

УДК 622.753:622.648.24

Б.А. БЛЮСС, д-р техн. наук,

Е.В. СЕМЕНЕНКО, канд. техн. наук,

Н.А. ШМЕЛЕВ

(Украина, Днепропетровск, Институт геотехнической механики)

НАУЧНЫЕ ОСНОВЫ РАЗДЕЛЕНИЯ ЧАСТИЦ ПРИ ТЕЧЕНИИ В ПРИПОВЕРХНОСТНОМ СЛОЕ ПЕРЕЛИВА ГРАВИТАЦИОННЫХ АППАРАТОВ

В технологиях обогащения минерального сырья широко применяются гравитационные аппараты, в которых вода используется как среда разделения твердых частиц по плотности и крупности [1–5]. Эти аппараты характеризуются экологической безопасностью, надежностью, простотой конструкции и удобством в эксплуатации. Принцип работы многих гравитационных аппаратов основан на осаждении частиц при течении гидросмеси в тонком приповерхностном слое, так называемом слое перелива, когда более легкие частицы, достигая борта ванны, остаются над бортом и уходят в слив, а тяжелые – остаются в ванне аппарата. По такому принципу работают струйные зумпфы, гравитационные и пирамидальные отстойники, шламоборники, осветители технической воды, радиальные сгустители и сгустительные воронки [4–8].

Многие из этих аппаратов используются на начальных стадиях обогащения или же для стабилизации параметров пульпы, подаваемых на основную сепарацию. Поэтому от эффективности и стабильности их работы во многом зависит надежность всего технологического комплекса [7–11]. Однако методы расчетов аппаратов такого типа основаны на инженерных подходах или на результатах экспериментальных исследований конкретной установки и соответственно не могут применяться в большинстве случаев [5, 10, 12]. В известных методиках расчета гравитационных аппаратов при определении гидравлической крупности твердых частиц не учитываются стесненные условия падения частиц [13, 14] и изменение высоты слоя перелива по длине аппарата [5, 10]. Большинство алгоритмов не рассматривают изменение объемной доли частиц в процессе течения пульпы в слое и отсутствует оценка критических параметров течения, что затрудняет расчет оптимальных параметров аппаратов [11, 12].

Цель статьи – разработка математической модели течения пульпы в приповерхностном слое гравитационного аппарата с учетом постоянного осаждения из него твердых частиц и проведение на ее основе исследований.

Поле течения слоя перелива в рассматриваемых гравитационных

аппаратах можно условно разбить на два (рис. 1): течение в приповерхностном слое, которое осуществляется от подающего устройства на перелив через борт ванны, и основное течение вниз, которое реализуется внутри ванны [12–14].

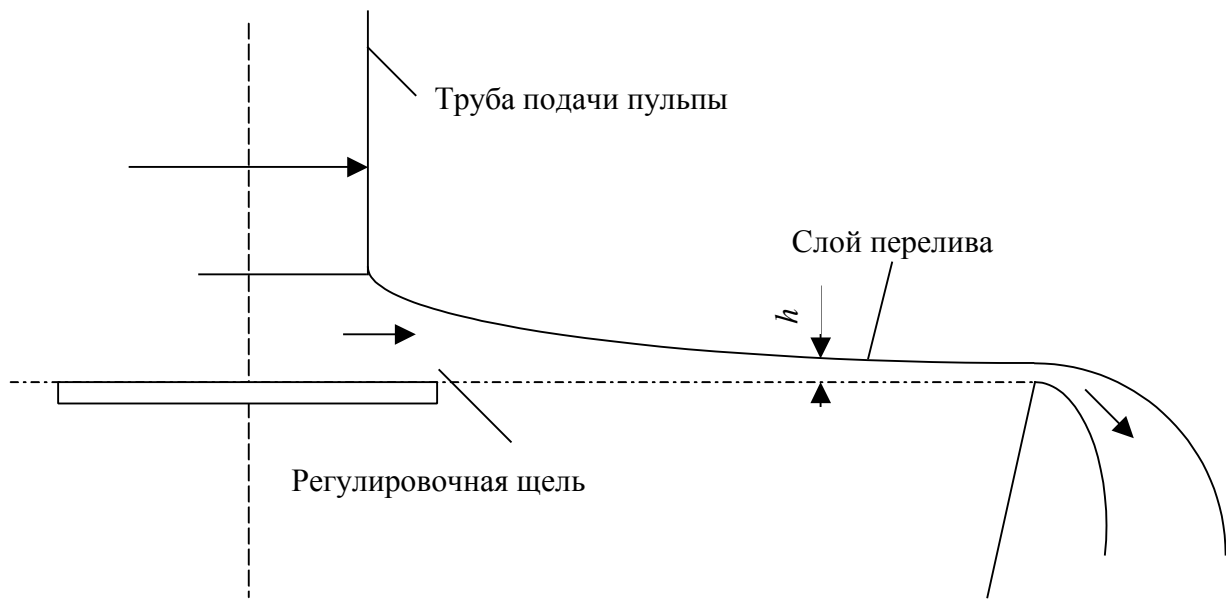


Рис. 1. Схема течения слоя перелива в гравитационном аппарате

Течение в приповерхностном слое осуществляется радиально по направлению от подающего устройства к сливному борту ванны. Во время этого течения происходит осветление текущего слоя за счет его разгрузки в основной поток. Высота слоя перелива переменная и зависит от размера ванны, концентрации и характера твердого вещества в питании, а также расхода гидросмеси. При движении гидросмеси в слое перелива не все частицы твердого попадают в основной поток, часть их уходит через сливной борт в перелив, туда же уходит и некоторая часть жидкости. Поэтому концентрация твердых частиц в основном потоке изменится по отношению к начальной.

Будем предполагать, что течение пульпы в слое перелива осесимметрично, скорость жидкости в направлении, поперечном слою, отсутствует, нижняя граница приповерхностного слоя и верхняя граница основного потока движутся с одинаковой скоростью, справедлива гипотеза мелкой воды. Для построения математической модели течения пульпы в приповерхностном слое перелива гравитационного аппарата использованы законы сохранения массы и импульса:

$$\frac{d}{dr}(r\phi u h) = -r\phi(1-\phi)^n w_0, \quad \left(\frac{q}{2\pi} + r\phi u h\right) \frac{du}{dr} = -gr(1-\phi)u h \frac{dh}{dr}, \quad (1)$$

$$2\pi r(1-\varphi)uh = q, \quad n = 5 \left(1 - 0.2 \lg \left(\frac{gd^3}{\nu^2} \right) \right); \quad (2)$$

$$w_0 = \begin{cases} \frac{gd^2}{18\nu} \frac{\rho_s - \rho_f}{\rho_f} & \text{при } d \leq 0.25 \text{ мм;} \\ 1,634 \sqrt{gd} \frac{\rho_s - \rho_f}{\rho_f} & \text{при } d > 0.25 \text{ мм;} \end{cases}$$

где r – координата текущего поперечного сечения слоя перелива; φ – объемная доля твердого в слое перелива; u – скорость пульпы в слое перелива; h – толщина слоя перелива; w_0 – гидравлическая крупность частиц твердого материала; n – коэффициент, учитывающий стесненные условия осаждения частиц в слое перелива; q – секундный расход воды слоя перелива гравитационного аппарата; g – ускорение свободного падения; d – средневзвешенный диаметр твердых частиц; ρ_s – плотность частиц; ρ_f – плотность воды; ν – кинематический коэффициент вязкости.

После некоторых преобразований уравнения (1) и (2) можно записать в виде системы дифференциальных уравнений с соответствующими граничными условиями:

$$\frac{dh}{dr} = -2\pi \frac{(uh)^{n+2} + \frac{w_0}{r^{n-1}} \left(\frac{q}{2\pi} \right)^n uh - \frac{w_0}{r^n} \left(\frac{q}{2\pi} \right)^{n+1}}{(2\pi r u^3 - qg)(uh)^{n+1}} u^2; \quad (3)$$

$$\frac{du}{dr} = \frac{(uh)^{n+2} + \frac{w_0}{r^{n-1}} \left(\frac{q}{2\pi} \right)^n uh - \frac{w_0}{r^n} \left(\frac{q}{2\pi} \right)^{n+1}}{(2\pi r u^3 - qg)(uh)^{n+1}} \frac{qg}{rh}; \quad (4)$$

$$\varphi = 1 - \frac{q}{2\pi r u h}; \quad (5)$$

$$h(r_0) = h_0; \quad \varphi(r_0) = \varphi_0; \quad u(r_0) = \frac{q}{2\pi r_0 (1 - \varphi_0) h_0}, \quad (6)$$

где r_0 – радиус устройства подачи пульпы в гравитационный аппарат; h_0 – высота слоя перелива при выходе из устройства подачи пульпы; φ_0 – объемная доля твердого в пульпе на выходе из устройства подачи.

При решении системы уравнений (3)–(5) с граничными условиями (6), определяется распределение по радиусу аппарата высоты слоя, скорости и

объемной доли твердого пульпы в зависимости от расхода воды, подаваемой в слой перелива, содержание твердого в питании и начальной высоты слоя. Это позволяет рассчитать высоту слоя на краю ванны гравитационного аппарата, а также расход и концентрацию пульпы, поступающей в перелив.

Уравнения (3)–(5) существенно нелинейны, и их решить можно только численными методами. Однако результаты аналитического исследования уравнений (3) и (4) позволяют сделать некоторые заключения о возможных режимах течения пульпы в слое перелива и характере этого течения.

Так, знаменатели правых частей этих уравнений обращаются в ноль при скорости потока, равной критической величине:

$$u_{кр} = \sqrt[3]{\frac{qg}{2\pi r}}, \quad (7)$$

где $u_{кр}$ – критическая скорость пульпы в слое перелива.

В этой точке параметры потока не определены, поскольку производные от толщины и скорости потока стремятся к бесконечности:

$$\frac{dh}{dr} \rightarrow \infty \quad \text{и} \quad \frac{du}{dr} \rightarrow \infty.$$

Такой режим не способствует сепарации твердых частиц из слоя перелива и его следует избегать при проектировании гравитационных аппаратов.

С учетом (2) выражение (7) можно записать в более удобном для исследования виде:

$$\frac{u_{кр}}{u_0} = \sqrt[3]{\frac{1-\varphi_0}{\rho Fr^2}}; \quad (8)$$

$$Fr = \frac{u_0}{\sqrt{gh_0}}; \quad \omega = \frac{w_0 r_0}{2(1-\varphi_0)u_0 h_0}; \quad \rho = \frac{r}{r_0}. \quad (9)$$

Результаты расчетов, выполненных по формуле (8) для параметров слоя перелива h_0 от 5 до 100 мм, u_0 от 0,313 до 1,401 м/с, q от $0,491 \cdot 10^{-2}$ до $44,00 \cdot 10^{-2}$ м³/с, приведены на рис.2.

Числитель правой части уравнений (3) и (4) также может равняться нулю в точке изменения знака:

$$(uh)^{n+2} + \frac{w_0}{r^{n-1}} \left(\frac{q}{2\pi} \right)^n uh$$

Вблизи точки, где выполняется изменяются мало, так как производные стремятся к нулю:

$$\frac{dh}{dr} \rightarrow 0 \quad \text{и}$$

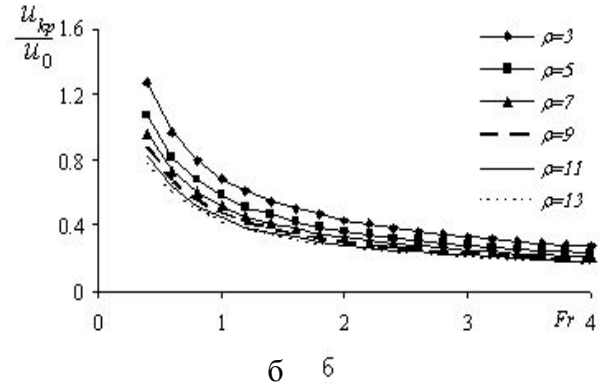
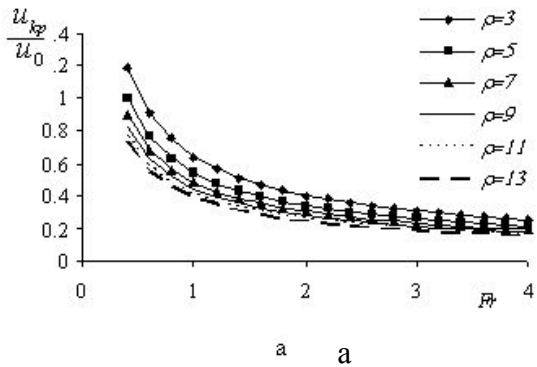
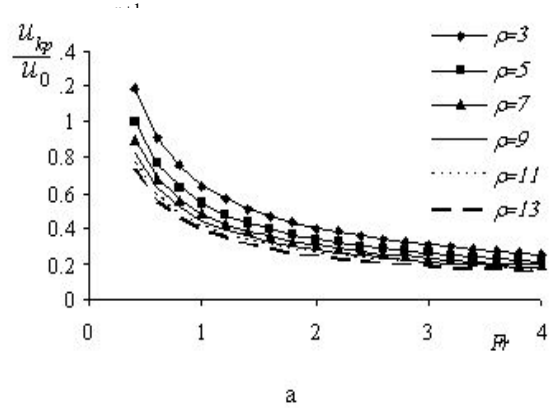


Рис. 2. Зависимость относительной критической скорости слоя перелива от критерия Фруда для различных значений ρ при $\phi_0 = 0.2$ (а) и 0.02 (б). Эта точка разделяет две области с различными режимами течения в слое перелива. В одной области, где условие (10) меньше нуля, толщина слоя увеличивается, а скорость убывает, в другой, где больше нуля, – наоборот. Результаты экспериментальных исследований, проведенных на обогатительной фабрике Вольногорского горно-металлургического комбината (ВГМК) путем визуального наблюдения за течением в струйных зумпфах и сгустительных воронках, показывают, что в большинстве случаев толщина слоя перелива по мере приближения к борту ванны убывает, т. е. реализуется случай, когда условия (10) больше нуля. Будем называть этот режим течения А. В некоторых малочисленных случаях ближе к борту ванны гравитационного аппарата наблюдается увеличение толщины слоя, что соответствует случаю, когда условия (10) меньше нуля. Будем называть этот режим течения Б. О существовании такого явления указывают также результаты экспериментальных исследований других авторов [12].

В общем случае уравнение (10) нелинейно, поскольку n может принимать любые значения в интервале от 0 до 2. Однако при n , равном 0 или 1, оно имеет вид:

$$(uh)^2 + w_0 r u h - w_0 \left(\frac{q}{2\pi} \right) = 0 \quad \text{или} \quad (uh)^3 + w_0 \left(\frac{q}{2\pi} \right) u h - \frac{w_0}{r} \left(\frac{q}{2\pi} \right)^2 = 0 ,$$

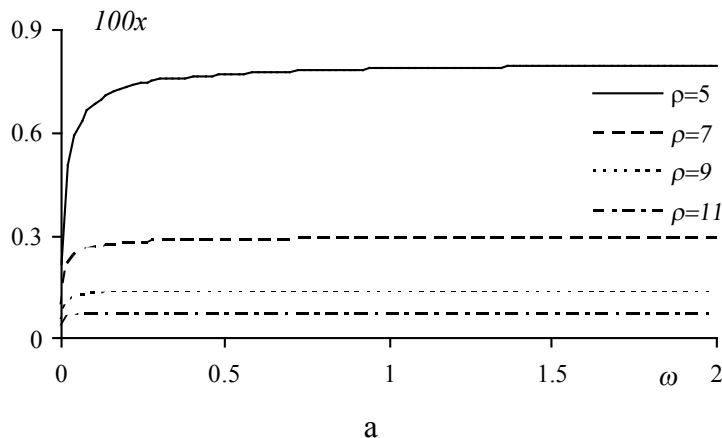
а его решение можно получить аналитически.

Нетрудно показать, что для рассматриваемых значений n режим А реализуется, если выполняется условие

$$uh > x(1 - \varphi_0) u_0 h_0 ;$$

$$x = \begin{cases} \frac{\omega}{\rho} \left(\sqrt{1 + \frac{2}{\omega \rho^2}} - 1 \right) & \text{при } n = 0; \\ \sqrt[3]{\frac{2\omega}{27 + 2\omega \rho^2}} \frac{1}{\sqrt[3]{\rho}} & \text{при } n = 1. \end{cases} \quad (11)$$

Результаты расчетов, выполненных по формулам (11) для параметров слоя перелива h_0 от 5 до 100 мм, u_0 от 0,313 до 1,401 м/с, q от $0,491 \cdot 10^{-2}$ до $44,00 \cdot 10^{-2}$ м³/с, приведены на рис.3,



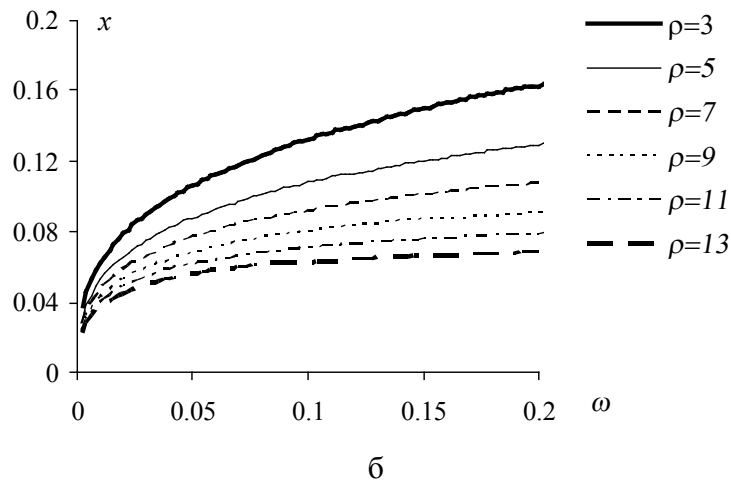


Рис. 3. Залежність величини x від параметра ω для різних значень ρ при $n=0$ (а) і $n=1$ (б)

Из рисунка 3 видно, что значение коэффициента n существенно влияет на величину x , которая значительно зависит от координаты сечения. В отличие от этого значение критической скорости мало зависит от ρ и в основном определяется критерием Фруда (см. рис. 2).

Таким образом, на основании предлагаемой математической модели течения пульпы в слое перелива (3) – (6) можно рассчитать по длине ванны распределение высоты слоя, скорости и объемной доли твердого пульпы в зависимости от расхода воды, подаваемой в слой перелива, содержания твердого в питании и начальной высоты слоя. Это позволит оценить высоту слоя на краю ванны гравитационного аппарата, а также расход и концентрацию пульпы поступающей в перелив.

Список литературы

1. Совершенствование режимов работы гидротранспортных установок технологий углеобогащения / **Е.Л. Звягильский, Б.А. Блюсс, Е.И. Назимко, Е.В. Семененко**. – Севастополь: Вебер, 2002. – 247 с.
2. Проблемы разработки россыпных месторождений / **И.Л. Гуменик, А.М. Сокил, Е.В. Семененко, В.Д. Шурыгин**. – Днепропетровск: Січ, 2001. – 224 с.
3. **Полулях А.Д.** Технологические регламенты углеобогащительных фабрик. – Днепропетровск: Национальный горный университет, 2002. – 856 с.
4. **Блюсс Б.А., Сокил А.М., Гоман О.Г.** Проблемы гравитационного обогащения титано-цирконовых песков. – Днепропетровск: Полиграфист, 1999. – 190 с.
5. **Блюсс Б.А., Головач Н.А.** Совершенствование технологий предобогащения ильменитовых руд. – Днепропетровск: Полиграфист, 1999. – 126 с.
6. **Дмитриев Г.П., Махарадзе Л.И., Гочиташвили Т.Ш.** Напорные гидротранспортные системы. – М.: Недра, 1991. – 304 с.
7. Справочник по обогащению углей / **З.Ш. Беренберг, И.С. Благов, М.А. Борц и др.**

– М.: Недра, 1984. – 614 с.

8. **Фоменко Т.Г.** Гравитационные процессы обогащения полезных ископаемых. – М.: Недра, 1966. – 332 с.

9. Справочник по проектированию рудных обогатительных фабрик: В 2 кн. / Под. ред. **О.Н. Тихонова**. – М.: Недра, 1988. – Кн. 2. – 341 с.

10. Теория и прикладные аспекты гидротранспортирования твердых материалов / **И.А. Асауленко, Ю.К. Витошкин, В.М. Карасик и др.** – К.: Наук. думка, 1981. – 364 с.

11. **Шохин В.Н., Лопатин А.Г.** Гравитационные методы обогащения. – М.: Недра, 1980. – 264 с.

12. **Проценко И.А.** Обеспыливание угля и обезвоживание продуктов. – М.: Углетехиздат, 1955. – 134 с.

13. **Семененко Е.В.** Математическое моделирование процесса разделения суспензий из однородных частиц в сгустительной воронке // Вісник Національного технічного університету "Харківський політехнічний інститут". – 2004. – №40. – С. 136 – 144.

14. **Семененко Е.В., Бобров Б.В.** Переработка отходов обогащения и очистка оборотной воды в сгустительных воронках // Вісник Національного технічного університету Харківський політехнічний інститут – 2004. – №37. – С. 160 – 165.

© Блюсс Б.А., Семененко Е.В., Шмелев Н.А., 2005

Надійшла до редколегії 20.04.2005 р.

Рекомендовано до публікації

УДК 622.73/74

А.С. КОФАНОВ, канд. техн. наук,

О.Г. ШИХАЛИЕВ,

Г.Е. САВЕЛЬЕВ

(Украина, Луганск Государственное предприятие Государственный проектно-конструкторский институт обогатительного оборудования "Гипромашуглеобогащение")

ОТСАДОЧНАЯ МАШИНА С ПОДВИЖНЫМ РЕШЕТОМ ТИПА ВХП (ОМПР)

Отсадочная машина с подвижным решето́м типа ВХП (ОМПР) разработана для обогащения марганцевых руд, хотя не исключает обогащение других полезных ископаемых, таких как уголь, руды черных и цветных металлов.

Главное достоинство новой машины с подвижным решето́м, определяющее ее высокую эффективность, низкую энергоемкость и незначительный расход воды, – в совершенствованном колебательном процессе, обеспечивающем оптимальное разрыхление отсадочной постели и транспортировку вдоль решета небольшой части воды.

Помимо того, что благодаря подвижному решету достигаются наиболее