

УДК 622.7.017.2; 622.794.252

В.А. Козлов**ОБЕЗВОЖИВАНИЕ УГОЛЬНОГО ШЛАМА
В ФИЛЬТРУЮЩИХ ЦЕНТРИФУГАХ**

Рассмотрены принципы работы фильтрующих центрифуг, предназначенных для обезвоживания угольного шлама. Приведены основы теории объемной фильтрации применительно к центрифугам.

Ключевые слова: обезвоживание угля, центробежная сила, фильтрация.

Принцип обезвоживания материала в фильтрующих центрифугах основан на том, что под действием центробежной силы жидкость и твердые частицы перемещаются к фильтрующей поверхности, которая представляет собой перфорированную стенку вращающейся корзины. Твердые частицы удерживаются стенкой корзины, и в результате формируется осадок, в то время как жидкость проникает через осадок и перфорированную стенку корзины. Перфорированная стенка может быть в виде сита из трапециевидной проволоки (шпальт) или тонкой перфорированной пластины, расположенной с внутренней стороны корзины или клетки. Иногда применяется промывка осадка с подачей чистой воды на сформированный осадок и последующим его осушением. Существуют различия между типами фильтрующих центрифуг относительно условия подачи питания — периодической или непрерывной, и способа удаления осадка из корзины. В данной статье рассматриваются только принципы объемной фильтрации воды в центрифуге.

Из крупных частиц осадок формируется быстро, через него происходит фильтрование жидкости и далее через перфорированную стенку удаля-

ется вода и часть тонких твердых частиц. Этот продукт, прошедший через перфорированную стенку корзины называется фугатом. Некоторые полезные математические отношения могут быть получены после тщательного рассмотрения проблемы.

Объемная скорость фильтрации Q для корзины с осевой длиной b может быть определена законом Дарси. На рис. 1 показана схема трех зон — осадка, бассейна (выделено серым) и перфорированной стенки, которые оказывают сопротивление движению жидкости.

Во вращающейся системе цилиндрических координат, скорость фильтрации $u(R)$, согласно закону Дарси, определяется выражением:

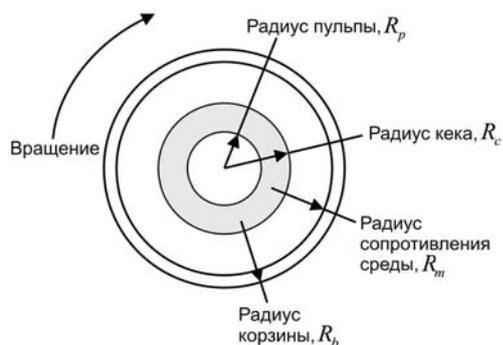


Рис. 1. Сечение корзины фильтрующей центрифуги

$$u = -\frac{K}{\mu} \left(\frac{dp}{dR} - \rho \Omega^2 R \right),$$

где μ и ρ — вязкость и плотность жидкости, Ω — угловая скорость корзины центрифуги, и K — коэффициент проницаемости осадка (m^2), который связан с удельным сопротивлением осадка α_s (м/кг) отношением $\alpha_s K \rho_s = 1$, где ρ_s — плотность твердого. R_p , R_s и R_m — радиусы поверхности жидкости в бассейне, поверхности осадка и внутренней поверхности перфорированной стенки корзины, соответственно. Эти величины обозначены на рис. 1.

Следует отметить, так как $\frac{dp}{dr} < 0$,

скорость фильтрации u является положительной величиной вдоль увеличивающегося радиуса, который показывает, что потоки жидкости направлены в направлении уменьшения градиента давления. Другая движущая сила относительно скорости фильтрации и, действующая, вдоль увеличивающегося радиуса является центробежным ускорением $\rho \Omega^2 R$, второй член в скобках в уравнении (1). Учитывая закон сохранения массы:

$$\tilde{Q} = \frac{Q}{b} = 2\pi R u = const$$

или

$$\tilde{Q} = -2\pi R \frac{K}{\mu} \left(\frac{dp}{dR} - \rho \Omega^2 R \right) = const,$$

где \tilde{Q} — уровень фильтрации на единицу длины корзины. Для сформированного осадка, его проницаемость K является постоянной величиной, и уравнение (2, б) может быть интегрировано между радиусом поверхности осадка R_c и радиусом перфорированной стенки корзины R_m .

Иначе может также использоваться среднее значение проницаемости для толщины осадка. Таким образом:

$$p_m - p_c = -\frac{\mu \tilde{Q}}{2\pi K} \ln \left(\frac{R_m}{R_c} \right) + \frac{1}{2} \rho \Omega^2 (R_m^2 - R_c^2), \quad (1)$$

где p_m и p_c давление на перфорированной стенке и на поверхности осадка.

Интегрирование давления $\frac{dp}{dr} = \frac{1}{2\rho\Omega^2 R}$ между поверхностью бассейна R_c и поверхностью осадка R_c дает следующее уравнение:

$$p_c - p_p = \frac{1}{2} \rho \Omega^2 (R_c^2 - R_p^2),$$

где p_p — давление на поверхности воды бассейна, которое также соответствует атмосферному давлению. Очевидно, что распределение давления в жидкости бассейна выше осадка является квадратичным.

Разумно принять, подобно закону Дарси, что снижение давления через перфорированную стенку корзины пропорционально расходу фугата. Следовательно:

$$p_m - p_b = \mu r_m \frac{\tilde{Q}}{2\pi} R_b, \quad (2, a)$$

где p_b — давление на стенке корзины, которая соприкасается с окружающим пространством. Отметим, что снижение давления через перфорированную стенку также включает снижение давления через тонкую корку уплотненного осадка, соприкасающейся с перфорированной стенкой корзины. Это учтено коэффициентом r_m , как учитывающим сопротивление корки осадка и перфорированной стенки корзины.

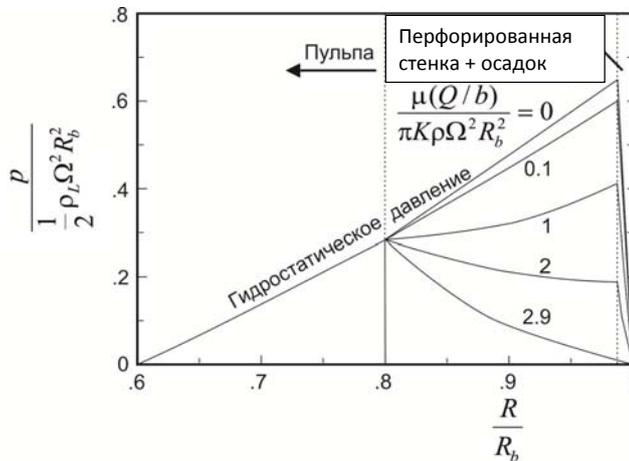


Рис. 2. Зависимость давления в фильтрующей центрифуге при объемной фильтрации

Полное снижение давления включает сумму падений всех трех давлений:

$$dp_{total} = p_b - p_p = (p_b - p_m) + (p_m - p_c) + (p_c - p_p) = 0.$$

В целом изменение давления должно иметь нулевое значение, учитывая, что бассейн и внешняя стенка корзины контактируют с окружающей средой. Подстановка уравнений (3) и (5) в предыдущее уравнение и объединение с преобразованием [1]:

$$Q = \tilde{Q}b = \frac{\pi b K \rho \Omega^2 (R_b^2 - R_p^2)}{\mu \left[\ln \left(\frac{R_b}{R_c} \right) + \frac{K r_m}{R_b} \right]}.$$

Это известное уравнение центробежной фильтрации. Движущей силой является дифференциальное давление, установленное между стенкой корзины и поверхностью бассейна, которая используется для преодоления сопротивления осадка и перфорированной стенки, включая корку уплотненного осадка. Логарифмический член нетипичен для сопротивления,

формируемого в цилиндрической системе координат, и подобен уравнениям для теплопроводности или массопереноса.

Для сформированного осадка распределение давления и уровень фильтрации зависят от сопротивления перфорированной стенки и проницаемости осадка. На рис. 2 показан

пример, когда $\frac{R_p}{R_b} = 0,6$ и

$\frac{R_c}{R_b} = 0,8$ Давление при

условии $R = R_b$ соответствует перепаду давления через перфорированную стенку Δp_m с гидравлическим давлением в отверстиях стенки корзины, равной окружающему, у которого измеренное давление $p = 0$.

Высокое сопротивление среды наблюдается в случае залипания перфорированной стенки или из-за высокого сопротивления корки уплотненного осадка на перфорированной стенке от механического давления, обусловленного, например, контактом с ножом скребка шнека. Это дополнительное сопротивление приведет к значительной поправке к скорости фильтрации. В крайнем случае, когда сопротивление среды становится слишком высоким, до такой степени, что фильтрация останавливается

$\frac{\mu \left(\frac{Q}{b} \right)}{\pi K \rho \Omega^2 R_b^2} = 0$, распределение давления также приводится к квадратичной форме.

Непрерывно работающей фильтрующей центрифугой, основанной на принципе объемной фильтрации,

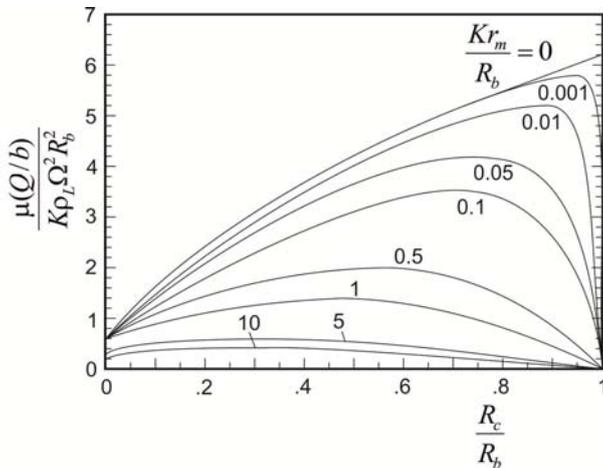


Рис. 3. Скорость центробежной фильтрации как функция отношения опротивлений осадка и перфорированной стенки корзины

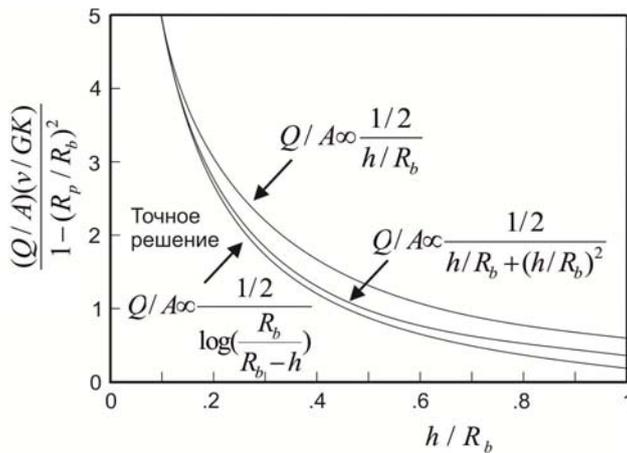


Рис. 4. Скорость центробежной фильтрации как функция толщины осадка

управляют таким образом, что бы отсутствовал слой жидкости в зоне подачи. Избыточное количество жидкости может привести к тому, что жидкость будет течь сверху осадка, или потоки жидкости прорежут осадок. Условие, что не будет свободного слоя жидкости над осадком, требует равенства $R_p = R_c$ в уравнении (6), из чего следует [2]:

$$\frac{Q}{b} = \frac{\pi \left[1 - \left(\frac{R_c}{R_b} \right)^2 \right]}{\mu \left[\ln \left(\frac{R_b}{R_c} \right) + \frac{Kr_m}{R_b} \right]}$$

Уравнение (7) представлено графически на рис. 3 для различных значений сопротивления перфорированной стенки корзины и уплотненной корки осадка на ней. Для заданного сопротивления перфорированной стенки скорость объемной фильтрации будет низкой для больших толщин осадка, где отношение $\frac{R_c}{R_b}$ – мало. И, наоборот,

когда толщина осадка мала, тогда отношение $\frac{R_c}{R_b}$ будет большим.

В первом случае движущая сила незначительна, несмотря на небольшое сопротивление, тогда как в последнем случае сопротивление является слишком высоким, несмотря на большую движущую силу. Из этого следует, что между

этими двумя крайностями должна находиться максимальная скорость фильтрации, независимая от радиуса осадка, но которая зависит, прежде всего, от сопротивления перфорированной стенки. Например, при $\frac{Kr_m}{R_b} = 0,05$, как показано на рис. 3, максимальная скорость будет дости-

жима при $\frac{R_c}{R_b} = 0,85$, что соответствует толщине осадка $\frac{h}{R_b} = 0,15$. Для

оптимального действия отношение сопротивления перфорированной стенки к сопротивлению осадка должно быть малым, с $\frac{Kr_m}{R_b} < 5\%$ (см.

рис. 3), иначе скорость фильтрации будет ограничена. Основываясь на этих рассуждениях, толщину осадка можно несколько уменьшить. Однако толщина не должна быть слишком малой, чтобы производительность центрифуги не уменьшилась. Для незначительного сопротивления среды поток фильтрации постепенно уменьшается, поскольку толщина осадка увеличивается с уменьшением R_c .

Рассмотрим случай с небольшой толщиной осадка и незначительным сопротивлением перфорированной стенки корзины. Известно, что удельное сопротивление осадка центрифуги, особенно для уплотненного осадка, больше чем полученное для кека при фильтрации под давлением или при вакуумной фильтрации. Поэтому удельное сопротивление должно быть измерено непосредственно при тестах на центрифуге (и не взято из тестов фильтрации под давлением или вакуумной фильтрации) для различных толщин осадка, чтобы иметь точную шкалу подобия к реальной центрифуге. В случае незначительного сопротивления фильтрующей среды уравнение (6) может быть написано в виде [2]:

$$\frac{\frac{\tilde{Q}}{2\pi R_b}}{u_0 \left(\frac{h_p}{R_b}\right) \left(R_b + \frac{R_p}{2R_b}\right)} = \frac{1}{\ln\left(\frac{R_b}{R_b - h}\right)} \approx$$

$$\approx \frac{1}{\frac{h}{R_b} + \frac{1}{2\left(\frac{h}{R_b}\right)^2} + \frac{1}{3\left(\frac{h}{R_b}\right)^3} + \dots},$$

где характерная скорость поверхностной фильтрации, или более правильно, поток фильтрации можно представить выражением:

$$u_0 = \frac{GK}{v},$$

где $G = \Omega^2 R$, и $h_p = R_c - R_p$ – глубина бассейна, $h = R_b - R_c$ – толщина осадка. Представляет интерес то, что u_0 зависит только от кинематической вязкости жидкости фугата v , проницаемости осадка K и центробежного ускорения G . Скорость фильтрации может находиться в диапазоне от $7 \cdot 10^{-3} \text{ м}^3/\text{м}^2 \cdot \text{с}$ (10 гал/мин·фут²) для вибрационной центрифуги, обезвоживающей крупные частицы с минимальными размерами 300 мкм, до $5 \cdot 10^{-5} \text{ м}^3/\text{м}^2 \cdot \text{с}$ (0,1 гал/мин·фут²) для декантирующих и шнековых центрифуг, обезвоживающих мелкие частицы с размерами 5 – 10 мкм.

В уравнении (8) показано, что логарифмический член может быть приближен бесконечным расширением ряда $\frac{h}{R_b}$, который в большинстве

случаев является меньше значения 0,2 и редко превышает 0,3. Вероятно, что для практических целей могут быть использованы только значимые члены в этом бесконечном ряду, особенно когда $\frac{h}{R_b} \ll 1$. На рис. 4 срав-

нивается логарифмический член (точное решение) и первые и вторые члены в ряду, как значащие в этой аппроксимации. При $\frac{h}{R_b} = 0,3$ точное

вычисление приводит к значению 1,40, тогда как первый член аппроксимации дает только 1,67 (19 %-ая ошибка), а первые два члена в сумме дают 1,45 (ошибка составляет 3,5 %), что ближе к точному значению. Аналогично при $\frac{h}{R_b} = 0,15$, точное значение дает 3,08, тогда как аппроксимация, использующая первый член, дает 3,33 (ошибка составляет 8 %), а первые два члена дают значение 3,1 (ошибка составляет 0,007 %). Это показано на рис. 4, где двухчленная аппроксимация приводит к довольно точным результатам для обычного диапазона толщины осадка, и первый член дает приемлемую оценку только когда $\frac{h}{R_b} = 0,15$.

Для особого случая, когда $\frac{h}{R_b} \ll 0,1$ главная аппроксимация дает простое линейное соотношение:

$$\frac{q}{2\pi R b} \approx u_0 \frac{h p}{h}$$

Необходимо отметить, что в этой аппроксимации поток фугата пропорционален характерной скорости фильтрации u_0 и толщине текущей жидкости h_p , и обратно пропорционален толщине осадка h . Эта «линеаризованная» версия уравнения центробежной фильтрации применима, когда толщина осадка является незначительной по сравнению с радиусом ротора, до такой степени, что цилиндрическая геометрия по существу заменена линейной плоской геометрией.

Заключение

Приведенные в настоящей статье основные уравнения теории объемной фильтрации применительно к фильтрующим центрифугам используются для практических расчетов обезвоживания осадка в центрифугах, предназначенных для обезвоживания угольного шлама.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Mayer G. and Stahl W. Model for Mechanical Separation of Liquid in a Field of Centrifugal Force. // *Aufbereitungs-Technik*, no. 11, 1988.
2. Leung, Wallace Woon-Fong . Industrial centrifugation technology. // McGraw-Hill Companies, Inc., New York, 1998. **ГИАБ**

КОРОТКО ОБ АВТОРЕ

Козлов Вадим Анатольевич — кандидат технических наук, доцент, главный технолог Корпорации Инжиниринг — CETCO, vak@cetco.ru.

