

**Список литературы:** 1. Тихонов О.Н. Введение в динамику массопереноса процессов обогащательной технологии / О.Н. Тихонов. – Л.: Недра, 1980. 2. Пилов П.И. Научные основы сепарации и водопотребления при обогащении руд : дис. ... докт. техн. наук / П.И. Пилов. – Днепропетровск, 1993. 3. Младецький І.К., Пілов П.І. Технологічні розрахунки показників збагачення корисних копалин: навч. посібник / І.К. Младецький, П.І. Пілов. – Дніпропетровськ: НГУ, 2005 – 156 с.

*Поступила в редколлегию 13.06.09*

УДК 622.7

**А.Ю. КРИВЕНКО**, аспирант, КТУ, г. Кривой Рог

### **МАТЕМАТИЧЕСКОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ ПРОЦЕССА ОСАЖДЕНИЯ ЖЕЛЕЗОРУДНОЙ ПУЛЬПЫ ПРИ НАПРАВЛЕННОМ ДВИЖЕНИИ В ДЕШЛАМАТОРЕ**

У статті дані результати математичного моделювання для прогнозування переміщення дрібнодисперсних часток під дією сил гравітації в гідравлічних апаратах, що класифікують. Визначено основні розрахункові залежності для отримання якісних і кількісних показників збагачувального процесу при поділі залізорудної пульпи, тверда фаза якої представлена частками з різною щільністю у вузькому діапазоні параметрів гранулометричного складу.

In article results of mathematical modelling for moving forecasting small disperse particles under the influence of forces of gravitation in hydraulic classifying devices are yielded. The basic settlement dependences for reception qualitative and quantity indicators of concentrating process are defined at division of iron ore pulp which firm phase is presented by particles with different density in a narrow range of parameters granul structure.

**Постановка проблемы в общем виде.** В технологическом цикле получения концентрата из железорудного сырья важное место занимает процесс разделения измельченной руды на пустую породу и железосодержащую массу. Этот процесс реализуется с помощью различных конструкций аппаратов действие которых основано на разделении компонентов пульпы за счет придания частицам центробежного ускорения или за счет перемещения их по вертикальной составляющей под воздействием сил гравитации. Применение седиментационных аппаратов – дешламаторов, по сравнению с центробежными – гидроциклонами, позволяет обеспечить более тонкое разделение продукта на составляющие компоненты при минимальном объеме энергоза-

трат на реализацию процесса.

Процесс разделения исходного продукта в дешламаторе протекает за короткий период времени. Это предопределяет необходимость формирования исходного потока пульпы, который обеспечивал бы быстрое разделение продукта с момента его отделения от выходного устья питающего устройства до момента осаждения высокоплотных частиц и уноса в слив низкоплотных.

**Анализ последних исследований и публикаций.** Питающие устройства дешламаторов представляют собой вертикально ориентированные патрубки, вектор движения которых направлен вниз. Расстояние от устья питающего патрубка до верхней границы зоны осаждения составляет 1,5 – 2,0 м. Поток, исходящий из питающего устройства, имеет скорость, которая формируется из двух составляющих: силы гравитации и скорости потока пульпы, которая формируется в зависимости от высоты столба пульпы, определяемого расстоянием между поверхностью пульпы в накопительной емкости питающего устройства и ее поверхностью в емкости дешламатора [1].

Как указывалось выше, короткий период протекания процесса разделения исходного продукта предопределяет необходимость решения научной задачи повышения эффективности разделения обогащения железосодержащего продукта. Выполненные исследования показали, что повышение разделяющей способности питающего устройства в дешламаторе может быть достигнуто за счет изменения пространственной ориентации потока и придание ему горизонтально ориентированного вектора направления движения.

**Выделение нерешенных ранее частей общей проблемы.** Исходя из указанных предпосылок, необходима разработка математической модели, которая должна позволить прогнозировать процесс перемещения частиц в зависимости от их плотности и гранулометрического состава в зону осаждения в пески дешламации для последующего обогащения.

**Постановка задания.** Заданием выполняемых исследований является представление адекватной математической модели, которая отражает с высокой вероятностью процесс массопереноса частиц твердой фазы в ванне дешламатора при гравитационном обогащении железорудного сырья.

**Изложение основного материала исследований.** Анализ физического процесса, имеющей место при осаждении твердых частиц, показывает, что на скорость частицы, содержащейся в пульпе при выходе из питающего устройства, накладываются скорости перемещения пульпы в ванне дешламатора. Горизонтально ориентированный поток пульпы, выходя из питающего уст-

ройства, разделяется на две части. Одна часть потока направляется вверх, к сливу дешламатора, а другая - вниз, к выходу загущенного продукта.

Частицы твердой фазы пульпы, попадая в общий поток выше питающего устройства, вначале поднимаются вверх, так как их скорость меньше скорости потока пульпы [2]. Очевидно, движение вверх будет продолжаться до тех пор, пока будет иметь место неравенство, в котором левая часть приведенного неравенства представляет собой расчетное значение вертикальной проекции скорости твердой частицы в ванне дешламатора, а левая часть неравенства – скорость движения осветленного потока жидкости через поперечное сечение ванны дешламатора.

$$\frac{m}{k} \left(1 - \frac{\Delta}{d}\right) g \left(1 - e^{-\frac{k}{m}t}\right) < \frac{2Rd}{R_0^2 - r_0^2} \sqrt{\frac{2gh}{1+\chi}} \cdot \frac{c_2 - c_0}{c_2 - c_1} \quad (1)$$

где :  $m$  – масса частицы, кг;  $k$  – коэффициент пропорциональности, кг/с;  $\Delta$  – плотность жидкости, в которую погружена частица, кг/м<sup>3</sup>;  $\delta$  – наименьшая плотность зерна в ванне дешламатора, кг/м<sup>3</sup>;  $g$  – ускорение свободного падения, м/с<sup>2</sup>;  $h$  – высота столба пульпы, м;  $\chi$  – коэффициент потерь, отнесенный к скоростному напору на выходе из питающего устройства;  $c_0, c_1, c_2$  – содержание твердого продукта во входной пульпе, на сливе дешламатора и в выходном продукте, соответственно, доли ед.;  $R_0$  – радиус ванны дешламатора, м ;  $r_0$  – радиус трубы, по которой подается пульпа в ванну дешламатора, м;  $R$  – радиус диска питающего устройства;  $d$  – расстояние между дисками питающего устройства.

Решая относительно времени полученное неравенство, находим момент времени, после наступления которого частица будет осаждаться

$$t_0 = -\frac{m}{k} \ln \left( 1 - \frac{2Rd}{R_0^2 - r_0^2} \sqrt{\frac{2gh}{1+\chi}} \frac{c_2 - c_0}{c_2 - c_1} \frac{k}{mg \left(1 - \frac{\Delta}{d}\right)} \right) \quad (2)$$

Время подъема частицы ограничено глубиной погружения  $h_0$  в ванну дешламатора питающего устройства.

Для нахождения времени подъема частицы, находящейся выше питаю-

шего устройства, необходимо рассмотреть задачу Коши [3, 4]

$$\frac{dy}{dt} = -v_1 + \frac{m}{k} \left(1 - \frac{\Delta}{d}\right) g \left(1 - e^{-\frac{k}{m}t}\right) \quad (3)$$

$$y(t=0) = 0 \quad (4)$$

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

Дифференциальное уравнение (3) описывает изменение ординаты во времени, а равенство (4) указывает, что в начальный момент времени, то есть при выходе частицы из питающего устройства, ее ордината равнялась нулю. Решение задачи Коши (3), (4) имеет вид

$$y = \left(-v_1 + \frac{m}{k} \left(1 - \frac{\Delta}{d}\right) g\right)t + \left(\frac{m}{k}\right)^2 g \left(1 - \frac{\Delta}{d}\right) \left(1 - e^{-\frac{k}{m}t}\right) \quad (5)$$

Решение уравнения

$$-h_0 = \left(\frac{m}{k} \left(1 - \frac{\Delta}{d}\right) g - v_1\right)t + \left(\frac{m}{k}\right)^2 g \left(1 - \frac{\Delta}{d}\right) \left(1 - e^{-\frac{k}{m}t}\right) \quad (6)$$

позволяет найти время подъема частицы до слива дешламатора. Вместе с тем, уравнение (6) является нелинейным и допускает только численное решение. Однако, если время подъема достаточно велико, то уравнение упрощается и принимает вид

$$-h_0 = \left(-v_1 + \frac{m}{k} \left(1 - \frac{\Delta}{d}\right) g\right)t + \left(\frac{m}{k}\right)^2 g \left(1 - \frac{\Delta}{d}\right) \quad (7)$$

где  $h_0$  – высота столба пульпы, м,

Решая (7) относительно времени, находим время подъема частицы до слива дешламатора

$$t_1 = \frac{h_0 + \left(\frac{m}{k}\right)^2 g \left(1 - \frac{\Delta}{d}\right)}{v_1 - \frac{m}{k} g \left(1 - \frac{\Delta}{d}\right)}. \quad (8)$$

При условии, что если будет иметь место неравенство

$$t_0 \leq t_1, \quad (9)$$

где  $t_0$  – время опускания частицы на дно дешламатора, с

то частица не достигнет слива дешламатора и начнет осаждаться. Таким образом, условие (9) позволяет выделить частицы, которые будут осаждаться в ванне дешламатора, если они находятся выше питающего устройства.

Вместе с тем частицы, которые попадают в поток пульпы ниже питающего устройства, увлекаются этим потоком вниз. Скорость осаждения таких частиц определяется как сумма скоростей о которых говорилось выше.

$$v = \frac{2Rd}{R_0^2} \sqrt{\frac{2gh}{1+x}} \cdot \frac{c_0 - c_1}{c_2 - c_1} + \frac{m}{k} \left(1 - \frac{\Delta}{d}\right) g \left(1 - e^{-\frac{k}{m}t}\right). \quad (10)$$

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

$$\frac{dy}{dt} = v_2 + \frac{m}{k} \left(1 - \frac{\Delta}{d}\right) g \left(1 - e^{-\frac{k}{m}t}\right), \quad (11)$$

$$y(t=0) = 0. \quad (12)$$

Решение задачи Коши (11), (12) имеет вид

$$y = \left(v_2 + \frac{m}{k} \left(1 - \frac{\Delta}{d}\right) g\right) t + \left(\frac{m}{k}\right)^2 g \left(1 - \frac{\Delta}{d}\right) \left(1 - e^{-\frac{k}{m}t}\right). \quad (13)$$

Решение уравнения

$$h_1 = (v_2 + \frac{m}{k}(1 - \frac{\Delta}{d})g)t + (\frac{m}{k})^2 g(1 - \frac{\Delta}{d})(1 - e^{-\frac{k}{m}t}) \quad (14)$$

где  $v_2$  – скорость загущенного продукта, выходящего из дешламатора, м/сек.

Приведенное уравнение позволяет найти время осаждения частицы. Вместе с тем, уравнение (14) является нелинейным и допускает только численное решение. Однако, если время осаждения достаточно велико, то уравнение упрощается и принимает вид

$$h_1 = (v_2 + \frac{m}{k}(1 - \frac{\Delta}{d})g)t + (\frac{m}{k})^2 g(1 - \frac{\Delta}{d}) \quad (15)$$

где  $h_1$  высота зоны осаждения пульпы, м

Решая уравнение (15) относительно времени, находим время осаждения частицы на дно ванны дешламатора

$$t_2 = \frac{h_1 - (\frac{m}{k})^2 g(1 - \frac{\Delta}{d})}{v_2 + \frac{m}{k} g(1 - \frac{\Delta}{d})} \quad (16)$$

Отрицательным моментом является то, частицы, которые попадают в поток пульпы ниже питающего устройства, все осаждаются на дно ванны дешламатора.

Анализ функционирования дешламатора показывает, что поток пульпы, выходя из питающего устройства, движется в горизонтальном направлении. При этом происходит торможение этого потока пульпой, находящейся в ванне дешламатора, то есть имеет место, так называемая, затопленная струя [5]. Согласно теории формирования затопленных струй, изменение скорости струи является линейной функцией расстояния от полюса струи, образованного пересечением продолжением границ струи. Если воспользоваться уравнением неразрывности для несжимаемой жидкости, то величина скорости на расстоянии  $x$  от выхода из питающего устройства будет представлена формулой

$$v_x = v_0 \frac{Rd}{(R + x)(2xtg(a/2) + d)}, \quad (17)$$

где  $v_0$  – скорость выхода пульпы на выходе из питающего устройства, м/с;  $R$  – радиус диска питающего устройства, м;  $d$  – расстояние между дисками питающего устройства, м;  $\alpha$  – угол, образуемый границами струи при выходе из полюса, рад;  $x$  – расстояние от границы выхода струи из питающего устройства до сечения расчета скорости струи, м.

Уменьшение скорости потока пульпы происходит до тех пор, пока она не сравняется с величинами скоростей  $v_1$  и  $v_2$ , определяемых выше. Это позволяет определить расстояние от границы выхода струи из питающего устройства до точки затухания струи.

$$x_i = \frac{1}{4\operatorname{tg}(\alpha/2)} \left( \sqrt{(d - 2R\operatorname{tg}(\alpha/2))^2 + 8Rd\operatorname{tg}(\alpha/2)v_0/v_i} - d - 2R\operatorname{tg}(\alpha/2) \right), \quad (i = 1, 2) \quad (18)$$

### **Выводы.**

Разработанная математическая модель гравитационного обогащения железорудного сырья позволяет прогнозировать вектор направления движения частиц твердой фазы при сгущении железосодержащего продукта и удалении пустых пород в качестве хвостов обогащения в зависимости от пространственной ориентации питающего патрубка.

Установлено, что помимо физико-механических свойств обогащаемого сырья, гранулометрического состава частиц твердой фазы пульпы, эффективность обогащения определяется направлением разгрузки исходного питающего потока и глубиной положения его выходного устья.

**Список литературы:** 1. Шохин В.Н. Гравитационные методы обогащения / В.Н. Шохин, А.Г. Лопатин. – М.: Недра, 1980. – 400 с. 2. Кривенко А.Ю. Обоснование формирования исходящего потока формируемого аппаратом исходного питания седиментационного классификатора / А.Ю. Кривенко // Вісник Криворізького технічного університету. – 2009. – Вып. 23. – С. 239 – 242. 3. Савельев И.В. Курс общей физики / И.В. Савельев. – М.: Наука, 1987. – 432 с. 4. Бронштейн И.Н. Справочник по математике / И.Н. Бронштейн, К.А. Семендяев. – М.: Наука, 1981. – 718 с. 5. Повх И.Л. Техническая гидромеханика / И.Л. Повх. – Л.: Машиностроение, 1969. – 524 с.

*Поступила в редколлегию 25.05.09*