

УДК 622.7

А.Ю. КРИВЕНКО, Ю.Ю. КРИВЕНКО, кандидаты техн. наук,
(Украина, Кривой Рог, Государственное ВУЗ "Криворожский национальный университет")

ДИНАМИКА ПРОЦЕССА ОБРАЗОВАНИЯ СГУЩЕННОГО ПРОДУКТА В ДЕШЛАМАТОРАХ

Проблема и ее связь с научными и практическими задачами. При переработке железной руды гравитационное гидравлическое гравитационное обогащение является важным элементом в цепи технологического процесса получения железорудного концентрата. Особенностью процесса гравитационного обогащения является его спонтанность и сложная прогнозируемость в отношении частиц, содержащих полезный компонент, и частиц пустых пород, геометрические параметры которых определяют достаточно определенную вероятность воздействия на них восходящими и нисходящими потоками в чане дешламатора.

Указанные потоки формируются за счет постоянного притока исходного питания, представляющего собой двухфазную среду с квазистационарным соотношением жидкой и твердой фаз. Динамика процесса взаимодействия частиц твердой фазы с восходящими и нисходящими потоками определяет эффективность процесса работы дешламации классифицирующего и обогатительного процесса. Решение задачи повышения эффективности процесса является весьма актуальной в связи с возрастающими требованиями к качественным показателям обогащенного продукта, предназначенного для последующего металлургического передела.

Анализ исследований и публикаций. Известные результаты исследований показали, что характер распределения частиц по высоте приемного чана дешламатора определяется геометрическими параметрами рудных частиц, рудно-породных сrostков, а также породных частиц, кроме того, превалирующую роль играет плотность частиц обогащаемого материала. Установлено, что выбор режима исходного питания определяет гидравлические скоростные потоки, которые определяют вероятность осаждения железосодержащих частиц или унос нерудных частиц со сливом дешламации [1].

Выполненные исследования показали, что выбор рациональных параметров исходного питания позволяет обеспечить повышение эффективности дешламации за счет осаждения частиц класса $-0,03 -0,02$ мм. Это достигается прежде всего за счет использования различного рода намагничивающих устройств. [2] Вместе с тем намагничивание не позволяет достичь желаемого результата применительно к частицам не подвергшихся коагуляции, а это значит необходимо выбрать такой режим исходного питания и его пространственную ориентацию, которые позволят обеспечить условия осаждения частиц, содержащих полезный компонент, на донную часть чана дешламатора.

Анализ публикаций и результатов выполненных исследований показал, что недостаточно исследованы, динамические характеристики процесса образования сгущенного продукта при обогащении железорудного сырья в дешламаторах с учетом распределения в чане дешламатора частиц различной плотности и гранулометрического состава, перемещение которых, исходя из скорости витания и скорости восходящего и нисходящего потоков, предопределяет формирование обогащенного продукта и хвостов обогатительного процесса. Это позволяет повысить показатели извлечения железосодержащего полезного компонента, повысить эффективность работы магнитных сепараторов и снизить на них непродуктивную технологическую нагрузку.

Изложение материала и результаты. При функционировании дешламатора происходит гидравлическая классификация, которая состоит в разделении минеральных зерен на классы по скорости падения в воде [3]. Классификация применяется для разделения материалов по крупности. Этот процесс возможен при разделении достаточно однородных смесей по плотности и по форме слагающих их зерен. Если компоненты смеси имеют большую разницу в плотностях, то при классификации их происходит и гравитационное обогащение. Поэтому, при применении дешламаторов в переработке железных руд можно выделить как классификацию по крупности, так и гравитационное обогащение, основанное на разнице в плотностях компонент смеси. При гидравлической классификации происходит изменение траектории движения зерен разделяемого материала под воздействием гравитационных сил, сил сопротивления движению зерен со стороны среды и инерционных сил.

Минеральная частица разделяемого материала, находясь в потоке пульпы, попадает в ванну дешламатора и первоначально поднимается вверх. Затем, в зависимости от конкретных условий, возможны два варианта: минеральная частица под действием гравитационных сил начнет падать, образуя загущенный продукт, или вместе с потоком осветленной пульпы попадает в слив.

Таким образом, в первом случае, если свойства зерна разделяемого материала отвечают качеству загущенного продукта, происходит или классификация или обогащение. Во втором случае происходит потеря промпродукта, то есть снижается качество функционирования дешламатора.

Скорость подъема зерна в ванне дешламатора, согласно математическому моделированию, определяется формулой

$$v_y = v_1 - \frac{m}{k} \left(1 - \frac{\Delta}{\delta}\right) \cdot g \cdot \left(1 - e^{-\frac{k}{m}t}\right). \quad (1)$$

де v_1 – скорость осветленного продукта, проходящего через поперечное сечение ванны дешламатора, м/с; m – масса частицы, кг; k – коэффициент пропорциональности, кг/с; Δ – плотность жидкости, в которую погружена частица, кг/м³; δ – плотность зерна в ванне дешламатора, кг/м³; g – ускорение свободного падения, м/с²; t – время, с.

Зневоднення та сушіння. Водно-шламове господарство

В свою очередь, время подъема зерна до поверхности ванны дешламатора определится уравнением

$$h_0 = \left(v_1 - \frac{m}{k} \left(1 - \frac{\Delta}{\delta} \right) g \right) t - \left(\frac{m}{k} \right)^2 g \left(1 - \frac{\Delta}{\delta} \right) \left(1 - e^{-\frac{k}{m} t} \right). \quad (2)$$

Анализ расчетных формул показывает, что при рассматриваемых временах движения зерен до поверхности ванны дешламатора экспонента является достаточно малой величиной, которой можно пренебречь, т.е.

$$e^{-\frac{k}{m} t} \approx 0.$$

В результате формула (1) принимает вид

$$v_y = v_1 - \frac{m}{k} \left(1 - \frac{\Delta}{\delta} \right) \cdot g. \quad (3)$$

На первом этапе математического моделирования естественно принять, что минеральная частица разделяемого материала имеет, при определенных допущениях, правильную геометрическую форму, близкую по соотношению размеров к форме шара. Коэффициент сопротивления среды в этом случае запишется в виде

$$k = 6 \cdot \pi \cdot \nu \cdot \Delta \cdot r, \quad (4)$$

де ν – кинематическая вязкость среды, м/с²; r – радиус зерна, м.

С учетом того, что масса шара вычисляется по формуле

$$m = \frac{4}{3} \pi \cdot r^3 \cdot \delta,$$

Получаем

$$\frac{m}{k} = \frac{2}{9} \frac{r^2}{\nu} \frac{\delta}{\Delta}. \quad (5)$$

Условие того, что минеральная частица в потоке восходящей пульпы начнет падать, определится с учетом (5) неравенством

$$\frac{2}{9} \frac{r^2}{\nu} \frac{\delta}{\Delta} \left(1 - \frac{\Delta}{\delta} \right) g > v_1. \quad (6)$$

Нерівність (6) для зручності подальших досліджень цілесообразно представити в безрозмірному вигляді.

$$\frac{2}{9} Ga \cdot \left(1 - \frac{\Delta}{\delta}\right) \frac{\delta}{\Delta} > Re, \quad (7)$$

де $Ga = \frac{r^3}{\nu^2} g$ – число Галілея; $Re = \frac{v_1 r}{\nu}$ – число Рейнольдса.

Нерівність (7) визначає якість функціонування дешламатора, а саме, з'являється можливість визначити умови розділення суміші мінеральних зерен за густоти або за розміром. Крім того, можна розглянути і загальну задачу дешламації, яка буде одночасно враховувати густоту і розміри зерен.

В загальній постановці задачі дешламації природно врахувати одразу два умови: за гравітаційним збагаченням і за гідравлічної класифікації

$$\delta_T \leq \delta \leq \delta_{\max}, \quad r_T \leq r \leq r_{\max}, \quad (8)$$

де δ_T, r_T – нижня межа технологічних вимог класифікації за густоти і радіусу зерен, відповідно, $\text{кг/м}^3, \text{м}$; δ_{\max}, r_{\max} – максимальні значення густоти і радіуса зерен, відповідно, $\text{кг/м}^3, \text{м}$.

Для зручності подальших розрахунків цілесообразно ввести безрозмірні величини

$$\Psi = \frac{\delta}{\Delta}, \quad \rho = \sqrt{B} \cdot r. \quad (9)$$

Тоді умови (8) запишуться в вигляді

$$\Psi_T \leq \Psi \leq \Psi_{\max}, \quad \rho_T \leq \rho \leq \rho_{\max}, \quad (10)$$

де $\Psi_T = \frac{\delta_T}{\Delta}, \Psi_{\max} = \frac{\delta_{\max}}{\Delta}, \rho_T = \sqrt{B} \cdot r_T, \rho_{\max} = \sqrt{B} \cdot r_{\max}, B = \frac{2g}{9\nu_1 \cdot \nu}$.

В свою чергу, нерівність (6), яка виділяє робочу зону дешламатора, в безрозмірній формі примет вигляд

$$\Psi > 1 + \frac{1}{\rho^2}. \quad (11)$$

Очевидно, рівняння, яке розділяє зони дешламатора на робочу і нерабочу, имеет вигляд

$$\Psi = 1 + \frac{1}{\rho^2}. \quad (12)$$

Условия (10) и (11) позволяют представить графически рассматриваемую задачу. В зависимости от соотношения, между ограничениями возможны с учетом того, что

$$\frac{1}{\sqrt{\Psi_{\max} - 1}} < \frac{1}{\sqrt{\Psi_T - 1}}, \rho_T < \rho_{\max},$$

три варианта:

$$1) \frac{1}{\sqrt{\Psi_{\max} - 1}} < \rho_T < \frac{1}{\sqrt{\Psi_T - 1}} < \rho_{\max}; \quad (13)$$

$$2) \frac{1}{\sqrt{\Psi_{\max} - 1}} < \frac{1}{\sqrt{\Psi_T - 1}} < \rho_T < \rho_{\max}; \quad (14)$$

$$3) \rho_T < \frac{1}{\sqrt{\Psi_{\max} - 1}} < \frac{1}{\sqrt{\Psi_T - 1}} < \rho_{\max}. \quad (15)$$

Рассмотрим оценку качества функционирования дешламатора в каждом отдельном случае.

Анализ функционирования дешламатора позволяет найти поток получаемого промпродукта, удовлетворяющего ограничениям (8).

Для нахождения потока промпродукта через нижний слив дешламатора, необходимо учесть одновременное изменение переменных Ψ и ρ . Очевидно, дифференциал потока промпродукта может быть записан в виде

$$dW = S \cdot dv d\delta, \quad (16)$$

где S – площадь поперечного сечения ванны дешламатора, м^2 ; dv , $d\delta$ – дифференциалы скорости осаждения и плотности зерен, соответственно.

Вертикальная составляющая скорости зерна в ванне дешламатора находится согласно (3) и (5) по формуле

$$v = v_1(1 - (\Psi - 1) \cdot \rho^2). \quad (17)$$

Воспользуемся формулой преобразования элемента площади к новым переменным

$$dvd\delta = \frac{D(v, \delta)}{D(\Psi, \rho)} d\Psi d\rho, \quad (18)$$

где $\frac{D(v, \delta)}{D(\Psi, \rho)} = \begin{vmatrix} v'_\Psi & v'_\rho \\ \delta'_\Psi & \delta'_\rho \end{vmatrix}$ – Якобиан.

Вычисляя частные производные, входящие в Якобиан,

$$v'_\Psi = -v_1 \cdot \rho^2, \quad v'_\rho = -2v_1 \cdot \rho \cdot (\Psi - 1), \quad \delta'_\Psi = \Delta, \quad \delta'_\rho = 0$$

и раскрывая определитель

$$\begin{vmatrix} -v_1 \cdot \rho^2 & -2v_1 \cdot \rho \cdot (\Psi - 1) \\ \Delta & 0 \end{vmatrix} = 2v_1 \cdot \Delta \cdot \rho \cdot \Psi \cdot d\Psi d\rho,$$

находим

$$dvd\delta = 2v_1 \cdot \Delta \cdot \rho \cdot \Psi \cdot d\Psi d\rho.$$

Тогда равенство (16) примет вид

$$dW = 2 \cdot S \cdot v_1 \cdot \Delta \cdot \rho \cdot \Psi \cdot d\Psi d\rho. \quad (19)$$

Поток промпродукта через нижний слив дешламатора находится путем интегрирования равенства (19)

$$W = 2S \cdot v_1 \cdot \Delta \cdot \iint_D \rho \cdot \Psi d\rho d\Psi. \quad (20)$$

Общий поток промпродукта, поступающего в ванну дешламатора и удовлетворяющего условиям (13), находится путем вычисления двойного интеграла

$$W_0 = 2 \cdot S \cdot v_1 \cdot \Delta \cdot \iint_{D_0} \rho \cdot \Psi d\rho d\Psi. \quad (21)$$

Качество функционирования дешламатора может быть определено расчетной формулой

$$\eta = \frac{1}{(\rho_{\max}^2 - \rho_T^2)(\Psi_{\max}^2 - \Psi_T^2)} \left(\left(\frac{1}{\Psi_T - 1} - \rho_T^2 \right) (\Psi_{\max}^2 - 1 - \frac{\Psi_T - 1}{\rho_T^2}) + 4 \ln(\rho_T \sqrt{\Psi_T - 1}) + \left(\rho_{\max}^2 - \frac{1}{\Psi_T - 1} \right) (\Psi_{\max}^2 - \Psi_T^2) \right). \quad (30)$$

Зневоднення та сушіння. Водно-шламове господарство

Выполненные исследования динамических характеристик процесса образования сгущенного продукта при обогащении железорудного сырья в дешламаторах показал, что необходимо учитывать необходимость поддержания рационального баланса потоков осаждающихся рудных частиц и направленных в слив породных частиц. Этот баланс должен обеспечивать максимально возможное предупреждение засорения сгущенного продукта пустыми породами и минимизацию потерь рудных железосодержащих частиц.

Результаты выполненных исследований позволяют при выполнении инженерных и научных расчетов уточнять методику определения параметров процесса дешламации при обогащении железорудного сырья на горно-обогатительных комбинатах.

Список литературы

1. Остапенко П.Е. Обогащение железных руд. – М.: Недра, 1977. – 272 с.
2. Барский М.Д., Ревнивцев В.И., Соколкин Ю.З. Гравитационная классификация зернистых материалов. – М.: Недра, 1974. – 232 с.
3. Повх И.Л. Техническая гидромеханика. – Л.: Машиностроение, 1969. – 524 с.

© Кривенко А.Ю., Кривенко Ю.Ю., 2016

*Надійшла до редколегії 15.03.2016 р.
Рекомендовано до публікації д.т.н. Т.А. Олійник*