

**Р.И. ГРИЦАН,**

**А.Ю. КРИВЕНКО, Ю.Ю. КРИВЕНКО,** кандидати техн. наук,

(Україна, Кривий Ріг, Державний ВНЗ "Криворізький національний університет")

### **МОДЕЛЬ ДВИЖЕНИЯ ЧАСТИЦ ТВЕРДОЙ ФАЗЫ ПИТАЮЩЕЙ ПУЛЬПЫ В РАДИАЛЬНЫХ СГУСТИТЕЛЯХ**

*Проблема и ее связь с научными и практическими задачами.* Широкое применение при обогащении железорудного сырья, нашли гидравлические гравитационные способы обогащения, в которых в качестве технологического оборудования применяются дешламаторы. Эффективность этих устройств обеспечивается за счет разделения компонентов твердой фазы пульпы по гидравлической крупности с учетом формируемых восходящих потоков.

Процесс обогащения в существующих конструкциях дешламаторов инициируется потоком исходного питания. Вместе с тем, применяемый нисходящий порядок исходного питания ограничивает прирост качественных показателей песков дешламации, из-за совпадения вектора направления движения частиц твердой фазы с вектором направления гравитационной составляющей. Такой порядок формирования исходного потока предопределял неполный вынос мелких нерудных частиц из нижних слоев обогатительного аппарата, в виду повышения плотности среды, обусловленной соотношением жидкой и твердой фаз.

*Анализ исследований и публикаций.* Решение проблемы повышения качества обогащаемого продукта при гидравлическом гравитационном обогащении в основном было связано, с изменением конструкции самого обогатительного аппарата или изменения характеристик питающей пульпы (ее температуры, плотности, внесения флокулянтов и т.д.). Внимание же массопереносу внутри чана дешламатора, в частности движению частиц в питающем потоке пульпы, уделялось недостаточно [1, 2].

*Постановка задачи.* Сепарационные характеристики дешламатора находятся в прямой зависимости от факторов предопределяющих характер перемещение частиц твердой фазы. Этими факторами являются геометрические параметры аппарата, скорость и направление исходного потока, глубина разгрузки, скорость восходящего потока, а также удельная технологическая нагрузка на оборудование. В связи с этим, задачей исследований является установление динамики пространственного перемещения частиц твердой фазы с учетом влияния указанных факторов.

*Изложение материала и результаты.* Зависимость динамики массопереноса частиц твердой фазы железорудной пульпы показывает, что формирование

восходящих потоков в чане дешламатора обусловлена исходным питанием, объем поступления которого составляет 600 – 900 м<sup>3</sup>/ч. Такая нагрузка предопределяет формирование потоков, перемещающих частицы в ограниченном пространстве аппарата, с учетом их геометрических параметров и физико-механических свойств.

Рассматривая динамику движения отдельных частиц можно прогнозировать показатели обогащения. Вместе с тем для управления и оптимизации обогащательного процесса необходимо не только знать взаимосвязь восходящих потоков и гидравлическую крупность, но и траекторию перемещения частицы и всего потока в целом.

Анализ функционирования дешламатора показывает, что поток пульпы, выходя из радиального питающего устройства (РПУ) дешламатора, движется в горизонтальном направлении. При этом происходит торможение этого потока пульпой, находящейся в ванне дешламатора, то есть имеет место, так называемая, затопленная струя [3].

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 РПУ представится формулой

$$v_x = v_0 \frac{R \cdot d_0}{(R + x)(2x \cdot \operatorname{tg}(\alpha / 2) + d_0)},$$

где  $\alpha$  – угол, образуемый границами струи при выходе из полюса, рад;  $x$  – расстояние от границы выхода струи из РПУ до сечения расчета скорости струи, м;  $v_0$  – скорость пульпы на выходе из РКУ, м/с;  $R$  – радиус диска РКУ, м;  $d_0$  – расстояние между дисками РКУ.

В дальнейшем, представляется целесообразным для упрощения исследований записать формулу в безразмерном виде

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

где  $\hat{v}_x = \frac{v_x}{v_0}$ ,  $\hat{v}_0 = \frac{v_0}{v_0}$ ,  $\hat{R} = \frac{R}{\Delta l}$ ,  $\hat{d}_0 = \frac{d_0}{\Delta l}$ ,  $\hat{x} = \frac{x}{\Delta l}$ .

Анализ численной интерпретации динамики скорости потока содержащего частицы различной крупности и плотности показывает, что его перемещение в виде затопленной струи происходит в среде обладающей высокой плотностью.

## Гравітаційна сепарація

В связи с этим после выхода из устройства исходного питания поток сразу же начинает снижать свою скорость по параболической зависимости. Постепенное снижение скорости потока происходит до расстояния от устья радиального питающего устройства составляющего 0,7-0,9 м. За указанной границей скорость потока и составляющих его элементов практически не изменяется. После снижения скорости до минимального уровня поток теряет свою структуру, при этом перемещение его элементов обусловлено только постоянным притоком пульпы поступающей в чан дешламатора.

За зоной снижения скорости потока поступающего из радиального питающего устройства перемещение среды соответствует скорости исходного питания с учетом диаметра дешламатора.

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

$$\frac{d\hat{x}}{d\tau} = \hat{v}_0 \frac{\hat{R} \cdot \hat{d}_0}{(\hat{R} + \hat{x})(2\hat{x} \cdot \text{tg}(\alpha/2) + \hat{d}_0)}, \quad (1)$$

$$\hat{x}(\tau = 0) = 0. \quad (2)$$

Интегрирование уравнения (1) дает решение в виде

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

После вычисления интеграла в левой части равенства (3) с учетом начального условия (2), окончательно получаем

$$\frac{2}{3} \text{tg}(\alpha/2) \cdot \hat{x}^3 + (\hat{R} \cdot \text{tg}(\alpha/2) + \frac{\hat{d}_0}{2}) \cdot \hat{x}^2 + \hat{R} \cdot \hat{d}_0 \cdot \hat{x} = \hat{v}_0 \cdot \hat{R} \cdot \hat{d}_0 \cdot \tau. \quad (4)$$

Преобразовав (4), получаем в параметрическом виде уравнение траектории частицы для случая ее попадания в восходящий поток пульпы, выходящей из РПУ

$$\frac{2}{3} \text{tg}(\alpha/2) \cdot \hat{x}^3 + (\hat{R} \cdot \text{tg}(\alpha/2) + \frac{\hat{d}_0}{2}) \cdot \hat{x}^2 + \hat{R} \cdot \hat{d}_0 \cdot \hat{x} = \hat{v}_0 \cdot \hat{R} \cdot \hat{d}_0 \cdot \tau, \quad (5)$$

$$\hat{y} = (1 - \hat{v}_1) \cdot \tau + e^{-\tau} - 1. \quad (6)$$

Если частица попадает в нисходящий поток пульпы, выходящий из РПУ, то, получаем параметрическое представление траектории частицы в данном случае

$$\frac{2}{3} \operatorname{tg}(\alpha/2) \cdot \hat{x}^3 + (\hat{R} \cdot \operatorname{tg}(\alpha/2) + \frac{\hat{d}_0}{2}) \cdot \hat{x}^2 + \hat{R} \cdot \hat{d}_0 \cdot \hat{x} = \hat{v}_0 \cdot \hat{R} \cdot \hat{d}_0 \cdot \tau, \quad (7)$$

$$\hat{y} = (1 + \hat{v}_2) \cdot \tau + e^{-\tau} - 1. \quad (8)$$

Параметрическая запись траектории частицы в восходящем потоке пульпы позволяет записать явное представление этой траектории

$$\hat{y} = \exp \left( - \frac{1}{\hat{v}_0 \hat{R} \hat{d}_0} \left( \frac{2}{3} \operatorname{tg}(\alpha/2) \cdot \hat{x}^3 + (\hat{R} \cdot \operatorname{tg}(\alpha/2) + \frac{\hat{d}_0}{2}) \cdot \hat{x}^2 + \hat{R} \cdot \hat{d}_0 \cdot \hat{x} \right) \right) + (1 - \hat{v}_1) \frac{1}{\hat{v}_0 \hat{R} \hat{d}_0} \left( \frac{2}{3} \operatorname{tg}(\alpha/2) \cdot \hat{x}^3 + (\hat{R} \cdot \operatorname{tg}(\alpha/2) + \frac{\hat{d}_0}{2}) \cdot \hat{x}^2 + \hat{R} \cdot \hat{d}_0 \cdot \hat{x} \right) - 1. \quad (9)$$

Аналогично, для движения частицы в нисходящем потоке пульпы с помощью формул (7), (8) получаем уравнение траектории частицы в явном виде для этого случая

$$\hat{y} = \exp \left( - \frac{1}{\hat{v}_0 \hat{R} \hat{d}_0} \left( \frac{2}{3} \operatorname{tg}(\alpha/2) \cdot \hat{x}^3 + (\hat{R} \cdot \operatorname{tg}(\alpha/2) + \frac{\hat{d}_0}{2}) \cdot \hat{x}^2 + \hat{R} \cdot \hat{d}_0 \cdot \hat{x} \right) \right) + (1 + \hat{v}_2) \frac{1}{\hat{v}_0 \hat{R} \hat{d}_0} \left( \frac{2}{3} \operatorname{tg}(\alpha/2) \cdot \hat{x}^3 + (\hat{R} \cdot \operatorname{tg}(\alpha/2) + \frac{\hat{d}_0}{2}) \cdot \hat{x}^2 + \hat{R} \cdot \hat{d}_0 \cdot \hat{x} \right) - 1. \quad (10)$$

Сепарационный процесс, реализуемый в дешламаторе реализуется за счет взаимодействия целого ряда факторов при реализации которых происходит образование двух потоков массопереноса один из которых представляет собой крупные плотные частицы формирующие сгущенный продукт, а другой поток – мелкие малоплотные и перизмельченные плотные частицы формирующие слив дешламации – хвосты гравитационного обогащения.

Сепарационный процесс должен подтверждаться не только сопоставлением гравитационной крупности частиц и скорости восходящий потоков, но и численными значениями траектории движения частиц твердой фазы пульпы. Это необходимо в силу особенности формирования исходного потока пульпы исходящего из радиального устройства. Этой особенностью является то, что изначально движение потока и составляющих его частиц ориентировано горизонтально.

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

Исходя из этого выполнены выборочные расчеты математической модели траектории движения частиц плотностью 2,60; 3,40; 4,20; г/см<sup>3</sup> при восходящих и нисходящих потоках в дешламаторе.

## **Гравітаційна сепарація**

---

Движение частиц плотностью  $2,6 \text{ г/см}^3$  размером  $0,02; 0,025; 0,03$  мм характеризуется восходящей траекторией. Подобная траектория наблюдается из-за того, что частицы попадая в восходящие потоки, имеют гидравлическую крупность ниже, чем скорость восходящих потоков внутри чана дешламатора. Частицы же плотностью  $3,4 \text{ г/см}^3$  ведут себя неоднородно. При крупности от  $-0,025+0,02$  частицы твердой фазы характеризуются восходящей траекторией и соответственно перемещаются в зону слива. Твердая фаза, размер которой превышает  $0,03$  мм характеризуются нисходящей траекторией и соответственно попадают в зону формирования сгущенного продукта. Материал плотностью  $4,2 \text{ г/см}^3$  осаждается и попадает в зону сгущенного продукта. Исключение составляет частицы крупностью менее  $0,02$  мм. Эти переизмельченные частицы в основном попадают в зону слива и уносятся с хвостами обогащения. Потери этих, как правило, железосодержащих частиц могут быть минимизированы за счет управления процессом дешламации.

Переизмельченные частицы высокой плотности, которые представляют собой богатые рудные сростки и частицы магнетита, согласно траектории их движения, практически все попадают в сгущенный продукт дешламатора. Вместе с тем, частицы, крупность которых менее  $0,02$  мм могут частично перемещаться в слив, так как их гравитационная крупность может быть ниже скорости восходящего потока. В связи с наличием турбулентных потоков в дешламаторе эти частицы также могут увлекаться в зону формирования сгущенного продукта. Это объясняется тем, что частицы высокой плотности, но минимальной крупности, попадая в нижнюю часть дешламатора, где скорость восходящих потоков меньше гравитационной крупности этих частиц, будут осаждаться на донную часть дешламатора.

*Выводы и направление дальнейших исследований.* В соответствии с установленными расчетными зависимостями установлено, что скорости потока пульпы на выходе из устройства исходного питания зависит от параметров его конструктивных элементов. При этом формирование горизонтально ориентированного направленного потока позволяет обеспечить предпосылки для эффективного осаждения частиц твердой фазы пульпы крупностью  $-0,074+0$  мм.

Перемещение частиц твердой фазы пульпы происходит в потоке на выходе из устройства исходного питания и по мере гашения скорости "затопленной струи" пульпы происходит постепенное осаждение частиц гравитационная крупность которых превышает скорость потока.

Основная массовая доля переизмельченных частиц крупностью  $-0,02$  мм представленных малоплотными породами, бедными сростками и переизмельченным магнетитом имеют гравитационную крупность, величина которой меньше скорости восходящих потоков дешламатора и перемещаются в зону слива, формируя хвосты обогащения.

### Список литературы

1. Потапов В.Д. Применение дешламации при обогащении железных руд. – М.: "Черметинформация", 1980. – 37 с.
2. Лященко П.В. Гравитационные методы обогащения. – М.-Л.: Гостоптехиздат, 1940. – 359 с.
3. Повх И.Л. Техническая гидромеханика. – Л.: Машиностроение, 1969. – 524 с.

© Грицан Р.И., Кривенко А.Ю., Кривенко Ю.Ю., 2017

*Надійшла до редколегії 25.11.2017 р.  
Рекомендовано до публікації д.т.н. Т.А. Олійник*

УДК 622.7

**А.Ю. КРИВЕНКО, Ю.Ю. КРИВЕНКО**, кандидати техн. наук,  
(Україна, Кривий Ріг, Державний ВНЗ "Криворізький національний університет")

### **МАТЕМАТИЧЕСКАЯ МОДЕЛЬ ГРАВИТАЦИОННОГО РАЗДЕЛЕНИЯ ЖЕЛЕЗОРУДНОГО СЫРЬЯ В ВАННЕ МАГНИТНОГО ДЕШЛАМАТОРА**

*Проблема и ее связь с научными и практическими задачами.* Процесс разделения компонентов рудного сырья в дешламаторах 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 на выходе из загрузочного устройства аппарата, который реализуется за счет гидродинамического взаимодействия двух сред: потока исходного питания в виде "затопленной струи" и пульпы, находящейся в чане дешламатора.

Взаимодействие указанных сред предопределяет возникновение турбулентных потоков, благодаря которым происходит осаждения частиц высокой плотности, формирующих сгущенный продукт, а также вынос частиц низкой плотности в слив.

Определение параметров потоков, формирующихся в чане дешламатора, позволяет прогнозировать эффективность процесса в зависимости от физико-механических свойств исходного сырья и его гранулометрического состава.

В частности, определяя скорость частиц твердой фазы пульпы исходного сырья, становится возможным выяснить их поведение и соответственно определить прогнозные показатели такие как: масса песков, высота слоя песков, плотность сгущенного и осветленного продукта. Это позволит выбрать технологические параметры, на основании которых будут обеспечены как максимальное содержание полезного компонента в сгущенном продукте, так и минимальное содержание его в сливе.