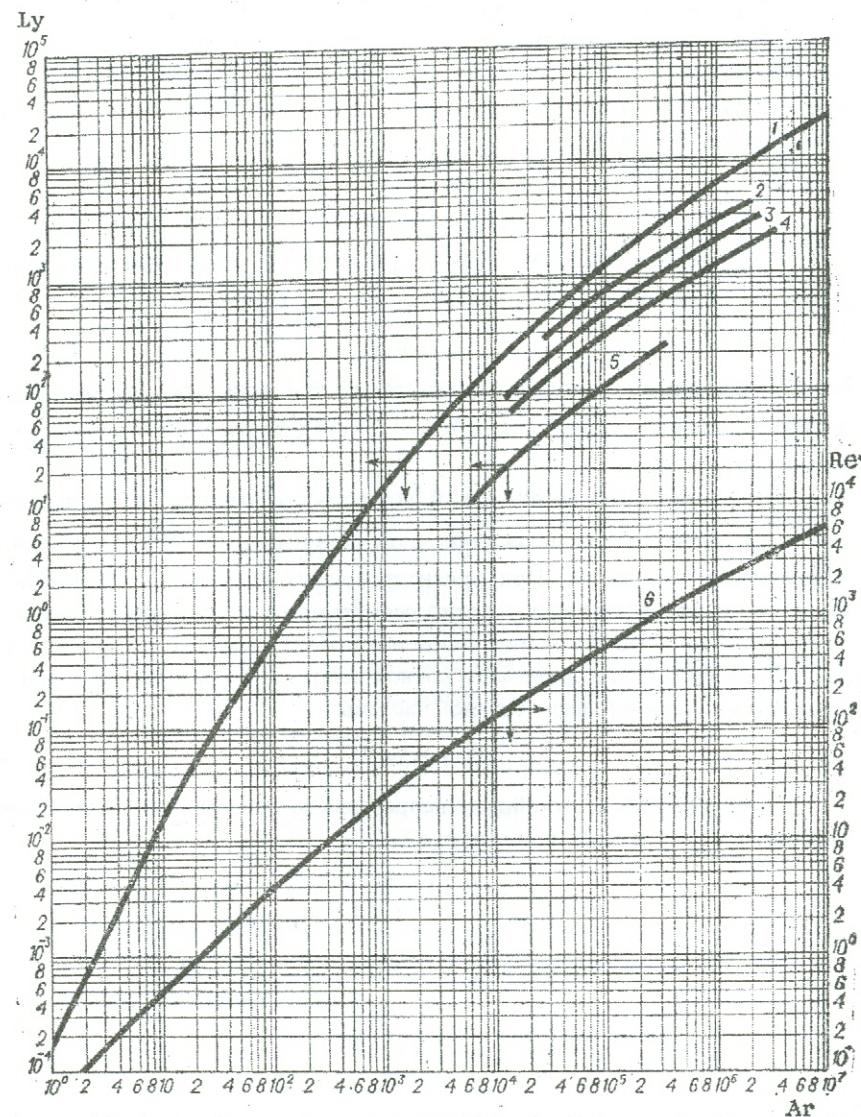


Рис. 1.6. Зависимость критериев Re и Ly от критерия Ar для осаждения одиночной частицы в неподвижной среде:

1 и 6 – шарообразные частицы; 2 – округленные частицы; 3 – угловатые частицы; 4 – продолговатые частицы; 5 – пластинчатые частицы

Эквивалентный диаметр осаждающейся частицы твердого тела неправильной формы при известной скорости осаждения определяют таким же путем. Сначала определяют критерий Lu по формуле (1.6), затем находят значение критерия Ag для частицы соответствующей формы и вычисляют ее эквивалентный диаметр:

$$d_3 = 3 \sqrt{\frac{Ar\mu_c^2}{(\rho - \rho_c)\rho_c g}} \quad (1.10)$$

Площадь осаждения F_{oc} (в m^2) пылеосадительной камеры или отстойника для суспензии (взвесей) определяется по формуле

$$F_{oc} = V / w'_{oc} \quad (1.11)$$

где V – объемный расход газа (жидкости), проходящей через аппарат параллельно поверхности осаждения, m^3/c ; w'_{oc} – средняя расчетная скорость осаждения частиц, m/c .

Отношение средней расчетной скорости стесненного осаждения частиц w'_{oc} к скорости осаждения одиночной частицы w_{oc} зависит от объемной концентрации суспензии. При ориентировочных расчетах, учитывая приближенно отличие реальных условий осаждения от теоретических (стесненность осаждения, форма частиц, движение среды), среднюю расчетную скорость осаждения часто принимают равной половине теоретической скорости осаждения одиночной шарообразной частицы:

$$w'_{oc} = 0,5w_{oc}$$

В применении к отстойнику непрерывного действия для отстаивания суспензий формула (1.11) принимает вид:

$$F = \frac{G_H \left(1 - \frac{c_H}{c_{cr}}\right)}{\rho_c w_{oc}} \quad (1.12)$$

или

$$F_{oc} = \frac{V_0(x_{cr} - x_H)}{w'_{oc} x_{cr}} \quad (1.13)$$

где F_{oc} – площадь осаждения отстойника, m^2 ; G_H – массовый расход начальной (разбавленной) суспензии, kg/c ; c_H – массовая концентрация твердой фазы в сгущенной суспензии, kg/kg ; c_{cr} – массовая концентрация твердой фазы в осветленной суспензии (шламе), kg/kg ; ρ_c – плотность осветленной жидкости, kg/m^3 ; V_0 – объемный расход жидкой фазы, содержащейся в на-

чальной суспензии, m^3/c ; x_H и x_{cr} – концентрации начальной суспензии и шлама, $\frac{kg \text{ твердой фазы}}{kg \text{ жидкой фазы}}$.

1.3. Примеры решения задач

Пример 1.1. Найти скорость осаждения в воде частиц кварцевого песка шарообразной формы диаметром 0,9 мм, если плотность песка 2650 kg/m^3 , а температура воды $20^\circ C$.

Решение. Определяем критерий Ag :

$$Ag = \frac{d^3(\rho - \rho_c)\rho_c g}{\mu_c^2} = \frac{0,9^3 \cdot 10^{-9} (2650 - 1000) 1000 \cdot 9,81}{1^2 \cdot 10^{-6}} = 1,18 \cdot 10^4,$$

где для воды $\mu_c = 1 \cdot 10^{-3} \text{ Па}\cdot\text{с}$.

По значению $Ag = 1,18 \cdot 10^4$ из рис. 1.6 находим $Re = 140$.

Скорость осаждения частиц кварцевого песка шарообразной формы диаметром 0,9 мм определяем из выражения

$$w_{oc} = \frac{Re\mu_c}{d\rho_c} = \frac{140 \cdot 1 \cdot 10^{-3}}{0,0009 \cdot 1000} = 0,15 \text{ м/с.}$$

Пример 1.2. Определить размер наибольших шарообразных частиц мела, которые будут уноситься восходящим потоком воды, идущим со скоростью 0,5 м/с. Температура воды $10^\circ C$, плотность мела 2710 kg/m^3 .

Решение. Определяем критерий Lu по формуле (1.6):

$$Lu = \frac{w_{oc}^3 \rho_c^2}{\mu_c (\rho - \rho_c) g} = \frac{0,5^3 \cdot 1000^3 \cdot 10^3}{1,3(2710 - 1000)9,81} = 5,72 \cdot 10^3,$$

где для воды при $10^\circ C$ $\mu_c = 1,3 \cdot 10^{-3} \text{ Па}\cdot\text{с}$.

По найденному значению $Lu = 5,72 \cdot 10^3$ из рис. 1.6 находим $Re = 1750$; затем по формуле (1.7) определяем максимальный диаметр частиц мела, которые будут уноситься водой:

$$d = \frac{Re\mu_c}{w_{oc}\rho_c} = \frac{1750 \cdot 1,3 \cdot 10^{-3}}{0,5 \cdot 1000} = 4,55 \cdot 10^{-3} \text{ м} = 4,55 \text{ мм.}$$

Пример 1.3. Найти скорость осаждения в воде при $20^\circ C$ частицы свинцового блеска угловатой формы с $d_3 = 1 \text{ мм}$. Плотность свинцового блеска 7560 kg/m^3 .

Решение. Определяем скорость осаждения частиц неправильной формы из критерия Lu , предварительно определив значение критерия Ag :

$$Ar = \frac{d^3(\rho - \rho_c)\rho_c g}{\mu_c^2} = \frac{1^3 \cdot 10^{-9}(7560 - 1000)1000 \cdot 9,81}{1^2 \cdot 10^{-6}} = 6,44 \cdot 10^4,$$

где $\mu_c = 1,3 \cdot 10^{-3}$ Па·с.

По графику (рис. 1.6) находим для частиц угловатой формы $Ly = 3,1 \cdot 10^2$.

Скорость осаждения по формуле (1.8):

$$w_{oc} = \sqrt[3]{Ly \mu_c (\rho - \rho_c) g / \rho_c^2} = \\ = \sqrt[3]{3,1 \cdot 10^2 \cdot 1 \cdot 10^{-3} (7560 - 1000) 9,81 / 1000^2} = 0,271 \text{ м/с.}$$

Пример 1.4. Определить диаметр отстойника для непрерывного осаждения отмученного мела в воде. Производительность отстойника 80 т/ч начальной суспензии, содержащей 8 % масс. CaCO_3 . Диаметр наименьших частиц, подлежащих осаждению, 35 мкм. Температура суспензии 15 °С. Влажность шлама 70 %. Плотность мела 2710 кг/м³.

Решение. Чтобы определить диаметр отстойника, надо вычислить необходимую площадь осаждения по формуле (1.12), для чего предварительно находят скорость осаждения:

$$w_{oc} = \frac{d^2(\rho - \rho_c)g}{18\mu_c} = \frac{3,5^2 \cdot 10^{-10}(2710 - 1000)9,81}{18 \cdot 1,14 \cdot 10^{-3}} = 0,001 \text{ м/с,}$$

где $\mu_c = 1,14 \cdot 10^{-3}$ Па·с.

Проверим значение критерия Re:

$$Re = \frac{w_{oc} d \rho_c}{\mu_c} = \frac{1 \cdot 10^{-3} \cdot 3,5 \cdot 10^{-5} \cdot 10^3}{1,14 \cdot 10^{-3}} = 0,0307 < 0,2.$$

Действительная скорость осаждения:

$$w'_{oc} = 0,5 \cdot 0,001 = 0,5 \cdot 10^{-3} \text{ м/с.}$$

Площадь отстойника:

$$F_{oc} = \frac{G_H \left(1 - \frac{c_H}{c_K}\right)}{3600 \rho_c w'_{oc}} = \frac{80 \cdot 10^3 \left(1 - \frac{8}{30}\right)}{3600 \cdot 10^3 \cdot 0,5 \cdot 10^{-3}} = 32,5 \text{ м}^2.$$

Диаметр отстойника:

$$D = \sqrt{32,5 / 0,785} = 6,4 \text{ м.}$$

1.4. Контрольные задачи

1.1. Найти соотношение диаметров частиц свинцового блеска ($\rho = 7800 \text{ г/м}^3$) и кварца ($\rho = 2600 \text{ кг/м}^3$), осаждающихся с одинаковой скоростью: а) в воздухе; б) в воде, считая, что осаждение происходит при $Re < 0,2$.

1.2. С какой скоростью будут осаждаться шарообразные частицы кварца ($\rho = 2600 \text{ кг/м}^3$) диаметром 10 мкм: а) в воде при 15 °С; б) в воздухе при 15 и 500 °С?

1.3. Определить диаметр отстойника для непрерывного уплотнения водной суспензии мела, имеющий температуру 35 °С. Остальные условия такие же, как в примере 1.4.

1.4. Как изменится производительность отстойника, если температуру одной суспензии повысить с 15 до 50 °С? В обоих случаях $Re < 0,2$.

1.5. Определить скорость осаждения в воде при 25 °С продолговатых частиц угля ($\rho = 1400 \text{ кг/м}^3$) и пластинчатых частиц сланца ($\rho = 2200 \text{ кг/м}^3$), имеющих эквивалентный диаметр 2 мм.

1.6. Рассчитать плотность водной суспензии, содержащей 10 % масс. твердой фазы. Относительная плотность твердой фазы равна 3.

1.7. Определить диаметр частиц свинцового блеска угловатой формы, осаждающихся со скоростью 0,25 м/с в воде при температуре 15 °С. Плотность свинцового блеска 7500 кг/м³.

2. ФИЛЬТРОВАНИЕ

Фильтрованием называют процесс разделения суспензий с использованием пористых перегородок, которые задерживают твердую фазу у суспензии и пропускают ее жидкую фазу.

Разделение суспензии, состоящей из жидкости и взвешенных в ней твердых частиц, производят при помощи фильтра (рис. 2.1), который в простейшем виде является сосудом, разделенным на две части фильтровальной перегородкой. Суспензию помещают в одну часть сосуда так, чтобы она соприкасалась с фильтровальной перегородкой. В разделенных частях сосуда создают разность давлений, под действием которой жидкость проходит через поры фильтровальной перегородки, причем твердые частицы задерживаются на ее поверхности. Таким образом, суспензия с помощью фильтра разделяет-

ся на чистый фильтрат и влажный осадок. Этот процесс разделения суспензии называют фильтрованием с образованием осадка.

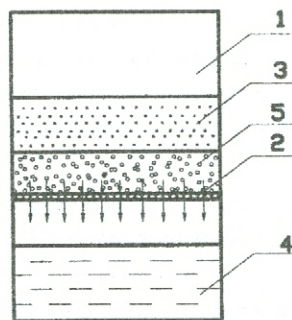


Рис. 2.1. Схема процесса фильтрования:

1 – фильтр; 2 – фильтровальная перегородка; 3 – суспензия;
4 – фильтрат; 5 – осадок

Иногда твердые частицы проникают в поры фильтровальной перегородки и задерживаются там, не образуя осадка. Такой процесс называют фильтрованием с закупориванием пор.

Если пространство над суспензией сообщают с источником сжатого газа (обычно воздуха) или пространство под фильтровальной перегородкой присоединяют к источнику вакуума, то происходит *процесс фильтрования при постоянной разности давлений*. При этом скорость процесса уменьшается в связи с увеличением сопротивления слоя осадка возрастающей толщины.

Если суспензию подают на фильтр поршневым насосом, производительность которого при данном числе оборотов электродвигателя постоянна, то осуществляется *процесс фильтрования при постоянной скорости*; при этом разность давлений увеличивается вследствие увеличения сопротивления слоя осадка возрастающей толщины.

Если суспензию транспортируют на фильтр центробежным насосом, производительность которого при данном числе оборотов электродвигателя уменьшается при возрастании сопротивления осадка, что обуславливает повышение разности давлений, то производится *процесс фильтрования при переменных разности давлений и скорости*.

2.1. Конструкции фильтров

Одной из основных характеристик, используемых для классификации фильтров, является периодичность или непрерывность их действия, в связи с чем они подразделяются на фильтры периодического и непрерывного действия. Для осуществления процессов фильтрования с образованием осадка применяют как периодически, так и непрерывно действующие фильтры. Для проведения процессов фильтрования с закупориванием пор используют фильтры периодического действия. На фильтрах периодического действия осуществляют любой режим фильтрования, на фильтрах непрерывного действия – практически только режим фильтрования при постоянной разности давлений.

В процессах очистки сточных вод, как правило, приходится иметь дело с большим количеством воды, поэтому применяют фильтры, для работы которых не требуется высоких давлений. Исходя из этого, используют фильтры с сетчатыми элементами (микрофильтры и барабанные сетки) и фильтры с фильтрующим зернистым слоем.

Фильтры с зернистым слоем подразделяют на медленные и скоростные, открытые и закрытые. Медленные фильтры используют для фильтрования некоагулированных сточных вод. Достоинством этих фильтров является высокая степень очистки сточных вод. Недостатки: большие размеры, высокая стоимость и сложная очистка от осадка.

Схема одного из скоростных фильтров показана на рис. 2.2.

Сточную воду в фильтр подают внутрь, где она проходит через фильтрующий материал и дренаж и удаляется из фильтра. После засорения фильтрующего материала проводят промывку подачей промывных сточных вод снизу вверх. Скоростные фильтры имеют более высокую производительность и большую продолжительность фильтрования.

Особенностью фильтра с подвижной загрузкой (рис. 2.3) является вертикальное расположение фильтрующей загрузки и горизонтальное движение фильтруемой воды. Фильтрующим материалом служит кварцевый песок (1,5–3 мм) или гранитный щебень (3–10 мм).

Сточная вода поступает в коллектор, откуда через каналы и отверстия поступает в фильтрующий слой. Очищенную воду отводят из фильтра через дренажную камеру. Загрязненный материал перекачивают гидроэлеватором по трубе в промывное устройство. Эффективность очистки составляет 50–55 %.

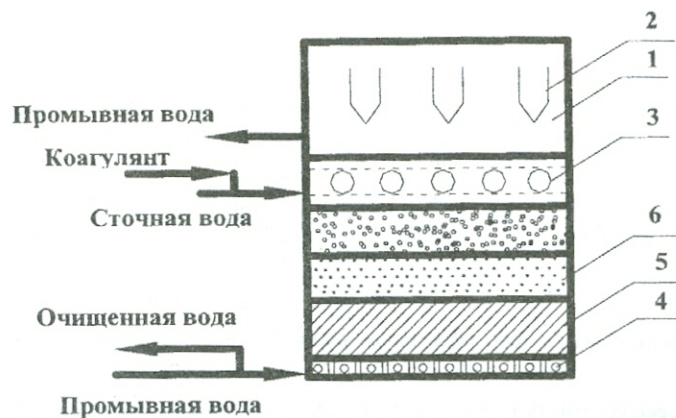


Рис. 2.2. Скоростной контактный фильтр:

1 – корпус; 2 – система удаления промывных вод; 3 – система подачи сточных вод; 4 – система подачи промывных вод; 5 – пористый дренаж; 6 – фильтрующий материал

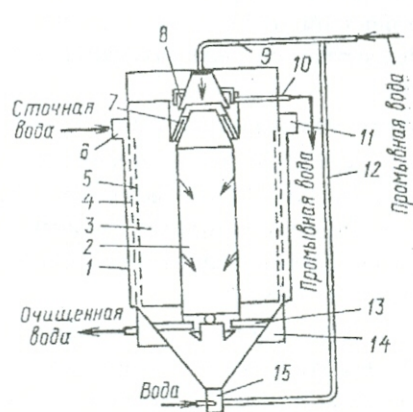


Рис. 2.3. Фильтр с подвижной загрузкой

Процесс микрофильтрации заключается в процеживании сточной воды через сетки с отверстиями размером от 40 до 70 мкм. Микрофильтры применяют для очистки сточных вод от твердых и волокнистых материалов. Схема одного из микрофильтров представлена на рис. 2.4.

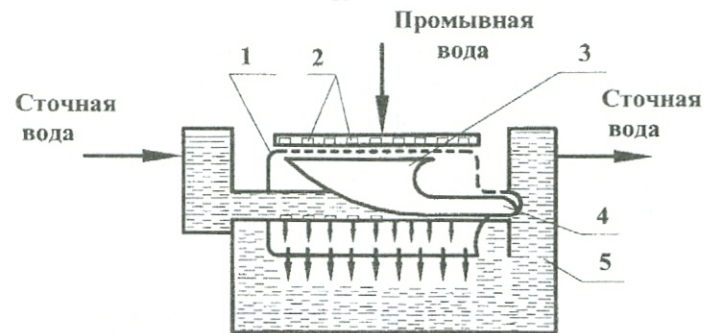


Рис. 2.4. Микрофильтр:

1 – вращающийся барабан; 2 – устройство для промывки; 3 – лоток для сбора промывных вод; 4 – труба для отвода промывных вод; 5 – камера для удаления осветленной воды

Сточная вода поступает внутрь барабана и через отверстия проходит в камеру. Взвешенные вещества задерживаются на внутренней поверхности барабана и при промывке с промывной водой поступают в лоток. При концентрации взвешенных частиц 15–20 мг/л эффективность очистки составляет 50–60 % в зависимости от состава и свойств сточных вод, размера ячеек и режима работы микрофильтров.

2.2. Расчет фильтров

При $\Delta p = \text{const}$ объем фильтрата V , прошедшего через 1 м^2 фильтрующей поверхности за время τ , и продолжительность фильтрования τ связаны уравнением:

$$V^2 + 2VC = K\tau, \quad (2.1)$$

где C – константа фильтрования, характеризующая гидравлическое сопротивление фильтрующей перегородки (ткани), $\text{м}^3/\text{м}^2$; K – константа фильтрования, учитывающая режим процесса фильтрования и физико-химические свойства осадка и жидкости, $\text{м}^2/\text{с}$; τ – продолжительность фильтрования, с.

Константы C и K определяются опытным путем.

Скорость фильтрования [$\text{в м}^3/(\text{м}^2 \text{с})$] в данный момент определяется по уравнению

$$\frac{dV}{d\tau} = \frac{K}{2(V+C)}. \quad (2.2)$$

По этому уравнению может быть рассчитана и скорость промывки осадка промывной жидкостью, если вязкость промывной жидкости равна вязкости фильтрата и если промывная жидкость проходит тем же путем, что и фильтрат. При этих условиях скорость промывки равняется скорости фильтрования в конечный момент.

Видоизмененное уравнение (2.2) записывают в форме:

$$\frac{d\tau}{dV} = \frac{2}{K}V + \frac{2C}{K}. \quad (2.3)$$

Уравнение выражает прямолинейную зависимость между величинами $d\tau/dV$ и V и применяется для определения констант C и K по экспериментальным данным. Для этой цели откладывают по оси абсцисс измеренные значения V_1, V_2, \dots , а по оси ординат – соответствующие измеренные значения $\Delta\tau_1/\Delta V_1, \Delta\tau_2/\Delta V_2, \dots$.

Проведя по экспериментальным точкам прямую, находят затем K и C из уравнений: $\text{tg}\beta = 2/K, m = 2C/K$.

Константа фильтрования K (в $\text{м}^2/\text{с}$), отнесенная к 1 м^2 фильтрующей поверхности, при $\Delta p = \text{const}$ связана с удельным сопротивлением осадка:

$$K = \frac{2\Delta p}{\mu \cdot \rho_{\text{ос}} \cdot r}, \quad (2.4)$$

где Δp – перепад давлений на фильтре, Па; μ – динамический коэффициент вязкости фильтрата, Па·с (см. приложение); r – удельное сопротивление осадка (в расчете на 1 кг содержащегося в нем твердого сухого вещества), м/кг; $\rho_{\text{ос}}$ – масса сухого твердого вещества, отлагающегося на фильтре при прохождении через фильтрующую поверхность 1 м^3 фильтрата, $\text{кг}/\text{м}^3$.

Величина $\rho_{\text{ос}}$ (в $\text{кг}/\text{м}^3$) может быть выражена через концентрацию фильтруемой суспензии x следующим образом:

$$\rho_{\text{ос}} = \frac{\rho x}{1 - mx}. \quad (2.5)$$

Здесь ρ – плотность фильтрата, $\text{кг}/\text{м}^3$; x – массовая концентрация твердой фазы в суспензии, $\text{кг}/\text{кг}$; m – масса влажного осадка в расчете на 1 кг содержащегося в нем сухого вещества, $\text{кг}/\text{кг}$.

При постановке значения $\rho_{\text{ос}}$ в уравнение (2.4) получаем следующую формулу для константы K (в $\text{м}^2/\text{с}$):

$$K = \frac{2\Delta p(1 - mx)}{\mu \cdot r \cdot x \cdot \rho}. \quad (2.6)$$

Если известна константа фильтрования K , то удельное сопротивление осадка r может быть найдено из уравнения (2.4), решенного относительно r (в м/кг сухого остатка):

$$r = \frac{2\Delta p(1 - mx)}{K \cdot \mu \cdot x \cdot \rho}. \quad (2.7)$$

Константа фильтрования C (в $\text{м}^3/\text{м}^2$), характеризующая сопротивление фильтра и отнесенная к 1 м^2 поверхности фильтра, при $\Delta p = \text{const}$ определяется следующим выражением:

$$C = \frac{r_{\text{тк}}}{r \cdot \rho_{\text{ос}}} \quad (2.8)$$

или в соответствии с уравнением (2.5)

$$C = \frac{r_{\text{тк}}(1 - mx)}{r \cdot x \cdot \rho}, \quad (2.9)$$

где $r_{\text{тк}}$ – удельное сопротивление фильтра (на 1 м^2 поверхности), $\text{м}/\text{м}^2$; r – удельное сопротивление осадка, м/кг.

Следовательно, если значение константы фильтрования C (в $\text{м}^3/\text{м}^2$) известно, то удельное сопротивление фильтра может быть вычислено по формуле

$$r_{\text{тк}} = \frac{C \cdot r \cdot x \cdot \rho}{1 - mx}. \quad (2.10)$$

Концентрация промывной воды в любой момент времени от начала основного (диффузионного) периода промывки может быть вычислена по уравнению

$$Y = Y_1 \cdot e^{-\frac{Kw\tau}{\delta}}. \quad (2.11)$$

Здесь Y_1 – концентрация промывной воды в начале процесса; e – основание натуральных логарифмов ($e = 2,718$); K – коэффициент, учитывающий физико-химические свойства осадка и промывной воды, а также режим промывки (находится экспериментальным путем); w – удельная интенсивность промывки или скорость прохождения промывной воды, $\text{м}^3/(\text{м}^2 \cdot \text{с})$; τ – продолжительность промывки, с; δ – толщина слоя осадка, м.

Уравнение (2.11) после логарифмирования принимает вид:

$$\frac{\tau_2 - \tau_1}{\lg Y_1 - \lg Y_2} = \frac{2,3\delta}{Kw}, \quad (2.12)$$

где τ_1 и τ_2 – время начала и конца наблюдений в любой период процесса диффузионной промывки; Y_1 и Y_2 – соответствующие концентрации промывной воды.

Из уравнений (2.11) и (2.12) может быть найдена продолжительность промывки τ , т.е. время, необходимое для заданного изменения концентрации вымываемого вещества в осадке, а также величина коэффициента K .

Количество сухого вещества G (в кг) в осадке, получаемом на фильтре, зависит от количества собранного фильтрата V , плотности фильтрата ρ , массовой доли твердой фазы в суспензии x , влажности осадка (выражаемой массовым соотношением m) и может быть вычислена по формуле

$$G = V \cdot \rho_{\text{ос}} = V \frac{\rho x}{1 - mx}. \quad (2.13)$$

Концентрация твердой фазы в суспензии x в зависимости от плотности суспензии ρ_c выражается формулой

$$x = \frac{(\rho_c - \rho)\rho_{\text{ТВ}}}{(\rho_{\text{ТВ}} - \rho)\rho_c}. \quad (2.14)$$

Плотность суспензии:

$$\rho_c = \frac{\frac{n+1}{1} + \frac{n}{\rho_{\text{ТВ}}}}{\rho_{\text{ТВ}} + \rho} = \frac{\rho(1+n)\rho_{\text{ТВ}}}{\rho + \rho_{\text{ТВ}}n}. \quad (2.15)$$

В этих формулах x – массовая концентрация твердой фазы в суспензии, кг/кг; ρ_c – плотность суспензии, кг/м³; ρ – плотность жидкой фазы, кг/м³; $\rho_{\text{ТВ}}$ – плотность твердой фазы, кг/м³; n – масса жидкой фазы в суспензии на единицу массы твердой фазы (Т: Ж = 1: n).

По формуле (2.15) можно вычислить и плотность влажного осадка, рассматривая его как концентрированную суспензию.

2.3. Примеры решения задач

Пример 1. Определить продолжительность фильтрования 10 дм³ жидкости через 1 м² фильтра, если при предварительном испытании фильтра с 1 м² было собрано фильтрата: 1 дм³ через 2,25 мин и 3 дм³ через 14,5 мин после начала фильтрования.

Решение. По опытным данным находим экспериментальные константы K и C в уравнении фильтрования:

$$V^2 + 2VC = K\tau.$$

Для этого составляем два уравнения с двумя неизвестными:

$$1^2 + 2 \cdot 1 \cdot C = K \cdot 2,25; \quad 3^2 + 2 \cdot 3 \cdot C = K \cdot 14,5,$$

откуда $K = 0,77 \text{ дм}^6/(\text{м}^4 \cdot \text{мин})$ и $C = 0,37 \text{ дм}^3/\text{м}^2$.

Пример 2. В условиях предыдущей задачи определить длительность промывки осадка, если количество промывной воды составляет 2,4 дм³/м² и промывка идет по линии основного фильтра.

Решение. Пренебрегая различием в динамических коэффициентах вязкости фильтрата и промывной воды, будем считать, что скорость промывки равна скорости фильтрования в конечный момент.

Скорость фильтрования в конечный момент определим по уравнению (2.2) с использованием данных предыдущего примера:

$$\frac{dV}{d\tau} = \frac{K}{2(V+C)} = \frac{0,77}{2(10+0,37)} = 0,037 \text{ дм}^3/(\text{м}^2 \cdot \text{мин}).$$

Продолжительность промывки:

$$\tau_{\text{пр}} = \frac{V_{\text{пр}}}{(dV/d\tau)_{\text{пр}}} = \frac{2,4}{0,037} = 65 \text{ мин.}$$

Пример 3. Во время опытного фильтрования водной суспензии с содержанием 13,9 % карбоната кальция при 20 °С на лабораторном фильтр-прессе с $F = 0,1 \text{ м}^2$ и толщиной осадка 50 мм были получены данные, приведенные в таблице.

Определить константы фильтрования: K (в м³/ч) и C (в м³/м²).

При избыточном давлении		Собрано фильтрата, дм ³	Время от начала опыта, с
Па	кгс/см ²		
3,43·10 ⁴	0,35	2,92	146
		7,80	888
10,3·10 ⁴	1,05	2,45	50
		9,80	660

Решение. Численные значения констант фильтрования найдем из уравнения (2.1):

При избыточном давлении 3,43·10⁴ Па (0,35 кгс/см²) результаты опытов дают:

$$V_1 = \frac{2,92}{1000 \cdot 0,1} = 2,92 \cdot 10^{-2} \text{ м}^3/\text{м}^2; \quad \tau_1 = \frac{146}{3600} = 0,0405 \text{ ч};$$

$$V_2 = \frac{7,8}{1000 \cdot 0,1} = 7,8 \cdot 10^{-2} \text{ м}^3/\text{м}^2; \quad \tau_2 = \frac{888}{3600} = 0,246 \text{ ч}.$$

Подставляем пересчитанные величины в уравнение (2.1) и решаем систему уравнений:

$$(2,92 \cdot 10^{-2})^2 + 2 \cdot 2,92 \cdot 10^{-2} C = K \cdot 0,0405;$$

$$(7,8 \cdot 10^{-2})^2 + 2 \cdot 7,8 \cdot 10^{-2} C = K \cdot 0,246,$$

откуда $K = 278 \cdot 10^{-4} \text{ м}^2/\text{ч}$; $C = 4,7 \cdot 10^{-3} \text{ м}^3/\text{м}^2$.

Пример 4. В условиях предыдущего примера рассчитать удельное сопротивление осадка карбоната кальция. Дополнительно известно, что влаж-

ность осадка при $p_1 = 3,43 \cdot 10^4$ Па ($0,35$ кгс/см²) равнялась 37 %, а при $p_2 = 10,3 \cdot 10^4$ Па ($1,05$ кгс/см²) – 32 % от массы влажного осадка.

Решение. Удельное сопротивление осадка рассчитываем по формуле (2.7).

Давление фильтрования $\Delta p = p_1 = 3,43 \cdot 10^4$ Па.

Плотность фильтрата $\rho = 1000$ кг/м³.

Динамический коэффициент вязкости фильтрата при 20 °С:

$$\mu = \frac{1}{3600} 10^{-3} = 27,8 \cdot 10^{-8} \text{ кг/(м·ч)}.$$

Константа фильтрования (при давлении $p_1 = 3,43 \cdot 10^4$ Па) $K = 278 \cdot 10^4$ м²/ч.

Массовая доля твердой фазы в суспензии $x = 0,139$.

Массовое отношение влажного осадка к сухому $m = 1/(1 - 0,37) = 1,59$.

Количество фильтрата на 1 кг суспензии $1 - mx = 1 - 1,59 \cdot 0,139 = 0,799$.

Найденные величины подставляем в формулу (2.7):

$$r = \frac{2\Delta p(1 - mx)}{K_{\text{црх}}} = \frac{2 \cdot 3,43 \cdot 10^4 \cdot 0,779}{278 \cdot 10^{-4} \cdot 27,8 \cdot 10^{-8} \cdot 1000 \cdot 0,139} = 5 \cdot 10^{10} \frac{\text{м}}{\text{кг сухого осадка}}.$$

При давлении фильтрования $10,3 \cdot 10^4$ Па, т.е. $1,05$ кгс/см², имеем:

$$K = 560 \cdot 10^{-4} \text{ м}^2/\text{ч}; \quad m = \frac{1}{1 - 0,32} = 1,47;$$

$$1 - mx = 1 - 1,47 \cdot 0,139 = 0,795.$$

Остальные величины имеют те же значения, что и при $p_1 = 3,43 \cdot 10^4$ Па, т.е. $0,35$ кгс/см².

Новое удельное сопротивление осадка можно найти путем подстановки численных значений этих величин в формулу (2.7) или из соотношения:

$$\frac{r_2}{r_1} = \frac{\Delta p_2 K_1 (1 - mx)_2}{\Delta p_1 K_2 (1 - mx)_1} = \frac{10,3 \cdot 10^4 \cdot 278 \cdot 10^{-4} \cdot 0,795}{3,43 \cdot 10^4 \cdot 560 \cdot 10^{-4} \cdot 0,779} = 1,52,$$

откуда $r_2 = 5 \cdot 10^{10} \cdot 1,52 = 7,6 \cdot 10^{10}$ м/кг сухого осадка.

Пример 5. Сколько времени необходимо отмывать осадок на фильтр-прессе от NaCl, чтобы достигнуть концентрации 5 г/дм³, допустимой в промывной воде? Промывка ведется чистой водой. Интенсивность промывки $0,33$ м³/дм³. Толщина слоя осадка 35 мм. Константа промывки $K = 520$ см³/дм³. В начальный момент промывки концентрация NaCl в промывной воде 143 г/дм³.

Решение. Воспользуемся уравнением (2.12), подставив в него заданные величины в соответствующих единицах измерения: $\delta = 0,035$ м; $w = 0,33$ м³/(м²·ч); $K = 520 \cdot 0,001$ м³/м³. Тогда

$$\tau = \frac{2,3 \cdot 0,035}{520 \cdot 0,001 \cdot 0,33} (\lg 143 - \lg 5) = 0,683 \text{ ч} = 41 \text{ мин.}$$

2.4. Контрольные задачи

2.1. Какое количество влажного осадка будет собрано на фильтре в результате фильтрования 10 м³ суспензии относительного удельного веса 1,12, содержащей 20 % масс. твердой фазы? Влажность осадка 25 %.

2.2. В результате фильтрования водной суспензии с содержанием 20 % масс. твердой фазы собрано 15 м³ фильтрата. Влажность осадка 30 %. Сколько получено осадка, считая на сухое вещество?

2.3. Время фильтрования 20 м³ раствора на рамном фильтр-прессе 2,5 ч. Найти ориентировочное время промывки осадка 2 м³ воды, полагая приближенно, что скорость промывки в 4 раза меньше скорости фильтрования в конечный момент. Сопротивлением ткани пренебречь. Динамические коэффициенты вязкости фильтрата и промывной воды одинаковы.

2.4. Как изменится время промывки осадка в условиях предыдущей задачи, если μ фильтрата $1,5 \cdot 10^{-3}$ Па·с, а промывочной воды $1 \cdot 10^{-3}$ Па·с.

2.5. Определить константу скорости промывки K при следующих условиях: интенсивность промывки 10 дм³/(м²·мин); толщина лепешки 25 мм; начальная концентрация соли в фильтрате промывной воды 40 г/дм³, конечная – 0,5 г/дм³; время промывки 1 ч 40 мин.

2.6. Найти теоретическое время промывки осадка на фильтре при следующих условиях: интенсивность промывки 6 дм³/(м²·мин); толщина лепешки 30 мм; начальная концентрация отмываемой соли в фильтрате промывной воды 120 г/дм³, конечная – 2 г/дм³. Константа скорости промывки K , по опытным данным, равняется 350 см³/дм³.

2.7. Как изменится производительность фильтра, если: 1) вдвое увеличить фильтрующую поверхность; 2) вдвое увеличить давление (при однородном несжимаемом осадке); 3) вдвое увеличить концентрацию твердого вещества в фильтруемой суспензии; 4) вдвое уменьшить (повышая температуру) вязкость фильтрата; 5) вдвое увеличить время полного оборота фильтра (т.е. увеличить толщину слоя осадка)?

3. ЦЕНТРИФУГИРОВАНИЕ

Наиболее эффективным процессом разделения жидкостей от дисперсной фазы является центрифугирование.

Под *центрифугированием* понимают процесс разделения неоднородных систем, в частности эмульсий и суспензий, в поле центробежных сил с использованием сплошных или непроницаемых для жидкости перегородок. Процессы центрифугирования проводятся в машинах, называемых центрифугами.

Центрифуга представляет собой в простейшем виде вертикальный цилиндрический ротор со сплошными или перфорированными боковыми стенками. Ротор укрепляется на вертикальном валу, который приводится во вращение электродвигателем, и помещается в соосный цилиндрический неподвижный кожух, закрываемый съемной крышкой; на внутренней поверхности ротора с перфорированными стенками находится фильтровальная ткань или тонкая металлическая сетка.

В *отстойных центрифугах* со сплошными стенками производят разделение эмульсии и суспензий по принципу отстаивания, причем действие силы тяжести заменяется действием центробежной силы.

В *фильтрующих центрифугах* с проницаемыми стенками осуществляется процесс разделения суспензий по принципу фильтрования, причем вместо разности давлений используется действие центробежной силы.

Общие закономерности центрифугирования имеют сходство с закономерностями отстаивания и фильтрования. Однако процессы в отстойниках и фильтрах. Это обусловлено тем, что в центрифугах вместо силы тяжести и разности давлений действует центробежная сила, достигающая значительной величины, а вместо плоских слоев жидкости и осадка образуются слои с цилиндрическими граничными поверхностями, усложняющими зависимость процесса от геометрических факторов.

Разделение эмульсий в отстойных центрифугах обычно называют *сепарацией*, а устройства, в которых осуществляется этот процесс, — *сепараторами*. Примером такого процесса является отделение сливок от молока.

Разделение суспензии в фильтрующих центрифугах называют *центробежным фильтрованием*. Примером такого процесса является отделение маточного раствора от нитрофенола.

Процессы центрифугирования осуществляются периодически или непрерывно.

3.1. Устройство центрифуг

По величине фактора разделения центрифуги можно условно разделить на две группы: *нормальные центрифуги* и *сверхцентрифуги*.

Нормальные центрифуги применяются главным образом для разделения различных суспензий, за исключением суспензий с очень малой концентрацией твердой фазы, а также для удаления влаги из штучных материалов. Сверхцентрифуги служат для разделения эмульсий и тонкодисперсных суспензий.

Нормальные центрифуги могут быть отстойными и фильтрующими. Сверхцентрифуги являются аппаратами отстойного типа и подразделяются на *трубчатые сверхцентрифуги*, используемые для разделения тонкодисперсных суспензий, и *жидкостные сепараторы*, служащие для разделения эмульсий.

Существенным признаком типа центрифуг является способ выгрузки из них осадка. Выгрузка производится вручную, при помощи ножей или скребков, шнеков и поршней, движущихся возвратно-поступательно (пульсирующих), а также под действием силы тяжести и центробежной силы.

По расположению оси вращения различают вертикальные, наклонные и горизонтальные центрифуги.

В зависимости от организации процесса центрифуги делятся на периодически и непрерывно действующие.

На рис. 3.1 изображена трехколонная центрифуга. Аппараты этого типа относятся к нормальным отстойным или фильтрующим центрифугам периодического действия с выгрузкой осадка вручную.

В трехколонной фильтрующей центрифуге разделяемая суспензия загружается в перфорированный ротор 1, внутренняя поверхность которого покрыта фильтровальной тканью или металлической сеткой. Ротор при помощи конуса 2 установлен на валу 3, который приводится во вращение электродвигателем посредством клиноременной передачи. Жидкая фаза суспензии проходит сквозь ткань (или сетку) и отверстия в стенке ротора и собирается в дне 4 станины, покрытом неподвижным кожухом 5, откуда отводится для дальнейшей обработки. Осадок, образовавшийся на стенках ротора, извлекается при помощи лопатки, после открывания крышки кожуха 6.

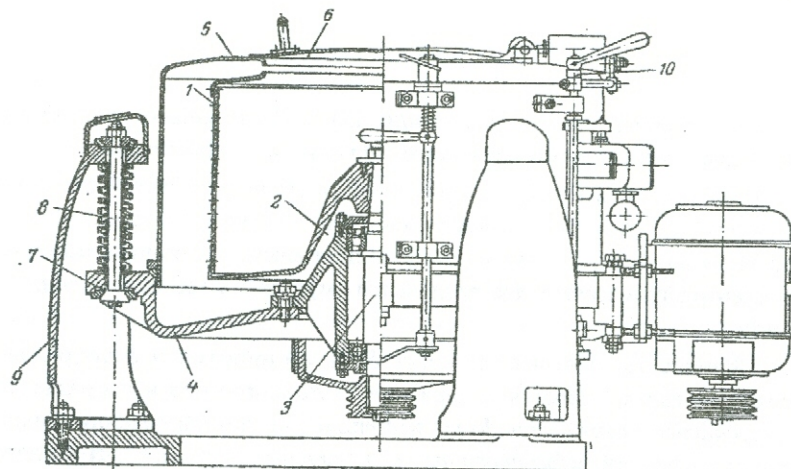


Рис. 3.1. Трехколонная центрифуга:

- 1 – перфорированный ротор; 2 – опорный конус; 3 – вал;
4 – дно станины; 5 – неподвижный кожух; 6 – крышка кожуха;
7 – станина; 8 – тяга; 9 – колонка; 10 – ручной тормоз

Для смягчения воздействия вибраций на фундамент станина 7 с укрепленным на ней ротором, приводом и кожухом подвешена при помощи вертикальных тяг 8 с шаровыми головками на трех расположенных под углом 120° колонках 9. Это обеспечивает некоторую свободу при вибрации ротора. Центрифуга снабжена тормозом, который может быть приведен в действие только после остановки электродвигателя.

Такие центрифуги отличаются небольшой высотой и хорошей устойчивостью и получили распространение для проведения длительного центрифугирования.

В горизонтальной фильтрующей центрифуге с ножевым устройством (рис. 3.2) операции загрузки суспензии, центрифугирования, промывки, механической сушки осадка и его выгрузки выполняются автоматически. Центрифуга управляется электрогидравлическим автоматом, позволяющим по толщине слоя осадка контролировать степень заполнения ротора.

Суспензия поступает в перфорированный ротор 1 по трубе 2 и равномерно распределяется в нем. На внутренней поверхности ротора расположены подкладные сита, фильтровальная ткань и решетка, которая обеспечивает

плотное прилегание сит к ротору во избежание их выпучивания, что недопустимо при ножевом сьеме осадка. Ротор находится в литом кожухе 3, состоящем из нижней стационарной части и съемной крышки. Фугат удаляется из центрифуги через штуцер 4. Осадок срезается ножом 5 (который при вращении ротора поднимается при помощи гидравлического цилиндра 6), падает в направляющий наклонный желоб 7 и удаляется из центрифуги через канал 8.

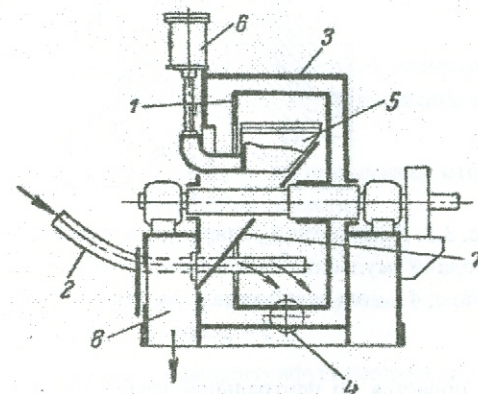


Рис. 3.2. Горизонтальная центрифуга с ножевым устройством для удаления осадка:

- 1 – перфорированный ротор; 2 – труба для подачи суспензии;
3 – кожух; 4 – штуцер для удаления фугата; 5 – нож;
6 – гидравлический цилиндр для подъема ножа; 7 – наклонный желоб;
8 – канал для удаления осадка

Описанная центрифуга предназначена для разделения средне- и грубодисперсных суспензий. Центрифуги такой конструкции являются нормальными или фильтрующими центрифугами периодического действия с автоматическим управлением.

Жидкостные сепараторы являются отстойными сверхцентрифугами непрерывного действия с вертикальным ротором. В жидкостном сепараторе тарельчатого типа (рис. 3.3) обрабатываемая смесь в зоне отстаивания разделена на несколько слоев, как это делается в отстойниках для уменьшения пути, проходимого частицей при оседании.

где w_2 – установившаяся по достижении заданной частоты вращения окружная скорость вращения барабана (на внешней поверхности его с радиусом R_2), м/с; M_6 – масса барабана, кг.

Работа T_2 (в Дж), затрачиваемая на преодоление инерции загрузки в пусковой период (объем загруженного материала принят равным половине полного объема барабана):

$$T_2 = 0,75w_1^2\rho V / 4, \quad (3.7)$$

где w_1 – окружная скорость вращения на внутреннем радиусе барабана R_1 , м/с; ρ – плотность загруженного материала, кг/м³; V – полный объем барабана центрифуги, равный $\pi R_1^2 H$, м³.

Мощность N_1 (в Вт), расходуемая на преодоление инерции барабана и загрузки во время пускового периода:

$$N_1 = (T_1 + T_2) / \tau, \quad (3.8)$$

где τ – продолжительность пускового периода, с.

По практическим данным τ обычно составляет 1–3 мин.

б) Мощность N_2 (в Вт), расходуемая на трение вала в подшипниках:

$$N_2 = \lambda M w_b g, \quad (3.9)$$

где λ – коэффициент трения, равный 0,07 – 0,1; M – масса всех вращающихся частей центрифуги вместе с загрузкой, кг; w_b – окружная скорость вращения цапфы вала, м/с.

в) Мощность N_3 (в Вт), расходуемая на трение стенки барабана о воздух:

$$N_3 = 2,94 \cdot 10^{-3} \beta R_2^2 w_2^3 \rho_v, \quad (3.10)$$

где ρ_v – плотность воздуха, кг/м³; β – коэффициент сопротивления, равный в среднем 2,3.

г) Полный расход мощности N_T (в Вт) для центрифуги периодического действия в пусковой период:

$$N_T = N_1 + N_2 + N_3. \quad (3.11)$$

С учетом КПД передаточного устройства $\eta_{\text{п}}$ расходуемая мощность:

$$N = N_T / \eta_{\text{п}}. \quad (3.12)$$

Расчет толщины стенки барабана центрифуги или проверка стенки на прочность могут быть сделаны по уравнению

$$K_z = \frac{C_1 + C_2}{2f}, \quad (3.13)$$

где K_z – допускаемое напряжение материала стенки барабана на разрыв, Па; f – площадь сечения стенки барабан, м²; C_1 – центробежная сила полукольца стенки барабан, Н; C_2 – центробежная сила полукольца загрузки, Н.

Величины C_1 и C_2 рассчитываются по уравнению (3.1). При этом расстояние R (в м) от центра тяжести вращающегося полукольца до оси вращения определяется по формуле

$$R = \frac{4}{3\pi} \frac{R_2^3 - R_1^3}{R_2^2 - R_1^2}, \quad (3.14)$$

где R_1 и R_2 – внутренний и наружный радиусы полукольца, м.

Производительность V (объемный расход поступающей суспензии) отстойной центрифуги с ножевым съемом осадка типа АОГ (в м³/с) при ламинарном режиме осаждения определяется по уравнению

$$V = F' w_{\eta}, \quad (3.15)$$

где $F' = 2\pi R_0 L$ – поверхность зеркала суспензии в барабане, м²; R_0 – внутренний радиус кольцевого слоя суспензии, м; L – длина барабана, м; $w = w_{\text{ос}} f$ – скорость осаждения частиц под действием центробежной силы, м/с; $w_{\text{ос}}$ – скорость осаждения частиц под действием силы тяжести, м/с; f – фактор разделения, определяемый по радиусу R_0 ; η – коэффициент, учитывающий отношение действительной и теоретической производительности центрифуги, который при отсутствии опытных данных можно принимать равным 0,4–0,5; он зависит от скольжения жидкости относительно барабана, а также учитывает наличие вихрей, затрудняющих осаждение.

Формула (3.15) может быть приведена к удобному для расчетов виду:

$$V_{\text{ч}} = 25,3 \eta L n^2 R_0^2 w_{\text{ос}} k, \quad (3.16)$$

где k – отношение времени подачи суспензии (время собственно центрифугирования) к общему времени работы центрифуги.

б) Производительность V (в м³/ч) по суспензии центрифуги НОГШ (непрерывнодействующей отстойной горизонтальной со шнековой выгрузкой осадка) определяется по уравнению:

$$V = 3,5 \left[D_{\text{сл}}^2 L_{\text{сл}} (\rho - \rho_c) d^2 n^2 \right] / \mu, \quad (3.17)$$

где $D_{\text{сл}}$ и $L_{\text{сл}}$ – диаметр и длина «сливного цилиндра», м; ρ и ρ_c – плотность частиц и среды, кг/м³; d – крупность разделения (диаметр наименьших осаждаемых частиц), м; n – частота вращения ротора, об/мин; μ – динамический коэффициент вязкости среды, Па·с (см. приложение).

Производительность V (в м³/с) трубчатой сверхцентрифуги (по питанию) определяется из следующего выражения:

$$V \leq w V_{\text{ж}} / h, \quad (3.18)$$

где w – скорость осаждения частиц в центробежном поле, м/с;
 $V_{ж} = 0,785(D^2 - D_0^2)L$ – объем жидкости в барабане, м³; h – глубина потока в барабане, м; L – длина рабочей части барабана, м; D – внутренний диаметр барабана, м; D_0 – диаметр сливного порога, м.

Условием хорошей работы сверхцентрифуги расчетного диаметра является наличие ламинарного режима движения потока в барабане.

3.3. Примеры решения задач

Пример 3.1. Центрифуга периодического действия имеет барабан с внутренним диаметром 1200 мм, высотой 550 мм, толщиной стенок 10 мм и массой 120 кг. Число отверстий в стенке барабана по вертикали 12, диаметр отверстий 5 мм. На барабан надеты три стальных обруча сечением 15×30 мм² каждый. Материал барабана – сталь с временным сопротивлением на разрыв 4500 кгс/см², масса загрузки 400 кг, толщина слоя 200 мм. Найти предельно допустимую частоту центрифуги, если запас прочности не должен быть менее 5.

Решение. Для данной стали допускаемое напряжение на разрыв:

$$K_z = 4500 \cdot 0,81 \cdot 10^4 / 5 = 8,83 \cdot 10^7 \text{ Па, или } 900 \text{ кгс/см}^2.$$

Площадь сечения стенки барабана и обручей за вычетом отверстий:

$$f = 55 \cdot 1 - 12 \cdot 1 \cdot 0,5 + 3 \cdot 3 \cdot 1,5 = 62,5 \text{ см}^2 = 6,25 \cdot 10^{-3} \text{ м}^2.$$

Из формулы (3.13) следует, что максимально допустимая центробежная сила:

$$C_1 + C_2 = 8,83 \cdot 10^7 \cdot 2 \cdot 6,25 \cdot 10^{-3} = 1,1 \cdot 10^6 \text{ м}^2.$$

Расстояние от центра тяжести полукольца стенки барабана до оси вращения находим по формуле (3.14):

$$R_6 = \frac{3}{3 \cdot 3,14} \frac{0,61^3 - 0,6^3}{0,61^2 - 0,6^2} = 0,387 \text{ м.}$$

Центробежная сила, развиваемая половиной барабана, согласно уравнению (3.1):

$$C_1 = 0,011 \cdot 60 \cdot 0,387 \cdot n^2 = 0,253 n^2 \text{ Н.}$$

Расстояние от центра тяжести полукольца загрузки до оси вращения:

$$R_3 = \frac{3}{3 \cdot 3,14} \frac{0,6^3 - 0,4^3}{0,6^2 - 0,4^2} = 0,32 \text{ м.}$$

Центробежная сила, развиваемая полукольцами загрузки:

$$C_2 = 0,011 \cdot 200 \cdot 0,32 \cdot n^2 = 0,697 n^2 \text{ Н.}$$

Общая центробежная сила:

$$C_1 + C_2 = 0,253 n^2 + 0,697 n^2 = 0,950 n^2 \text{ Н.}$$

Выше было найдено, что центробежная сила не должна превышать $1,1 \cdot 10^6$ Н. Следовательно, максимально допустимая частота вращения центрифуги:

$$n = \sqrt{1,1 \cdot 10^6 / 0,950} = 1070 \text{ об/мин} = 17,8 \text{ с.}$$

Пример 3.2. Определить часовую производительность (по питанию) автоматической осадительной центрифуги АОГ-800 при работе ее на водной суспензии гидрооксида магния. Плотность частиц $\rho = 2525$ кг/м³. Температура суспензии 30 °С. Наименьший диаметр частиц 3 мкм. Характеристика центрифуги: диаметр барабана 800 мм; длина барабана 400 мм; диаметр борта 570 мм; частота вращения 1200 об/мин. Цикл работы центрифуги составляет 20 мин; из них 18 мин – подача суспензии, 2 мин – разгрузка осадка.

Решение. Производительность определяем по формуле (3.16):

$$V_{ч} = 25,3 \eta L n^2 R_0^2 w_{ос} k.$$

Скорость осаждения частиц находим по формуле Стокса:

$$w_{ос} = \frac{d^2 (\rho - \rho_c) g}{18 \mu_c} = \frac{3^2 (2525 - 1000) 9,81}{10^{12} \cdot 18 \cdot 0,8 \cdot 10^{-3}} = 0,935 \cdot 10^{-5} \text{ м/с.}$$

Динамический коэффициент вязкости воды при 30 °С $\mu_c = 0,8 \cdot 10^{-3}$ Па·с.

Определяем скорость осаждения под действием центробежной силы:

$$w = w_{ос} \frac{R_0 n^2}{900} = 0,935 \cdot 10^{-5} \frac{0,285 \cdot 1200^2}{900} = 4,26 \cdot 10^{-3} \text{ м/с.}$$

Проверяем режим осаждения:

$$Re = \frac{w d \rho_c}{\mu_c} = \frac{4,26 \cdot 10^{-3} \cdot 3 \cdot 10^{-6} \cdot 10^3}{0,8 \cdot 10^{-3}} = 1,6 \cdot 10^{-2},$$

т.е. режим ламинарный.

Далее находим:

$$k = 18/20 = 0,9.$$

Производительность центрифуги, принимая $\eta = 0,45$:

$$V_{ч} = 25,3 \cdot 0,45 \cdot 0,4 \cdot 1200^2 \cdot 0,285^2 \cdot 0,935 \cdot 10^{-5} \cdot 0,9 = 4,46 \text{ м}^3/\text{ч.}$$

Пример 3.3. Определить, какую производительность может обеспечить трубчатая сверхцентрифуга СГО-150 с трехлопастной крыльчаткой, работающая на осветлении минерального масла. Плотность масла $\rho_c = 900 \text{ кг/м}^3$. Динамический коэффициент вязкости масла при температуре центрифугирования $3 \cdot 10^{-3} \text{ Па}\cdot\text{с}$. Плотность твердых частиц $\rho = 1400 \text{ кг/м}^3$. Диаметр частиц 1 мкм. Техническая характеристика центрифуги: внутренний диаметр барабана 150 мм, диаметр сливного порога 50 мм, длина барабана 750 мм, частота вращения 13 000 об/мин.

Решение. Производительность определяем по формуле (3.18).

Так как частицы очень малы, то режим осаждения их будет, вероятно, ламинарным. Воспользуемся формулой Стокса с последующей проверкой режима осаждения:

$$w_{oc} = \frac{d^2(\rho - \rho_c)g}{18\mu_c} = \frac{1^2(1400 - 900)9,81}{10^{12} \cdot 18 \cdot 3 \cdot 10^{-3}} = 9,06 \cdot 10^{-8} \text{ м/с.}$$

Скорость осаждения под действием центробежной силы:

$$w = w_{oc}f = 9,06 \cdot 10^{-8} \cdot 4700 = 4,26 \cdot 10^{-4} \text{ м/с.}$$

Здесь

$$f = n^2 R_0 / 900 = 13^2 \cdot 10^6 \cdot 0,025 / 900 = 4700.$$

Проверяем режим осаждения:

$$Re = \frac{wd\rho_c}{\mu_c} = \frac{4,26 \cdot 1 \cdot 900}{10^4 \cdot 10^6 \cdot 3 \cdot 10^{-3}} = \frac{1,42}{10^4}.$$

Найдем полезный объем барабана центрифуги:

$$V_{ж} = FL = 0,785(D^2 - D_0^2)L = 0,785(0,15^2 - 0,05^2)0,75 = 0,0118 \text{ м}^3.$$

Глубина потока в барабане:

$$h = \frac{D - D_0}{2} = \frac{0,15 - 0,05}{2} = 0,05 \text{ м.}$$

3.4. Контрольные задачи

3.1. Определить удельное давление на стенки барабана центрифуги, если толщина слоя жидкости 10 см, внутренний диаметр барабана 1 м, частота вращения 500 об/мин. Плотность жидкости 1100 кг/м^3 .

3.2. Вывести формулу, по которой можно вычислить скорость центрифугирования твердых шарообразных частиц, исходя из закона Стокса. Частота вращения измеряется в об/с.

3.3. Во сколько раз быстрее произойдет осаждение одних и тех же частиц в центрифуге, чем в отстойнике, если барабан центрифуги имеет $D = 1 \text{ м}$ и $n = 600 \text{ об/мин}$? Режим осаждения в обоих случаях ламинарный.

3.4. Как изменится производительность фильтрующей центрифуги, если увеличить частоту ее вращения вдвое? Осадок однородный несжимаемый. Сопротивлением фильтрующей ткани пренебречь.

3.5. Отстойная горизонтальная автоматическая центрифуга АОГ-1800 должна работать на водной суспензии мела. Определить производительность центрифуги по питанию, если температура суспензии $40 \text{ }^\circ\text{C}$. Размер наименьших частиц мела 2 мкм, плотность мела $\rho = 2200 \text{ кг/м}^3$. Техническая характеристика центрифуги: диаметр барабана 1800 мм, длина барабана 700 мм, диаметр борта 1300 мм, частота вращения $n = 735 \text{ об/мин}$; КПД принять равным 0,45; $k = 0,8$ – отношение времени подачи суспензии к общему времени работы центрифуги.

3.6. Определить производительность шнековой осадительной центрифуги НОГШ-600, работающей на водной суспензии гипса при температуре $50 \text{ }^\circ\text{C}$. Наименьшие частицы гипса в суспензии имеют диаметр 2 мкм, плотность гипса $\rho = 2240 \text{ кг/м}^3$. Техническая характеристика центрифуги: диаметр сливного цилиндра 480 мм; длина зоны осаждения 350 мм; частота вращения барабана 1400 об/мин.

3.7. Осаждение частиц какого диаметра обеспечит центрифуга НОГШ-230, если на разделение подавать $3 \text{ м}^3/\text{ч}$ водной суспензии каолина при $35 \text{ }^\circ\text{C}$? Техническая характеристика центрифуги: диаметр сливного цилиндра 180 мм; длина его 164 мм; плотность каолина $\rho = 2200 \text{ кг/м}^3$; частота вращения барабана 1600 об/мин.

3.8. Найти частоту вращения центрифуги, если известно, что высота барабана $H = 0,5 \text{ м}$. Давление у стенок барабана должно быть $0,5 \text{ МПа}$. Загружено 400 кг суспензии.

Физические свойства воды

$t, ^\circ\text{C}$	$\rho, \text{кг/м}^3$	$\mu \cdot 10^6, \text{Па}\cdot\text{с}$
0	1000	1790
10	1000	1310
20	998	1000
30	996	804
50	988	549
60	983	470
70	978	406
80	972	355
90	965	315
100	958	282