

МЕХАНИЧЕСКОЕ ОБОРУДОВАНИЕ И МАШИНОСТРОЕНИЕ

Шарапов Р. Р., д-р техн., наук, проф.,
Тетерин К. К., аспирант,
Богданов В. С., д-р техн., наук, проф.,
Пеленицин А. В., аспирант

Белгородский государственный технологический университет им. В.Г.Шухова

ИССЛЕДОВАНИЕ ПРОЦЕССА РАЗДЕЛЕНИЯ ЧАСТИЦ ТВЕРДОЙ ФАЗЫ ШЛАМА В ВИНТОВОМ КЛАССИФИКАТОРЕ

v.s_bogdanov@mail.ru

В статье приведены расчетные формулы, характеризующие процесс разделения грубомолотого шлама в винтовом классификаторе. Полученные выражения позволяют определить эффективность работы винтового классификатора в зависимости от условий разделения цементного шлама.

Ключевые слова: разделение, частица, шлам, винтовой классификатор.

Тонкое измельчение в шаровых мельницах является заключительной операцией при подготовке цементного шлама после его измельчения в мельницах самоизмельчения. При этом после «Гидрофола» в грубомолотом шламе находится более 50 % частиц, соответствующих по своему размеру готовым. Все это направляется на повторное измельчение в шаровые мельницы, что снижает эффективность производства цемента в целом. Для решения этой проблемы нами разработан винтовой классификатор, который устанавливается перед мельницей тонкого домола шлама и отбирает мелкие частицы.

Ниже приведены расчетные формулы, характеризующие процесс разделения грубомолотого цементного шлама в разработанном классификаторе.

На интенсивность процесса разделения сырьевого шлама существенное влияние оказывает осаждение твердой фазы шлама под действием гравитационных и центробежных сил.

Рассмотрим сначала наиболее простой случай свободного осаждения сферических частиц под действием силы тяжести. На частицу диаметром d и плотностью ρ действует сила тяжести (1), выталкивающая сила (2) и сила сопротивления среды (3):

$$F_T = \frac{\pi d^3}{6} \rho_T g, \quad (1)$$

$$F_a = \frac{\pi d^3}{6} \rho g, \quad (2)$$

$$F_c = C_D S_M \frac{\rho v_{oc}^2}{2}, \quad (3)$$

где $g = 9,81 \text{ м/с}^2$ – ускорение силы тяжести; C_D – коэффициент сопротивления жидкой среды; S_M – площадь миделевого сечения т.е. площадь проекции частицы на плоскость, перпендикулярную направлению движения (для сферы $S_M = \pi d^2/4$); v_{oc} – скорость осаждения.

Коэффициент сопротивления является функцией числа Рейнольдса

$$Re = \frac{v_{oc} d \rho}{\mu}, \quad (4)$$

которое характеризует режим обтекания частицы. Для ламинарного (стоксовского) режима обтекания ($Re \leq 0,5$)

$$C_D = \frac{24}{Re}. \quad (5)$$

Для переходного режима обтекания ($Re \leq 400$) воспользуемся уточненной формулой Л.С. Клячко

$$C_D = \frac{24}{Re} + \frac{3,6}{Re^{0,313}}, \quad (6)$$

которая с удовлетворительной точностью (< 9 %) охватывает также и стоксовскую область.

Установившуюся скорость осаждения частицы можно найти из условия равенства движущей силы силе сопротивления среды:

$$F_T - F_a = F_c. \quad (7)$$

Подставив в уравнение (7) выражения (1...3), получим:

$$C_D \frac{\pi d^2}{4} \frac{\rho v^2}{2} = \frac{\pi d^3}{6} \Delta \rho g, \quad (8)$$

где $\Delta\rho = \rho_r - \rho$.

В соответствии с методом П.В. Лященко [1], выразим скорость осаждения частицы через число Рейнольдса:

$$v_{oc} = \frac{Re\mu}{d\rho}, \quad (9)$$

и подставим это выражение в уравнение (8), которое после преобразования принимает вид:

$$C_D(Re)Re^2 = \frac{4}{3}Ar. \quad (10)$$

Здесь Ar – число Архимеда:

$$Ar = \frac{d^3\rho\Delta\rho g}{\mu^2}. \quad (11)$$

Частицы мела размером $d < 5$ мкм осаждаются в стоксовском режиме ($Re \leq 0,5$; $C_D = 24/Re$) со скоростью

$$v_{oc} = \frac{d^2\Delta\rho g}{18\mu}, \quad (12)$$

что составляет $v_{oc} \leq 2 \cdot 10^{-5}$ м/с.

Для более крупных меловых частиц $5 \leq d \leq 86$ мкм, осаждающихся в переходном режиме ($0,5 \leq Re \leq 400$, формула Клячко) уравнение (10) принимает вид:

$$24Re + 3,6Re^{1,687} = \frac{4}{3}Ar. \quad (13)$$

Для вычисления скорости осаждения необходимо по заданному размеру частицы найти число Ar , решить численно уравнение (13) и подставить найденное значение Re в формулу (9). Например, для частиц тела размером $d = 50$ мкм, $Ar = 1,84$, $Re = 0,099$, $v_{oc} = 0,002$ м/с.

Для частиц размером $d = 86$ мкм соответствующих верхним границам переходной области, $v_{oc} = 0,006$ м/с.

Для крупных частиц мела ($d > 100$ мкм), осаждающихся в турбулентном режиме, коэффициент сопротивления не зависит от Re и равен $C_D = 0,44$. В этом случае:

$$Re = 1,74\sqrt{Ar}, \quad (14)$$

$$v_{oc} = 1,74\sqrt{\frac{d\Delta\rho g}{\rho}}, \quad (15)$$

что составляет $v_{oc} \geq 0,067$ м/с.

В центробежном винтовом классификаторе из-за тангенциального подвода шлам закручивается вокруг его оси. В результате этого на частицы дисперсной фазы, т.е. частицы мела и добавок, кроме силы тяжести действует также направленная по радиусу, т.е. перпендикулярно силе тяжести, центробежная сила, вызывающая

центробежное осаждение частиц, аналогичное гравитационному (рис. 1).

Результирующее ускорение частиц равно:

$$a = \sqrt{g^2 + (a_{ц}^{cp})^2}, \quad (16)$$

где $a_{ц}$ – центробежное ускорение частиц, усредненное по рабочему объему классификатора.

Полное ускорение в каждой точке M рабочего объема классификатора образует с осью аппарата угол φ , определяемый формулой:

$$\varphi = \arctg \frac{a_{ц}(M)}{g}. \quad (17)$$

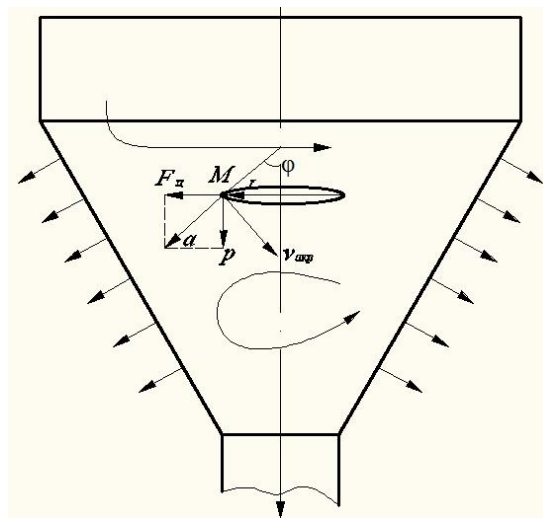


Рис. 1. Схема осаждения частиц в центробежно-гравитационном поле

Приведенные выше соотношения, описывающие осаждение частиц в гравитационном поле, остаются справедливыми и для комбинированного центробежно-гравитационного силового поля с заменой ускорения силы тяжести g на результирующее ускорение a .

Расчет повторяется для всех N фракций частиц твердой фазы, в результате чего получается набор N фракционных скоростей осаждения $v_{oc}(d_i)$.

Частицы шлама имеют неправильную несферическую форму, что оказывает существенное влияние на скорость их осаждения. Частицы неправильной формы оседают всегда медленнее, чем эквивалентная ей по объему сферическая частица диаметром d_{3v} . Снижение фракционных скоростей осаждения частиц учитывается с помощью эмпирического коэффициента формы E (табл. 1) [2]

$$v_{ocф}(d_i) = E v_{oc}(d_i). \quad (18)$$

Рассчитав по средним фракционным размерам d_i скорости осаждения частиц отдельных фракций с учетом их формы, можно вычислить среднемассовую скорость осаждения частиц дисперсной фазы шлама:

$$\tilde{v} = \sum_{i=1}^N v_{\text{оф}}(\bar{d}_i) \Delta D_i. \quad (19)$$

В реальных условиях при высоком содержании твердой фазы осаждающиеся частицы испытывают влияние других частиц, приводящее из-за взаимного трения и столкновений к дополнительному механическому сопротивле-

нию осаждению. В результате этого среднemasовая скорость осаждения частиц в стесненных условиях снижается [3]:

$$\tilde{v}_{\text{ст}} = \frac{\tilde{v}}{1 + 2,5C_v}. \quad (20)$$

Таблица 1

Значения коэффициента формы в зависимости от числа Ag

$Ag \cdot 10^3$	Форма частиц			
	округлая	угловая	продолговатая	пластинчатая
15	0,805	0,680	0,610	0,450
20	0,800	0,678	0,595	0,411
40	0,790	0,672	0,590	0,433
100	0,755	0,650	0,564	0,420
200	0,753	0,647	0,562	0,408
400	0,740	0,635	0,560	0,392

Влияние стесненности на скорость осаждения частиц показано на рис. 2.

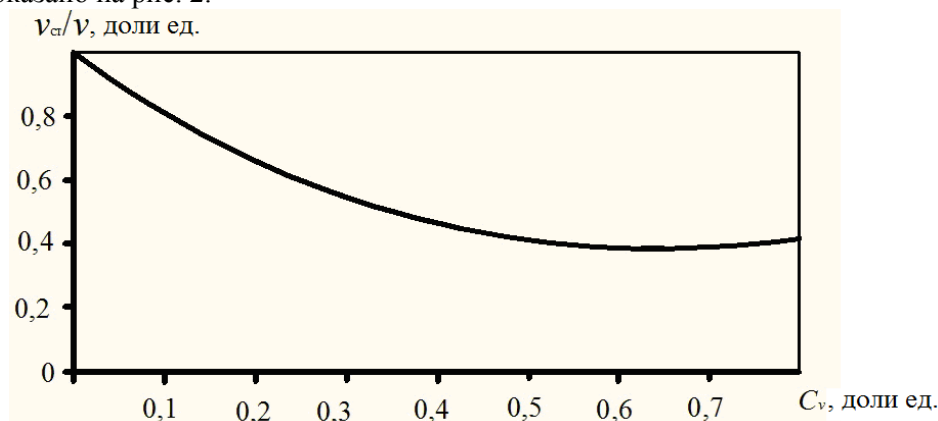


Рис. 2. Зависимость относительной скорости осаждения частиц от объемного содержания твердой фазы

Для определения эквивалентного диаметра частицы неправильной формы по скорости седиментации необходимо наблюдаемую скорость осаждения частицы в свободных условиях разделить на коэффициент E и найти скорость осаждения эквивалентной сферической частицы. Затем в зависимости от величины этой скорости вычислить $d_{\text{эд}}$ по формуле (12), уравнению (13) или с помощью соотношения (15).

К фильтрационным свойствам сырьевого шлама относятся свойства, от которых непосредственно зависит интенсивность процессов разделения и качество его продуктов. Это скорость фильтрования, полнота разделения, т.е. влажность густого продукта и содержание твердой фазы в фильтрате, реологические и адгезионные свойства взвешенного осадка примыкающего к фильтрованной перегородке.

На скорость фильтрования оказывают влияние вязкость жидкой фазы, параметры разделительной перегородки, угол наклона спиральной направляющей лопасти, содержание и скорость осаждения твердой фазы. Интенсивность про-

цесса разделения шлама характеризуется удельным объемом фильтрата, т.е. объемом жидкой суспензии, получаемой за единицу времени. Имеет место эмпирическое уравнение:

$$V = V_{01} P^{\phi}, \quad (21)$$

где V , V_{01} – удельные объемы фильтрата, получаемые соответственно при давлении p и давлении, равном 0,1 МПа, ϕ – эмпирическая постоянная.

Гравитационное и центробежное осаждение частиц шлама приводит к увеличению концентрации твердой фазы вблизи разделительной перегородки. Упорядоченному переносу частиц к фильтровальной перегородке препятствует их турбулентная диффузия в противоположном направлении. В установившемся режиме работы винтового классификатора имеет место динамическое равновесие этих процессов, в которых радиальное сопротивление концентрации твердой фазы может быть приближенно описано соотношением [4]:

$$C_{mv}(r) = C_{mv}(0) \exp\left(\frac{\tilde{v}_{ct} r}{D_p}\right), \quad (22)$$

где D_p – коэффициент турбулентной диффузии частиц.

Повышение содержания частиц твердой фазы вблизи разделительной перегородки характеризуется коэффициентом неоднородности:

$$C_{mv} = \frac{C_{mv}(0)}{\pi R^2(z)} \int_0^{\bar{R}(z)} \exp\left(\frac{\tilde{v}_{ct} r}{D_p}\right) 2\pi r dr = \frac{2C_{mv}(0)}{Pe^2} (1 + (Pe - 1) \exp(Pe)), \quad (24)$$

Здесь $Pe = \tilde{v}_{ct} R(z) / D_p$ – число Пекле.

Подставив соотношение (24) в формулу (23) получим следующее выражение для коэффициента неоднородности:

$$\chi = \frac{Pe^2 \exp(Pe)}{2(1 + (Pe - 1) \exp(Pe))}. \quad (25)$$

График зависимости $\chi(Pe)$ показан на рис.

3.

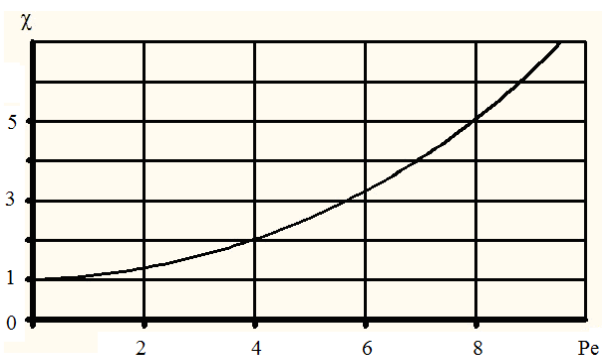


Рис. 3. Зависимость коэффициента неоднородности распределения твердой фазы от числа Пекле

По литературным данным [5] коэффициент турбулентной диффузии частиц во вращающихся потоках суспензий изменяется от 0,004 до 0,020 м²/с. Для условий работы шламового клас-

$$\chi = \frac{C_{mv}(R)}{C_{mv}} = \frac{C_v(R)}{C_v} = \frac{1 - \varepsilon(R)}{1 - \varepsilon}, \quad (23)$$

где $C_{mv}(R)$, $C_v(R)$, $\varepsilon(R)$ – значения показателей содержания твердой фазы вблизи разделительной перегородки, C_{mv} , C_v , ε – средние значения этих показателей.

Например:

сификатора $D_p \approx 0,012$ м²/с, $v_{ct} \approx 0,06$ м/с, $Pe \approx 1,5$, коэффициент неоднородности $\chi \approx 1,56$.

Анализ полученных выражений позволяет сделать вывод: чем выше скорость среды и равномернее распределение частиц в меловом шламе, тем выше эффективность работы винтового классификатора и, соответственно, производство цемента в целом.

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Лященко П.В. Гравитационные методы обогащения. – М.: Гостоптехиздат, 1940. – 152 с.
2. Малиновская Т.А., Кобринский И.А., Кирсанов О.С., Рейфарт В.В. Разделение суспензий в химической промышленности. – М.: Химия, 1983. – 263 с.
3. Гольдберг Ю.С., Гонтаренко А.А. Обезвоживание концентратов черных металлов. – М.: Недра, 1986 – 184 с.
4. Справочник по обогащению руд черных металлов. Шинкаренко С.Ф., Белецкий Е.П., Ширяев А.А. – М.: Недра, 1980 – 527 с.
5. Дик И.Г., Матвиенко О.В., Неессе Т. Моделирование гидродинамики и сепарации в гидроциклоне. ТОХТ, 2000, том 34, №5, с. 478 – 488.