

Кривенко А. Ю., асс.
Криворожский национальный университет

ОБОСНОВАНИЕ ПАРАМЕТРОВ РАДИАЛЬНЫХ ДЕШЛАМАТОРОВ С УЧЕТОМ СПОСОБА ПОДАЧИ ИСХОДНОГО ПИТАНИЯ

krivoirog@mail.ru

Выполнены аналитические и экспериментальные исследования по обоснованию конструктивных параметров радиальных дешламетров для горно-обогажительных предприятий. Установлено, что повышение эффективности разделения компонентов твердой фазы рудной суспензии достигается за счет формирования горизонтально-ориентированного радиального потока исходного питания. Конструкция радиального устройства исходного питания увеличивает в 2,0 – 2,5 раза длину траектории движения частиц твердой фазы и, соответственно, увеличивает на 1,5 – 2,0% массовую долю полезного компонента в сгущенном продукте.

Ключевые слова: дешламетор, магнетитовая суспензия, устройство исходного питания, сгущенный продукт, траектория движения частиц.

Постановка проблемы в общем виде и ее связь с важными научными и практическими задачами. Важным элементом технологического процесса получения железорудного концентрата на горно-перерабатывающих предприятиях является гравитационное гидравлическое обогащение в дешламеторах диаметром от 5,0 м и более, применение которых, в зависимости от стадии обогащения, позволяет повысить на 0,5 – 3,5% массовую долю железа общего в сгущенном продукте [1, 2].

Эффективность процесса разделения железорудного сырья в дешламеторах зависит от закономерностей гидродинамики движения двухфазного потока, формируемого устройством исходного питания, определяющего пространственное перемещение в гидравлической среде рудных и нерудных частиц с различной гравитационной крупностью. Учет этих закономерностей позволяет улучшить сепарационные характеристики седиментационных аппаратов с учетом их конструктивных особенностей и физико-механических свойств обогащаемого сырья.

Краткий анализ последних публикаций. Для удаления из процесса токодисперсных и малоплотных частиц рудной суспензии, на ГОКах обычно используется обесшламливание на магнитных дешламеторах. Анализ работы дешламетров показал, что эффективность процесса разделения частиц определяется целым рядом параметров, которые зависят как от свойств разделяемого материала, так и от конструкции применяемого аппарата.

Обычно на дешламеторах используется нисходящая подача исходной суспензии, которая ограничивает прирост качественных показателей процесса разделения частиц по крупности и плотности. При нисходящем питании предопределено совпадение векторов направления движения рудных частиц и направления гравитационной составляющей. Часть породных частиц увлекается потоком и осаждаются в донной части дешламетора, тем самым снижая качество его песков.

Анализ сепарационных характеристик дешламетров с нисходящим способом исходного питания показывает на нестабильность их работы - сгущенный продукт содержит значительное количество породных частиц, а со сливом дешламетора теряются тонкие классы повышенной плотности, содержащие железосодержащий компонент.

Исследования показали, что изменение конструкции дешламетров путём переориентирования векторов подачи исходного питания с нисходящего на радиальный позволит увеличить время нахождения частиц суспензии во взвешенном состоянии, а так же увеличить эффективную площадь осаждения [3].

Целью статьи является обоснование параметров радиальных дешламетров с учетом гидродинамики разделения рудных и нерудных частиц твердой фазы рудной суспензии определяемого способом подачи исходного питания.

Изложение основного материала. Процесс разделения компонентов рудного сырья в дешламеторах достаточно сложен и его эффективность зависит от многих факторов, которые определяют как качество сгущенного продукта, так и слива. Одним из основных факторов, определяющих эффективность дешламации, является процесс распределения частиц твердой фазы железорудной пульпы в чане аппарата после выхода из устройства подачи исходного питания [4, 5].

При радиальной подаче исходного питания, рудная суспензия движется радиально-направленно к периферии дешламетора. Струя суспензии, имеющая некий импульс, вносит в окружающее пространство ванны дешламетора поток твердой фазы. Поток пульпы распространяется в чане аппарата, захватывая при этом гораздо большую площадь, чем образовавшаяся струя питания при стандартном питании – вертикально-направленном. Частицы при радиальном потоке исходного питания имеют больше времени на витание по всей площади дешламетора, что приводит к улучшенному от-

делению тонких частиц крупностью $-0,025+0$ мм. В этом случае максимальное время нахождения во взвешенном состоянии осаждающего продукта почти в 2,0-2,5 раза больше по сравнению с нисходящей подачей исходного питания.

Вполне логично, что использование модели поведения частиц пульпы питания на выходе из радиального питающего устройства (РПУ) позволит прогнозировать оптимальные параметры обогатительного аппарата.

Дифференциальное уравнение, которое описывает процесс осаждения твердых частиц поступающих в ванну дещламатора в векторной форме, имеет вид

$$m \frac{d\vec{v}}{dt} = m\vec{g} + \vec{F}_{Ap} + \vec{F}_c, \quad (1)$$

где \vec{v} – вектор скорости частицы, $м/с$; m – масса частицы, $кг$; g – ускорение свободного падения, $м/с^2$; \vec{F}_{Ap} – сила Архимеда, $н$; \vec{F}_c – сила сопротивления, $н$.

Дифференциальное уравнение (1) в проекциях на вертикальную ось направленную вниз запишется в виде

$$m \frac{dv_y}{dt} = mg - F_{Ap} - F_c. \quad (2)$$

При этом должно выполняться начальное условие

$$v_y(t=0) = -v_1. \quad (3)$$

где v_1 – скорость осветленного продукта, проходящего через поперечное сечение ванны дещламатора, $м/с$.

Проекция силы Архимеда можно представить в виде

$$F_{Ad} = m \frac{\Delta}{\delta} g. \quad (4)$$

где δ – плотность частицы, $кг/м^3$.

Проекция силы сопротивления с учетом того, что частица довольно медленно осаждаются, может быть записана как пропорциональная проекции скорости, то есть подчиняется закону Стокса

$$F_c = k(v_y + v_1), \quad (5)$$

где $k = 3 \cdot \pi \cdot \mu \cdot d$; μ – динамическая вязкость, $Па \cdot сек$; d – диаметр частицы, $м$.

Тогда гидравлическая крупность частицы может быть записана в виде

$$\theta = \frac{1}{18} \frac{(\delta - \Delta) \cdot g \cdot d^2}{\mu}. \quad (6)$$

где d – диаметр частицы, $м$.

Очевидно, частица будет подниматься до тех пор, пока ее скорость не станет равной нулю. Поэтому время подъема частицы находится

из условия

$$1 - \hat{v}_1 - e^{-\tau} = 0, \text{ то есть } \tau_0 = -\ln(1 - \hat{v}_1). \quad (7)$$

Для нахождения изменения ординаты частицы от времени необходимо решить задачу Коши

$$\begin{cases} \frac{d\hat{y}}{d\tau} = 1 - \hat{v}_1 - e^{-\tau} \\ \hat{y}(\tau=0) = 0 \end{cases}, \quad (8)$$

где $\hat{y} = \frac{y}{\Delta l}$, $\Delta l = \theta \cdot \Delta t$ – гидравлическая единица длины, $м$.

Интегрируя уравнение (8) с учетом начального условия, находим

$$\hat{y} = (1 - \hat{v}_1) \cdot \tau + e^{-\tau} - 1. \quad (9)$$

Время подъема частицы ограничено глубиной погружения устройства РПУ h_0 в ванну дещламатора. Для нахождения времени достижения частицей поверхности дещламатора необходимо решить уравнение

$$1 - e^{-\tau} - (1 - \hat{v}_1) \cdot \tau = \hat{h}_0, \quad (10)$$

где $\hat{h}_0 = \frac{h_0}{\Delta l}$.

Уравнение (10) является нелинейным и допускает только численное решение. Очевидно, частица сможет оседать тогда, когда будет выполняться условие

$$\tau_0 \leq \tau_1, \quad (11)$$

где τ_1 – решение уравнения (10).

Таким образом, условие (11) позволяет выделить частицы, которые будут осаждаться в ванне дещламатора, если они находятся выше РПУ. Вместе с тем, можно вычислить общее время осаждения частицы в рассматриваемом случае, то есть время достижения дна ванны дещламатора. Если известно время подъема частицы восходящим потоком пульпы, определяемое формулой (7), то высота ее подъема за это время h' находится, согласно (9), так

$$\hat{h}' = 1 - e^{-\tau_0} - (1 - \hat{v}_1) \cdot \tau_0. \quad (12)$$

где $\hat{h}' = \frac{h'}{\Delta l}$.

Время оседания частицы с высоты $h' + h_1$ находится путем численного решения нелинейного уравнения

$$\hat{v}_1 \cdot \tau - \pi \cdot \ln ch \left(\frac{\tau}{\sqrt{\pi}} \right) = \hat{h}' + \hat{h}_1. \quad (13)$$

Тогда общее время осаждения частицы находится по формуле

$$\tau = \tau_0 + \tau', \quad (14)$$

где τ' – решение уравнения (13). В натуральных единицах измерения $t = (\tau_0 + \tau') \cdot \Delta t$.

Вместе с тем частицы, которые попадают в поток пульпы ниже РПУ, увлекаются этим потоком вниз. Скорость осаждения таких частиц определяется как решение задачи Коши

$$\frac{d\hat{v}_y}{d\tau} = 1 - \hat{v}_y + \hat{v}_2, \quad (15)$$

$$\hat{v}_y = \hat{v}_2. \quad (16)$$

Это решение имеет вид

$$\hat{v}_y = 1 + \hat{v}_2 - e^{-\tau}. \quad (17)$$

Время осаждения частицы, попадающей в поток пульпы ниже РПУ, находится путем решения задачи Коши

Решение задачи Коши имеет вид

$$\hat{y} = (1 + \hat{v}_2) \cdot \tau + e^{-\tau}. \quad (18)$$

Решение уравнения позволяет найти время осаждения частицы в этом случае

$$(1 + \hat{v}_2) \cdot \tau + e^{-\tau} = \hat{h}_1. \quad (19)$$

Расчет гидравлической крупности частиц рудной массы размером $-0,070 + 0$ мм при плотности $2,6 - 4,2$ г/см³, согласно уравнениям показывает, что значение гидравлической крупности взаимосвязано с геометрическими параметрами частиц и их плотностью.

Согласно теории формирования затопленных струй, изменение скорости струи является линейной функцией расстояния от полюса струи, образованного пересечением продолжением границ струи.

$$\int (\hat{R} + \hat{x}) \cdot (2 \cdot \hat{x} \cdot \text{tg}(\alpha/2) + \hat{d}_0) d\hat{x} = \hat{v}_0 \cdot \hat{R} \cdot \hat{d}_0 \cdot \tau + c. \quad (23)$$

После вычисления интеграла в левой части равенства (23) с учетом начального условия (22),

$$\frac{2}{3} \text{tg}(\alpha/2) \cdot \hat{x}^3 + (\hat{R} \cdot \text{tg}(\alpha/2) + \frac{\hat{d}_0}{2}) \cdot \hat{x}^2 + \hat{R} \cdot \hat{d}_0 \cdot \hat{x} = \hat{v}_0 \cdot \hat{R} \cdot \hat{d}_0 \cdot \tau. \quad (24)$$

Объединив (9) и (24), получаем в параметрическом виде уравнение траектории частицы для случая ее попадания в восходящий поток

$$\frac{2}{3} \text{tg}(\alpha/2) \cdot \hat{x}^3 + (\hat{R} \cdot \text{tg}(\alpha/2) + \frac{\hat{d}_0}{2}) \cdot \hat{x}^2 + \hat{R} \cdot \hat{d}_0 \cdot \hat{x} = \hat{v}_0 \cdot \hat{R} \cdot \hat{d}_0 \cdot \tau, \quad (25)$$

$$\hat{y} = (1 - \hat{v}_1) \cdot \tau + e^{-\tau} - 1. \quad (26)$$

Если частица попадает в нисходящий поток пульпы, выходящий из радиального устройства

$$\frac{2}{3} \text{tg}(\alpha/2) \cdot \hat{x}^3 + (\hat{R} \cdot \text{tg}(\alpha/2) + \frac{\hat{d}_0}{2}) \cdot \hat{x}^2 + \hat{R} \cdot \hat{d}_0 \cdot \hat{x} = \hat{v}_0 \cdot \hat{R} \cdot \hat{d}_0 \cdot \tau, \quad (27)$$

$$\hat{y} = (1 + \hat{v}_2) \cdot \tau + e^{-\tau} - 1. \quad (28)$$

Параметрическая запись траектории частицы в восходящем потоке пульпы с помощью

$$\hat{y} = \exp\left(-\frac{1}{\hat{v}_0 \hat{R} \hat{d}_0} \left(\frac{2}{3} \text{tg}(\alpha/2) \cdot \hat{x}^3 + (\hat{R} \cdot \text{tg}(\alpha/2) + \frac{\hat{d}_0}{2}) \cdot \hat{x}^2 + \hat{R} \cdot \hat{d}_0 \cdot \hat{x}\right)\right) + (1 - \hat{v}_1) \frac{1}{\hat{v}_0 \hat{R} \hat{d}_0} \left(\frac{2}{3} \text{tg}(\alpha/2) \cdot \hat{x}^3 + (\hat{R} \cdot \text{tg}(\alpha/2) + \frac{\hat{d}_0}{2}) \cdot \hat{x}^2 + \hat{R} \cdot \hat{d}_0 \cdot \hat{x}\right) - 1. \quad (29)$$

Если воспользоваться уравнением неразрывности для несжимаемой жидкости, то величина скорости на расстоянии x от выхода из РПУ представится формулой

$$\hat{v}_x = \hat{v}_0 \frac{\hat{R} \cdot \hat{d}_0}{(\hat{R} + \hat{x})(2\hat{x} \cdot \text{tg}(\alpha/2) + \hat{d}_0)}, \quad (20)$$

где α – угол, образуемый границами струи при выходе из полюса, rad ; x – расстояние от границы выхода струи из РПУ до сечения расчета

скорости струи, m ; $\hat{v}_x = \frac{v_x}{\theta}$, $\hat{v}_0 = \frac{v_0}{\theta}$, $\hat{R} = \frac{R}{\Delta l}$,

$\hat{d}_0 = \frac{d_0}{\Delta l}$, $\hat{x} = \frac{x}{\Delta l}$; R – радиус диска РПУ; d_0 – расстояние между дисками РПУ.

Конкретизация пространственной ориентации потока, движущегося в чане дешламатора, относительно горизонтальной координаты с учетом фактора времени, решается с помощью задачи Коши

$$\frac{d\hat{x}}{d\tau} = \hat{v}_0 \frac{\hat{R} \cdot \hat{d}_0}{(\hat{R} + \hat{x})(2\hat{x} \cdot \text{tg}(\alpha/2) + \hat{d}_0)}, \quad (21)$$

$$\hat{x}(\tau = 0) = 0. \quad (22)$$

Интегрирование уравнения (21) дает решение в виде

окончательно получаем

пульпы, выходящей из радиального устройства исходного питания

исходного питания, то, объединив (18) и (24), получаем параметрическое представление траектории частицы в данном случае

формул (25), (26) позволяет записать явное представление этой траектории

Аналогично, для движения частицы в нисходящем потоке пульпы с помощью формул (27), (28) получаем уравнение траектории ча-

$$\hat{y} = \exp \left(-\frac{1}{\hat{v}_0 \hat{R} \hat{d}_0} \left(\frac{2}{3} \operatorname{tg}(\alpha/2) \cdot \hat{x}^3 + (\hat{R} \cdot \operatorname{tg}(\alpha/2) + \frac{\hat{d}_0}{2}) \cdot \hat{x}^2 + \hat{R} \cdot \hat{d}_0 \cdot \hat{x} \right) \right) + (1 + \hat{v}_2) \frac{1}{\hat{v}_0 \cdot \hat{R} \cdot \hat{d}_0} \left(\frac{2}{3} \operatorname{tg}(\alpha/2) \cdot \hat{x}^3 + (\hat{R} \cdot \operatorname{tg}(\alpha/2) + \frac{\hat{d}_0}{2}) \cdot \hat{x}^2 + \hat{R} \cdot \hat{d}_0 \cdot \hat{x} \right) - 1. \quad (30)$$

При горизонтальном движении частицы твердой фазы, составляющей пульпу, на нее воздействует гравитационная составляющая, а также восходящие потоки формирующие слив.

Исходя из этого, выполнены расчеты математической модели траектории движения частиц крупностью -0,074+0 мм и плотностью 2,60; 3,40; 4,20; 4,60 г/см³ в ванне дещламатора. Анализ результатов показал, что частицы крупностью -0,025+0 мм и плотностью менее 3,4 г/см³ удаляются восходящими потоками в слив. Частицы, крупность которых 0,025 мм и более, плотностью более 3,40 г/см³ - богатые сростки - осаждаются на дно дещламатора.

При радиально-направленном питании движение потока приобретает дугообразную форму из-за того, что на частицы действуют две основные силы: вертикальная и тангенциальная составляющая сил тяжести. Тангенциальная составляющая направлена по касательной к траектории движения частиц под определенным углом. И чем больше угол, тем больше дуга. При удалении частиц от питающего устройства происходит уменьшение угла между тангенциальной составляющей и гравитационной и на определенном участке (за 15-20 см. до днища аппарата) он будет равен нулю. В данном случае частицы разделяются согласно своей гидравлической крупности и скорости восходящего потока. Так, гидравлическая крупность у частиц граничного класса 0,025 мм различна из-за плотностных характеристик. Более плотные частицы этого класса - 3600 кг/м³ с гидравлической крупностью 0,0026 м/с - осадут на дно дещламатора, а менее плотные ($\delta=3400$ кг/м³, $\nu=0,0024$ м/с) - удалятся в слив.

Исходя из вышеизложенного, можно сделать вывод, что радиальный способ подачи исходного питания позволяет повысить эффективность гидравлического гравитационного обогащения на 3,5-4,2%, и может быть реализована на действующих дещламаторах без их существенных конструктивных изменений.

Анализ распределения массовой доли частиц твердой фазы показывает, что рудных зерен на 3,24% больше и бедных сростков на 1,68% меньше в сгущенном продукте, полученном при радиальном исходном питании по сравнению с нисходящим питанием.

стицы в явном виде для этого случая

Радиальное питание обеспечивает эффективное удаление малоплотных частиц класса крупности -0,02 мм за счет того, что пространственная ориентация потока обеспечивает их удаление восходящими потоками внутри дещламатора.

На основании вышеизложенного можно сделать следующие выводы.

1. Применение радиальной подачи исходного питания обеспечивает получение высоких показателей обогащения рудного сырья в серийно применяемых дещламаторах диаметром от 5 до 12 м.

2. При радиальном формировании исходного питания происходит выделение восходящими потоками частиц тонкого класса крупностью -0,025+0 мм в слив дещламатора ($\delta=3400$ кг/м³). При этом более плотные частицы этого класса (рудные сростки - $\delta=3600$ кг/м³) удаляются в сгущенный продукт.

3. Исследовано, что эффективность дещламации зависит от времени нахождения частиц в зоне витания аппарата. При радиальном питании это время составило 5,2-5,5 с. (с эффективностью 22,1-22,3%), что почти в два раза больше, чем при традиционном нисходящем питании - 2-2,2с., где эффективность дещламации составляет 17,8-18%.

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Шохин В.Н. Гравитационные методы обогащения / В.Н. Шохин, А.Г. Лопатин. - М.: Недра, 1980. - 400с.
2. Справочник по обогащению руд черных металлов / ред. С.Ф. Шинкоренко. - 2-е изд., перераб. и доп. - М.: Недра, 1980.- 527с.
3. Пат. 54402 Украина, МПК: E21B 43/34(2006.01). Дещламаторо [Текст] / Кривенко А.Ю.; заявитель и патентообладатель Криворожский технический университет. - № u201004636; заявл. 19.04.10; опубл. 10.11.10, Бюл. № 21/2010. - 6 с. : ил.
4. Шохин В.Н. Гравитационные методы обогащения / В.Н. Шохин, А.Г. Лопатин. - М.: Недра, 1980. - 400с.
5. Справочник по обогащению руд черных металлов / ред. С.Ф. Шинкоренко. - 2-е изд., перераб. и доп. - М.: Недра, 1980.- 527с.