

Для более наглядной оценки зависимости годовой экономии средств - выполним расчет (5)-(7), (10)-(13) их экономии при различных значениях коэффициента загрузки трансформаторов.

Результаты расчетов представлены на рис. 4, из которого следует что экономический эффект при выводе в «холодный» резерв одного из двух недогруженных трансформаторов ГПП-6 возможен, но не всегда это решение эффективно при допустимых значениях коэффициента загрузки трансформаторов, и является сугубо индивидуальной зависимостью для каждой пары трансформаторов (в данном случае - ТРДН-63000/150).

В случае несоблюдения таких индивидуальных зависимостей, даже при выполнении условия (14), можно ожидать значительных дополнительных затрат (для ТРДН-63000/150 - до 5,07 млн грн/год).

Выводы и направление дальнейших исследований. Представленная методика позволяет рассчитать экономический эффект от вывода одного из силовых трансформаторов подстанции в «холодный» резерв, который в рассмотренном случае может составлять до 500 тыс. грн. в год.

Результаты данных исследований также позволяют решать и обратную первоначально поставленную задачу - обоснование рациональности ввода в эксплуатацию трансформатора, находившегося в «холодном» резерве.

Для повышения надежности электроснабжения целесообразно произвести реконструкцию подстанции путем замены отделителей на элегазовые выключатели, что позволит ускорить введение «холодного» резерва в случае аварии.

Список литературы

1. **Крючков И.П., Кувшинский Н.Н., Неклепаев Б.Н.** Электрическая часть электростанций и подстанций. – М.: Энергия, 1978.
2. **Федоров А.А., Каменева В.В.** Основы электроснабжения промышленных предприятий. – М.: Энергия, 1984.
3. Справочник по проектированию электроснабжения / под ред. **Барыбина Ю.Г.** / . – М.: Энергия, 1990.

Рукопись поступила в редакцию 17.03.13

УДК 622.7:622.34

Т.А. ОЛЕЙНИК, д-р техн. наук, проф., А.Ю. КРИВЕНКО, канд. техн. наук,
Ю.Ю. КРИВЕНКО, канд. техн. наук, доц., ГВУЗ "Криворожский национальный университет"

ОСОБЕННОСТИ ГИДРОДИНАМИКИ ЧАСТИЦ ТВЕРДОЙ ФАЗЫ ПУЛЬПЫ ПРИ РАДИАЛЬНО-НАПРАВЛЕННОМ ДВИЖЕНИИ ПИТАЮЩЕГО ПОТОКА ДЕШЛАМАТОРА

Представлены результаты расчетов, определяющие изотакхи (линии постоянных скоростей струи) питающей пульпы, а также содержание твердого в пульпе и в любой точке питающей струи с учетом параметров дешламатора при радиально-направленном движении потока. Установлено, что в ядре струи, вследствие интенсивного перемешивания, практически не происходит гравитационного разделения железорудного сырья. Однако при уменьшении скорости пульпы в струе интенсивность перемешивания уменьшается, вследствие чего начинает происходить гравитационное разделение железорудного сырья.

Проблема и ее связь с научными и практическими задачами. Дешламация имеет важнейшее значение при гравитационном обогащении железных руд, поскольку оказывает существенное влияние на себестоимость получения концентрата. Процесс гидравлического обогащения железорудного сырья является достаточно сложным, поскольку зависит от многочисленных воздействий, часть из которых выступает в роли возмущений, таких как содержание твердого в пульпе, температура пульпы и окружающей среды.

Одним из возможных путей прогнозирования результатов гравитационного гидравлического обогащения является метод математического моделирования.

Реализация этого метода путем построения адекватных математических моделей с последующей организацией вычислительных экспериментов на базе современной вычислительной техники дает возможность не только расширить информационный диапазон исследований, но и найти оптимальные решения.

Анализ исследований и публикаций. Решение проблемы повышения качества обогащаемого продукта при гидравлическом гравитационном обогащении в основном решалось за счет математического моделирования процесса обесшламливания и связанного с ним изменением конструктивных параметров технологического оборудования.

Вместе с тем недостаточно уделялось внимания массопереносу внутри чана дещламатора, в частности движению частиц твердой фазы в питающем потоке пульпы с учетом их массовой доли. Это усложняло процесс прогнозирования технологических показателей гидравлического обогащения с учетом физико-механических свойств обогащаемого сырья [1-3].

Постановка задачи. Одним из путей повышения эффективности гидравлического обогащения железных руд является усовершенствование способа формирования исходного питания, который оказывает существенное влияние на сепарационные характеристики дещламатора.

В свою очередь, сепарационные характеристики дещламатора находятся в прямой зависимости от факторов предопределяющих характер перемещение частиц твердой фазы.

Этими факторами являются как скорость подачи исходного питания, так и содержание твёрдого в питающем потоке.

В связи с этим, задачей исследований является установление скоростных характеристик исходного потока с учетом содержания в нем твердого при радиально-направленном питании.

Это позволит спрогнозировать сепарационные характеристики аппарата, улучшив тем самым качественные характеристики концентрата и соответственно снизить себестоимость получения готовой продукции.

Изложение материала и результаты. Анализ свойств потока, выходящего из радиально-питающего устройства (РПУ) дещламатора, позволяет сделать вывод, что его можно отнести к полным веерным затопленным струям [4].

В этом случае поток рассеивается в плоскости во все стороны, причем плотность потока практически не отличается от плотности среды, в которую он попадает, то есть от плотности пульпы в ванне.

Характерной особенностью рассматриваемой струи является то, что она расширяется в двух направлениях:

во-первых, в плоскости принудительного расширения, т.е. при выходе из РПУ;

во-вторых - в перпендикулярной плоскости в результате турбулентного перемешивания.

Для моделирования рассматриваемого потока, естественно, принять, что на выходе из РПУ начальный импульс струи рассчитывается по формуле

$$I_o = \varphi \cdot \rho \cdot v_o^2 \cdot S_o, \quad (1)$$

где φ - коэффициент, учитывающий неравномерность распределения скорости потока пульпы по боковой поверхности РПУ; ρ - плотность пульпы, кг/м³; $S_o = 2\pi R d$ - площадь боковой поверхности РПУ, м².

Текущий импульс рассматриваемой струи в ее поперечном сечении, т.е. на боковой поверхности цилиндра, определится интегралом

$$I_x = \rho \cdot \iint_D v^2 d\sigma, \quad (2)$$

где D - боковая поверхность цилиндра радиусом x , ($x > R$), м²,

$$d\sigma = \frac{ds}{|\cos \alpha|},$$

где ds - элемент площадки, м²; α - угол между направлением скорости струи и перпендикуляром к площадке ds , рад; Площадка ds представляет собой полоску на боковой поверхности цилиндра радиусом x и высотой dy

$$ds = 2\pi \cdot x \cdot dy. \quad (3)$$

Скорость движения пульпы в произвольной точке струи вследствие турбулентного перемешивания может быть записана в виде

$$v = v_m \cdot e^{-b^2 \frac{r^2}{l^2}}, \quad (4)$$

где v_m - скорость движения пульпы в центре произвольного поперечного сечения струи, м/с; b - параметр, который находится из эксперимента; r - расстояние от выбранной точки до оси струи, м; l -

длина оси струи до точки на оси, от которой рассчитывается расстояние до выбранной точки, м.

Расстояние от выбранной точки $M(x,y)$ до оси струи, которая задается функцией $a(x)$, находится по формуле

$$r = \sqrt{(x - x_o)^2 + (y - a(x_o))^2}, \quad (5)$$

где $M_o(x_o, a(x_o))$ - точка пересечения нормали.

Для нахождения абсциссы x_o необходимо решить уравнение, которое является уравнением нормали

$$y - a(x_o) + \frac{x - x_o}{a'(x_o)} = 0, \quad (6)$$

где $a'(x)$ - производная функции $a(x)$.

В свою очередь, длина оси струи находится с помощью интеграла

$$l = \int_{x_n}^{x_o} \sqrt{1 + (a'(x))^2} dx, \quad (7)$$

где x_n - расстояние, на котором начинает формироваться основной участок струи, м.

Учитывая, что направление скорости в струе определяется функцией $a(x)$, имеет место

$$\cos \alpha = \frac{1}{\pm \sqrt{1 + (a'(x))^2}}. \quad (8)$$

Тогда формула (2) с учетом (4), (8) примет вид

$$I_x = 2\pi \cdot \rho \cdot v_m^2 \cdot x_o \cdot \sqrt{1 + (a'(x_o))^2} \cdot \int_{-\infty}^{\infty} e^{-2 \cdot b^2 (1 + (a'(x_o))^2) \cdot \frac{\xi^2}{l^2}} d\xi. \quad (9)$$

При записи интеграла в (9) было принято, что в направлении перпендикулярном оси струя быстро “затухает”, что дает возможность расширить пределы интегрирования до бесконечности.

Подставляя в (9) величину интеграла, которая равна

$$\int_{-\infty}^{\infty} e^{-2 \cdot b^2 (1 + (a'(x_o))^2) \cdot \frac{\xi^2}{l^2}} d\xi = \frac{l \cdot \sqrt{\pi}}{b \cdot \sqrt{2(1 + (a'(x_o))^2)}},$$

находим

$$I_x = \frac{\sqrt{2\pi^3} \cdot \rho \cdot v_m^2 \cdot x_o \cdot l}{b}. \quad (10)$$

Далее, необходимо воспользоваться тем, что количество движения пульпы, проходящей через каждое поперечное сечение струи, остается постоянным и равно начальному количеству движения пульпы, то есть

$$I_x = I_o \quad (11)$$

Подставляя (1) и (10) в равенство (11), находим

$$v_m = v_o \sqrt{\frac{2}{\pi} \frac{\varphi \cdot R \cdot d \cdot b}{x_o \cdot l}}. \quad (12)$$

Подставляя (12) в (4), находим формулу, которая дает возможность вычислить скорость пульпы в любой точке струи

$$v = v_o \sqrt{\frac{2}{\pi} \frac{\varphi \cdot R \cdot d \cdot b}{x_o \cdot l}} \cdot e^{-b^2 \frac{(x-x_o)^2 + (y-a(x_o))^2}{l^2}}. \quad (13)$$

Направление скорости, величина которой рассчитывается по формуле (3.17), задается единичным вектором

$$\vec{n} = \left(\frac{1}{\sqrt{1 + (a'(x_o))^2}}; \frac{a'(x_o)}{\sqrt{1 + (a'(x_o))^2}} \right). \quad (14)$$

Необходимо отметить, что решение рассматриваемой задачи упрощается, если сначала выбрать точку $M_o(x_o, a(x_o))$ на оси струи. Тогда, согласно формуле (14), можно рассчитать вели-

чину скорости в точках $M\left(x, a(x_0) - \frac{x - x_0}{a'(x_0)}\right)$.

Формула (12) позволяет вычислить минимальное расстояние, на котором она применима. Очевидно, что скорость струи не может быть больше начальной, поэтому минимальное расстояние находится из решения уравнения

$$x \cdot \int_{x_n}^x \sqrt{1 + (a'(x))^2} dx = \sqrt{2/\pi} \cdot \phi R d b \cdot \quad (15)$$

Если задана минимальная скорость струи v_{\min} , то можно определить кинематическую дальностью струи, т.е. расстояние, на котором кончается осязаемая струя. Для этого необходимо решить уравнение

$$x \cdot \int_{x_n}^x \sqrt{1 + (a'(x))^2} dx = \sqrt{\frac{2}{\pi}} \cdot \left(\frac{v_0}{v_{\min}}\right)^2 \cdot \phi R d b \cdot \quad (16)$$

Формула (13) позволяет определить изотакси, то есть линии постоянных скоростей струи. Путем несложных преобразований формулы (13) находим параметрическое представление изотакс

$$\begin{aligned} x &= x_0 \pm \frac{a'(x_0)}{\sqrt{1 + (a'(x_0))^2}} \frac{l}{b} \ln \left(\frac{v_0}{v} \sqrt{\frac{2}{\pi} \frac{\phi \cdot R \cdot d \cdot b}{x_0 \cdot l}} \right) \\ y &= a(x_0) \mp \frac{1}{\sqrt{1 + (a'(x_0))^2}} \frac{l}{b} \ln \left(\frac{v_0}{v} \sqrt{\frac{2}{\pi} \frac{\phi \cdot R \cdot d \cdot b}{x_0 \cdot l}} \right), \end{aligned} \quad (17)$$

Задавая минимальную величину скорости потока пульпы, можно определить внешние контуры струи.

Поток пульпы, выходящий из РПУ, имеет содержание твердого, которое отличается от содержания твердого в ванне дещламматора. Это приводит к тому, что, благодаря перемешиванию в поперечных сечениях струи, устанавливаются характерные профили содержания твердого с максимальным значениям на оси струи и плавным спадом к ее краям.

Для нахождения содержания твердого на оси струи необходимо знать общую массу твердого, которую вносит струя в окружающее ее пространство, а также характер распределения твердого в поперечных сечениях струи. Масса частиц, которая проходит через поперечное сечение, постоянна и равна начальной массе

$$M_x = M_0. \quad (18)$$

Это следует из закона сохранения массы вещества. Второе предположение о распределении содержания твердого в поперечных сечениях струи, следуя турбулентному характеру перемешивания, можно записать как и для скорости пульпы в струе, в виде

$$c = c_m \cdot e^{-\frac{k^2 r^2}{l^2}}, \quad (19)$$

где c - содержание твердого в произвольной точке струи, кг/кг; c_m - содержание твердого на оси струи, кг/кг; k - экспериментальная постоянная.

Поскольку скорость и плотность частиц в струе распределены неравномерно, то поток массы частиц через поперечное сечение струи, выражается посредством интеграла

$$M_x = \iint_D c \cdot v \cdot d\sigma \cdot \quad (20)$$

Подставляя (4), (19) и (20) в (18), получаем

$$c_m \cdot v_m \cdot \iint_D e^{-\frac{(k^2 + b^2)r^2}{l^2}} d\sigma = M_0 \cdot \quad (21)$$

Учитывая, что интегрирование проводится так же, как и для случая расчета скорости струи, интеграл в (21) можно записать в виде

$$\iint_D e^{-\frac{(k^2+b^2)r^2}{l^2}} d\sigma = 2\pi \cdot \sqrt{1+(a'(x_o))^2} \cdot x_o \cdot \int_{-\infty}^{\infty} e^{-\frac{(k^2+b^2)\sqrt{1+(a'(x_o))^2} \xi^2}{l^2}} d\xi. \quad (22)$$

Так как

$$\int_{-\infty}^{\infty} e^{-\frac{(b^2+k^2)\sqrt{1+(a'(x_o))^2} \xi^2}{l^2}} d\xi = \frac{l \cdot \sqrt{\pi}}{\sqrt{b^2+k^2} \cdot \sqrt{1+(a'(x_o))^2}} \quad \text{и} \quad M_o = 2\pi \cdot R \cdot d \cdot v_o \cdot c_o,$$

то

$$c_m = c_o \sqrt{\frac{(b^2+k^2)\varphi \cdot R \cdot d}{\sqrt{2\pi} \cdot x_o \cdot l \cdot b}}. \quad (23)$$

Тогда, согласно (19), содержание твердого в любой точке струи находится по формуле

$$c = c_o \sqrt{\frac{(b^2+k^2)\varphi \cdot R \cdot d}{\sqrt{2\pi} \cdot x_o \cdot l \cdot b}} \cdot e^{-k^2 \frac{(x-x_o)^2 + (y-a(x_o))^2}{l^2}}. \quad (24)$$

Уравнения линий постоянного содержания твердого в пульпе определяются, согласно (24), в параметрическом виде по формулам

$$x = x_o \pm \frac{a'(x_o)}{\sqrt{1+(a'(x_o))^2}} \frac{l}{k} \ln \left(\frac{c_o}{c} \sqrt{\frac{(b^2+k^2)\varphi \cdot R \cdot d}{\sqrt{2\pi} \cdot x_o \cdot l \cdot b}} \right)$$

$$y = a(x_o) \mp \frac{1}{\sqrt{1+(a'(x_o))^2}} \frac{l}{k} \ln \left(\frac{c_o}{c} \sqrt{\frac{(b^2+k^2)\varphi \cdot R \cdot d}{\sqrt{2\pi} \cdot x_o \cdot l \cdot b}} \right), \quad (25)$$

Таким образом, поток пульпы, выходящий из РПУ, образует струю, в которой происходит турбулентное перемешивание частиц железорудного сырья. При этом скорость пульпы и содержание твердого изменяются в струе согласно закономерностям, представленными формулами (13) и (24). Необходимо подчеркнуть, что в ядре струи, вследствие интенсивного перемешивания, практически не происходит гравитационного разделения железорудного сырья. Однако при уменьшении скорости пульпы в струе интенсивность перемешивания уменьшается, вследствие чего начинает происходить гравитационное разделение железорудного сырья.

Выводы и направление дальнейших исследований. В соответствии с установленными расчетными зависимостями установлено, что скорость потока пульпы на выходе из устройства исходного питания зависит от параметров его конструктивных элементов, а также от содержания твердого в питающем потоке.

Вследствие интенсивного перемешивания, практически не происходит гравитационного разделения железорудного сырья. Однако при уменьшении скорости пульпы в струе интенсивность перемешивания уменьшается, вследствие чего начинает происходить гравитационное разделение железорудного сырья.

Дальнейшие исследования закономерностей формирования распределенного потока частиц твердой фазы позволят установить закономерности их осаждения с их гидравлической крупности и конструктивных параметров обогатительных аппаратов.

Список литературы

1. Барский М. Д. Гравитационная классификация зернистых материалов / М.Д. Барский, В.И. Ревнивцев. – М. : Недра, 1974. – 232 с.
2. Остапенко П. Е. Обогащение железных руд / П.Е. Остапенко. – М. : Недра, 1977. – 272 с.
3. Барский М. Д. О соотношении скорости витания и осаждения твердых частиц в жидкой среде / М.Д. Барский, А.В. Говоров // Горный журнал. – 1978. – № 1. – С. 169–171.
4. Повх И.Л. Техническая гидромеханика / И.Л. Повх. – Л.: Машиностроение, 1969. – 524

Рукопись поступила в редакцию 19.03.13