

Эффект выброса твердых частиц из турбулентной пленки суспензии

Экспериментально обнаружен эффект выброса твердых частиц из турбулентного пленочного потока суспензии. Выброс частиц начинается при достижении порогового значения числа Рейнольдса, причем чем меньше размер частиц, тем больше пороговое значение. Опыты проведены на вертикальном цилиндре как в лабораторных, так и промышленных условиях. Эффект может быть использован в различных отраслях для очистки жидкостей от инородных включений и апробирован в технологиях переработки минерального сырья.

При обогащении полезных ископаемых с использованием воды широко применяются магнитные и гравитационные конусные сепараторы. Опыт эксплуатации сепараторов показал, что эффективная работа возможна только при защите рабочей зоны от забивания некондиционной по крупности рудой и инородными включениями в суспензии (далее — крупные частицы). По этой причине, прежде чем подать суспензию на сепаратор, ее пропускают через перфорированную поверхность. Однако последняя также забивается и требует тщательного контроля, поскольку при ее износе крупные частицы попадают в рабочую зону.

Известны пленочные классификаторы, рабочие зоны которых не забиваются частицами. В них создают пленочное течение суспензии и воздействуют активной силой, направленной к свободной поверхности, под действием которой крупные частицы преодолевают поверхностное натяжение и выбрасываются из суспензии. В пленочном классификаторе [1] активной силой является центробежная сила, которая создается при течении суспензии по выпуклой твердой поверхности (суспензия и центр кривизны находятся по разные стороны твердой поверхности).

Однако такой классификатор эффективно выбрасывает частицы, диаметр d которых превышает 10 мм, и имеет низкую производительность. Попытка улучшить эти показатели за счет увеличения центробежной силы приводит к отрыву жидкости от твердой поверхности, в результате чего классификация прекращается.

В течение более двадцати лет в ИГТМ ведутся исследования по изучению гидропроцессов транспортирования и обогащения полезных ископаемых [2–8], позволившие, в частности, создать высокоэффективные пленочные классификаторы, основанные на новом принципе генерирования активной силы и испытанные на горных предприятиях по добыче и переработке руд черных и цветных металлов.

Известно, что поверхность жидкости неустойчива к возмущениям, длина волны которых превышает [9],

$$\lambda_0 = 2\pi \sqrt{\frac{3\sigma}{\rho \ddot{y}}},$$

где σ — коэффициент поверхностного натяжения; ρ — плотность жидкости; $\ddot{y}$ — ускорение в направлении свободной поверхности жидкости (для [1] это центробежное ускорение).

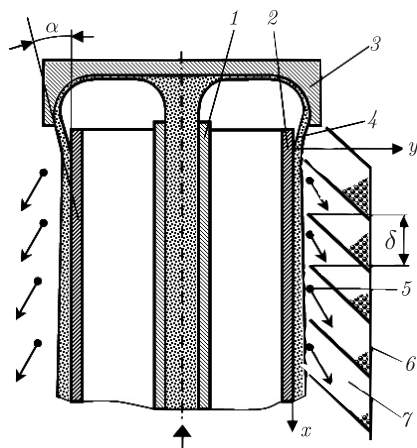


Рис. 1. Фрагмент стенда: 1 — труба; 2 — рабочий орган; 3 — распределитель; 4 — суспензия; 5 — частицы; 6 — сборник; 7 — ячейки

Для того чтобы под действием активной силы не происходил отрыв жидкости, необходимо выполнение условия

$$l_0 < \lambda_0, \quad (1)$$

где l_0 — характерный размер области действия силы.

Идея данной работы заключается в том, что активные силы, необходимые для выброса твердых частиц, создают во множестве областей суспензии достаточно малого объема, в каждой из которых силы, действующие на суспензию в направлении к ее свободной поверхности, меньше сил поверхностного натяжения, что предотвращает отрыв жидкости.

Создать течение, удовлетворяющее условию (1), можно разными способами. Так, например, суспензия может стекать по гибкой поверхности, совершающей волновое движение с ускорением $\ddot{y}$ и длиной волны, меньшей, чем λ_0 . Вторым примером может служить течение по жесткой колеблющейся поверхности. В этом случае на свободной поверхности суспензии возникают параметрические волны с длиной волны также меньше λ_0 и с частотой, в два раза меньшей, чем частота колебаний жесткой поверхности [10]. Третий пример — суспензия может перемещаться по неподвижной поверхности с выступами, размер которых меньше λ_0 .

Наиболее простой способ создания активной силы основывается на использовании такой особенности турбулентного потока, как усиление поперечных флуктуаций вектора скорости с увеличением числа Рейнольдса [11–14]. В режиме течения, при котором кинетическая энергия частицы, полученная за счет энергии потока, превышает работу образования новой межфазной поверхности, частица покинет суспензию. При этом турбулентное течение создается вдоль твердой поверхности с прямолинейной или вогнутой образующей, поскольку в этом случае отсутствует центробежная сила, направленная к свободной поверхности и способствующая отрыву жидкости.

Изучение выброса твердых частиц из потока суспензии производилось на установке, включающей трубу 1, рабочий орган 2 и распределитель 3 (рис. 1). Рабочий орган изготовлен из стальной трубы диаметром 102 мм.

Суспензия 4 через трубу 1 под давлением подавалась на распределитель 3, с которого поступала на внешнюю поверхность рабочего органа 2. Суспензия имела плотность $\rho = 1300 \text{ кг/м}^3$ и динамическую вязкость $\eta = 1,68 \cdot 10^{-3} \text{ Па} \cdot \text{с}$. Твердой фазой служила

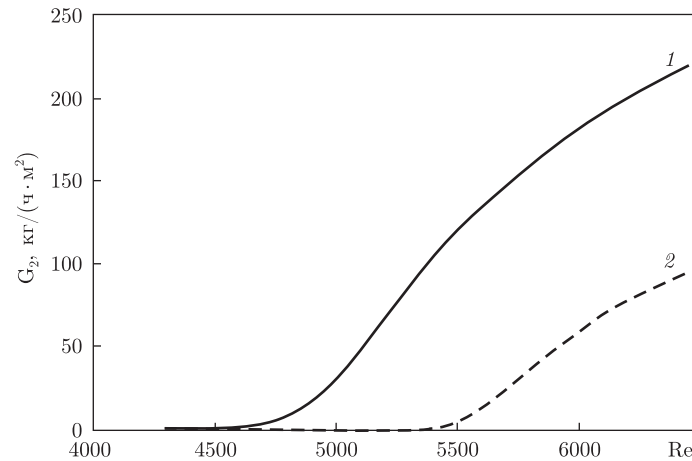


Рис. 2. Зависимость массового расхода частиц от числа Рейнольдса $d = 1-2,5$ мм (кривая 1) и $1-1,6$ мм (кривая 2)

магнетитовая руда, содержащая соответственно 75, 15, 5, 3 и 2% частиц с диаметрами в интервалах $(0, 0,5]$, $(0,5, 1]$, $(1, 1,5]$, $(1,5, 2]$, $(2, 2,5]$ мм.

Вылетающие частицы 5 попадали в сборник 6, состоящий из ячеек 7. Длина δ каждой ячейки составляла 100 мм. Сборник охватывал четверть периметра рабочего органа.

Интенсивность выброса частиц характеризуется массовым расходом

$$G_i = \frac{m_i}{St},$$

где m_i — масса частиц, попавших в i -ю ячейку за время t , нумерация выполнена сверху вниз ($i = 1, 2 \dots 10$); S — площадь ячейки в плоскости, параллельной оси рабочего органа.

На рис. 2 приведены зависимости массового расхода G_2 от числа Рейнольдса

$$Re = \frac{\Gamma}{\eta},$$

где Γ — удельный массовый расход суспензии (масса суспензии, проходящая в единицу времени через единицу длины периметра рабочего органа). Ячейка $i = 2$ расположена вне зоны выброса частиц от удара, обусловленного встречей потока под углом α с рабочим органом (см. рис. 1).

Из графика следует, что выброс частиц начинается только при достижении определенного значения Re , которое назовем пороговым значением Re_t . Чем меньше размер частиц, тем больше пороговое значение. Так, для частиц крупностью $d = 2-2,5$ мм $Re_t = 4450$, а для частиц с $d = 1-1,6$ мм $Re_t = 5480$. Дальнейшее увеличение Re приводит к возрастанию G_2 , причем для более крупных частиц оно интенсивнее.

В работе [14] отмечается, что, по мнению различных авторов, критическое значение числа Рейнольдса Re_k , при котором происходит переход пленочного течения от ламинарного режима к турбулентному, находится в интервале от 180 до 1000. Поскольку $Re_t > Re_k$, то выброс частиц реализуется при турбулентном режиме течения.

Верхние значения интервалов $2-2,5$ мм и $1-1,6$ мм, в которых находятся диаметры частиц, соответственно обозначим d_1 и d_2 . Для них числа Вебера

$$We_1 = \frac{\rho d_1 v_1^2}{\sigma}, \quad We_2 = \frac{\rho d_2 v_2^2}{\sigma},$$

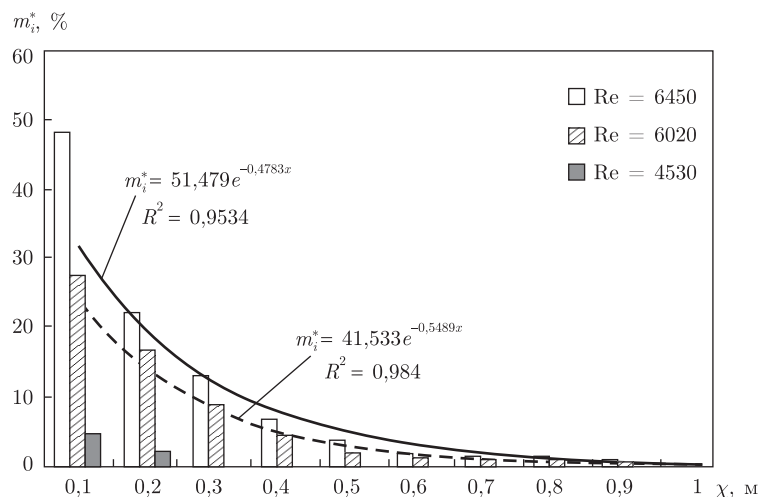


Рис. 3. Распределение относительной массы частиц с $2 < d \leq 2,5$ мм по длине потока

где v_1 и v_2 — скорости потока, при которых начинаются выбросы частиц; σ — коэффициент поверхностного натяжения воды (0,0727 Н/м).

Для устранения трудностей, связанных с экспериментальным определением скорости потока, поступим следующим образом. Принимая $We_1 = We_2$ и выражая v_1 и v_2 через числа Рейнольдса, получим

$$Re_{t,2} = Re_{t,1} \sqrt{\frac{d_1}{d_2}}, \quad (2)$$

где $Re_{t,2}$ и $Re_{t,1}$ — пороговые значения числа Рейнольдса для частиц с d_2 и d_1 соответственно.

Как уже отмечалось выше, частицы крупностью $d_1 = 2,5$ мм начинают выбрасываться из суспензии при $Re_{t,1} = 4450$. Из соотношения (2) для $d_2 = 1,6$ мм имеем $Re_{t,2} = 5562$, которое отличается от экспериментального значения 5480 (см. рис. 2) менее чем на 2%, т. е. можно считать, что выброс частиц начинается при одном и том же значении числа Вебера.

Распределение выброшенных частиц вдоль потока характеризуют относительные массы частиц, попавших в i -е ячейки

$$m_i^* = m_i / \left(\sum_i^{10} m_i + m_p \right),$$

где m_p — масса частиц, оставшихся в потоке.

Распределение m_i^* (%) вдоль потока представлено на рис. 3, где R^2 — коэффициент детерминации; ось x совмещена с образующей рабочего органа, начало координат помещено в место встречи потока с твердой поверхностью (см. рис. 1). Из распределения следует, что с увеличением x выброс частиц экспоненциально уменьшается; увеличение Re приводит к увеличению относительных масс m_i^* .

Таким образом, экспериментально установлено, что твердые частицы выбрасываются из турбулентной пленки суспензии при достижении порогового значения числа Рейнольдса.

Для реализации установленного эффекта в промышленных условиях был создан экспериментальный образец пленочного классификатора. Испытания в условиях Вольногогорского

горно-металлургического комбината показали, что удельная производительность экспериментального образца более чем в 8 раз превышает удельную производительность известного пленочного классификатора [1]. При этом из суспензии с содержанием твердых частиц 45–60% обеспечивается извлечение 100% частиц крупнее 3 мм и 88–90% частиц крупнее 2 мм при производительности 150–180 м³/ч на 1 м² площади. Эти результаты свидетельствуют о перспективности применения полученного эффекта в различных технологиях добычи и переработке руд черных и цветных металлов, а также в иных отраслях, где необходима очистка различных жидкостей от инородных включений.

1. Pat. 3591000 USA. IC B 03 b 3/00. Method and apparatus for siring and separating solids / I. Humphreys. – Publ. 6.07.71.
2. Булат А. Ф., Витушко О. В., Семененко Е. В. Модели элементов гидротехнических систем горных предприятий. – Днепропетровск: Герда, 2010. – 216 с.
3. Звягильский Е. Л., Блюсс Б. А., Назимко Е. И., Семененко Е. В. Совершенствование режимов работы гидротранспортных установок технологий углеобогащения – Севастополь: Вебер, 2002. – 247 с.
4. Семененко Е. В., Булат А. Ф., Сокил А. М. Согласование параметров насоса и электродвигателя насосного агрегата // Горн. электромеханика и автоматика. – 2002. – Вып. 69. – С. 117–122.
5. Семененко Е. В., Блюсс Б. А. Обеспечение рационального режима работы карьерного гидротранспортного комплекса // Сб. науч. тр. НГУ. – № 17. – Т. 1. – Днепропетровск: РИК НГУ, 2003. – С. 228–233.
6. Лапшин Е. С., Шевченко А. И. Экспериментальное определение предельной скорости подачи питания на конусообразную вогнутую рифленую рабочую поверхность пленочного классификатора // Геотехн. механика. – Сб. научн. трудов ИГТМ НАН Украины. – Днепропетровск, 1998. – Вып. 4. – С. 146–149.
7. Лапшин Е. С., Шевченко А. И. Экспериментальное исследование кинетики очистки оборотной воды в устройстве для смыва магнитного продукта с зубчатых пластин сепаратора // Там же. – Днепропетровск, 1998. – Вып. 6. – С. 138–143.
8. Лапшин Е. С. Разработка и исследование способа классификации руд при турбулентном пленочном течении пульпы: Автореф. дис. ... канд. техн. наук: 05.15.11. – Днепропетровск, ИГТМ, 1990. – 16 с.
9. Лаврентьев М. А., Шабат Б. В. Проблемы гидродинамики и их математические модели. – Москва: Наука, 1973. – 416 с.
10. Стретт Д. В. Теория звука. Т. 2. – Москва: Гостехиздат, 1955. – 475 с.
11. Левич В. Г. Физико-химическая гидродинамика. – Москва: ГИФМЛ, 1959. – 700 с.
12. Монин А. С., Яглом А. М. Статистическая гидромеханика. Т. 1. – Ст.-Петербург: Гидрометеоиздат, 1992. – 696 с.
13. Криль С. Ю. Напорные взвесенесущие потоки. – Киев: Наук. думка, 1990. – 160 с.
14. Ганчев Б. Г. Охлаждение элементов ядерных реакторов стекающими пленками. – Москва: Энергоатомиздат, 1987. – 192 с.

*Институт геотехнической механики
им. Н. С. Полякова НАН Украины, Днепропетровск*

Поступило в редакцию 20.06.2014

Є. С. Лапшин, академік НАН України А. Ф. Булат, Б. О. Блюсс

Ефект викиду твердих частинок з турбулентної плівки суспензії

Експериментально виявлено ефект викиду твердих частинок з турбулентного плівкового потоку суспензії. Викид частинок починається при досягненні порогового значення числа Рейнольдса, причому чим менше розмір частинок, тим більше порогове значення. Досліди проведено на вертикальному циліндрі як в лабораторних, так і промислових умовах. Ефект може бути використаний у різних галузях для очищення рідин від сторонніх включень і апробований в технологіях переробки мінеральної сировини.

E. S. Lapshin, Academician of the NAS of Ukraine **A. F. Bulat**, **B. A. Blyuss**

Effect of the emission of solid particles from a turbulent slurry film

The effect of the emission of solid particles from the turbulent flow of a slurry film is experimentally observed. The particle emission begins, when the threshold value of the Reynolds number is attained. The smaller the particle size, the greater the threshold value. The experiments were carried in a vertical cylinder both under laboratory and industrial conditions. The effect can be used in various branches for the purification of liquids from foreign inclusions and was tested in mineral processing technologies.