

поведінка нікелевої руди під впливом гармонійних коливань в діапазоні частот і амплітуд чинить негативну дію на остійність судна, що наражає на значну небезпеку як екіпаж судна, так і довкілля.

Ключові слова: математична модель, розріджуваність, зміщуємість, щільність, питомий навантажувальний об'єм, питома маса, віброреологія, сегрегація, самосортирування, гармонійні коливання.

UDC 543.1/532.135

The specificity of the carriage of Nickel ore in bulk /A. C. KRYZHANOVSKY / Visnyk NTU «KhPI». – 2014. – № 53 (1095). – (Series: Khimiya, khimichna tekhnolohiya ta ecolohiya). – P. 67 – 75. Bibliogr.: 2 names. – ISSN 2079-0821.

In this article problems of transportation of nickel ore in bulk and the dangers connected with it in a consequence of fluidifying of this freight in transit are considered by sea transport. It is shown that the behavior of nickel ore as a result of harmonic oscillations in the range of frequencies and amplitudes makes negative impact on stability of the vessel, subjecting to considerable danger as vessel crew, and environment.

Keywords: mathematical model, liquescence, miscibility, density, specific loading volume, specific weight, vibrorheology, segregation, self-sorting, harmonic oscillations.

УДК 622.7:622.341.1

В.П. НАДУТЫЙ, д-р техн. наук, зав. отд., ИГТМ НАНУ, Днепропетровск,

В.В. ЧЕЛЫШКИНА, канд. техн. наук, ст. науч. сотруду., ИГТМ НАНУ,
Днепропетровск,

В.В. СУХАРЕВ, канд. техн. наук, науч. сотруду., ИГТМ НАНУ,
Днепропетровск

ТЕОРЕТИЧЕСКАЯ ОЦЕНКА МЕХАНИЗМА КЛАССИФИКАЦИИ ТОНКИХ МАГНИТОВОСПРИИМЧИВЫХ МАТЕРИАЛОВ

Изложены результаты исследований процесса гидроклассификации с использованием постоянных магнитных полей для тонких материалов с магнитовосприимчивой компонентой (железomagнетитовые и титаномagnetитовые руды, ильменитовые пески и др. с крупностью частиц менее 150 мкм). Решены следующие задачи: определена плотность магнетитовых флоккул, скорость осаждения сферических и цилиндрических флоккул в магнитном поле, установлена зависимость скорости осаждения от напряженности магнитного поля, получены уравнения равнопадаемости магнитных (флоккул), немагнитных частиц и сростков. Полученные результаты позволяют определять крупность частиц при классификации для разных скоростей восходящего потока и напряженности магнитного поля для существующих гидроклассификаторов и проектировать новые магнитно-гравитационные аппараты.

Ключевые слова: гидроклассификация, магнитное поле, флоккулы, скорость осаждения.

© В. П. Надутый, В. В. Челышкина, В. В. Сухарев, 2014

Разделение тонких материалов (тонкоизмельченных руд и горных пород) в водной среде происходит из-за разной гидравлической крупности и скорости осаждения частиц [1]. Наиболее широко распространены гидроклассификаторы (спиральные, конусные, дешламаторы, сгустители), работающие на суспензии с крупностью частиц от 90 % кл. – 44 мкм. Магнитной компонентой чаще всего является магнетит (железные, титаномагнетитовые руды, ильменитовые пески). В современных конструкциях гидроклассификаторов в зоне осаждения частиц создают магнитное поле, которое обеспечивает флокуляцию магнетита [2, 3], что сокращает время и повышает качество продуктов разделения: снижает содержание рудных частиц в сливе и повышает качество песков.

Целью исследований являлось: дать теоретическую оценку механизма гидроклассификации в магнитных полях, в частности, определить крупность флокулов и отдельных частиц в зависимости от скорости восходящего потока

и напряженности структурирующего магнитного поля. Для этого был решен ряд задач. В частности, определена плотность магнетитовых флокулов, получено единообразное математическое описание для скорости осаждения сферических и цилиндрических флокулов, установлена зависимость скорости осаждения флокулов от напряженности магнитного поля, дана оценка степени укрупнения осаждающихся частиц при структуризации в слабых магнитных полях, получены уравнения равнопадаемости флокулов, немагнитных частиц и сростков.

В статье приведены результаты решения указанных задач и определения основных показателей: крупности разделения, скорости восходящего потока и напряженности структурирующего магнитного поля на примере суспензии железомagnetитовых руд.

При магнитной структуризации, сопровождающейся разделением частиц на рудные (во флокулах) и нерудные (вне флокулов), основным фактором, вызывающим разделение, является вытеснение нерудных частиц уплотняющимся магнетитом в процессе формирования флокулов. Без магнитного поля вытеснение более легких частиц проявляется в сгустителях в зоне осадка при его плотности $\approx 2 \text{ г/см}^3$. Наложение магнитного поля распространяет этот эффект на весь объем обрабатываемой суспензии независимо от ее плотности.

Магнетитовая флокула является двухфазным объектом, состоящим из твердых частиц и воды, связанной с магнетитовым скелетом и движущейся вместе с ним. Плотность флокулы определяет степень заполнения ее объема

твердыми частицами или укладку. Для плотной укладки частиц магнетита сферической формы с одним и тем же диаметром в пространственной кубической решетке максимальное значение содержания твердого $T = 84,6 \%$, что соответствует значению плотности флоккулы $\rho_{\phi} \approx 3,1 \text{ т/м}^3$, что намного ниже плотности магнетита ($\rho_m \approx 5,0 \text{ т/м}^3$). Плотность реальной флоккулы еще меньше из-за разброса диаметров частиц, влияния магнитных полей и поверхностных сил. Экспериментальные измерения плотности флоккул в лабораторных условиях и технологическая оценка (по Робертсу) дали практически совпадающие значения. В среднем плотность магнетитовых флоккул составляет $2,0 \text{ г/см}^3$.

Форма флоккул зависит от динамики изменения напряженности и направления движения частицы или потока. В постоянно действующих полях до $0,1 \text{ кА/м}$ (без резкого изменения напряженности) флоккулы имеют сферическую форму. При возрастании напряженности магнитного поля до $1 - 2 \text{ кА/м}$ происходит магнитная поляризация флоккулы, за счет чего она приобретает форму эллипсоида вращения или цилиндра, вытянутая ось которого в $10 - 20$ и более раз превышает диаметр. После снятия магнитного поля флоккулы очень чувствительны к изменению скорости и направления движения потока, что выражается существенным снижением скорости осаждения флоккул.

Моделирование формы флоккул в виде продолговатого цилиндра бесконечной длины позволяет использовать для оценки скорости осаждения известные решения классической гидродинамики [4]. Анализ решения Ламба обтекания цилиндра бесконечной длины (сравнивались теоретические и экспериментальные коэффициенты продольного и поперечного обтекания) показывает, что в диапазоне чисел Рейнольдса $0,1 - 1,5$ сила гидродинамического сопротивления продольному, поперечному движению и вращению продолговатой флоккулы с хорошей точностью определяется выражением

$$F_{\phi} = 4\pi \mu V L_{\phi}, \quad (1)$$

отличающимся от стоксовской силы сопротивления движению шара числовым коэффициентом, равным 4 (для шара 3), и характерным размером – длиной (а не диаметром) флоккулы L_{ϕ} .

Установившаяся скорость падения цилиндра в воде определяется из сопоставлении силы сопротивления с гравитационной и архимедовой силами и определяется в общепринятом виде выражением [1, 5]:

$$V_u = \frac{K_u d_u^2 \Delta}{\nu} \quad (2)$$

где K_u – коэффициент, который для вытянутой флоккулы составляет: $K_\phi = g / 16$; $\Delta = (\rho_\phi - \rho_e) / \rho_e$ – относительная разность плотностей флоккулы и воды; ν – кинематический коэффициент вязкости.

Таким образом, при ламинарном режиме обтекания существует полная аналогия между скоростью осаждения вытянутой флоккулы и скоростью осаждения сферической частицы. Отличием является значение постоянного коэффициента K_u , который для сферы составляет $g / 18 = 0,5448$, а для равновеликого ей по диаметру вытянутого цилиндра $g / 16 = 0,6129$, то есть при одинаковых плотности и диаметре скорость падения длинного цилиндра на 12,5 % больше скорости падения шара. В практических расчетах можно пренебречь этой разницей и принять для магнетитовой флоккулы $K_u = K_m = 0,5448$. Это позволяет, во-первых, не учитывать различие формы флоккулы в полях разной напряженности, а во-вторых, не учитывать погрешность представления реальных флоккул правильными геометрическими фигурами. Предел применимости формулы (1) – при $Re = 1,5$, при этом диаметр флоккулы составляет 130 мкм.

Определенная приближенность значений скорости осаждения флоккул по формуле (1) компенсируется такими преимуществами, как единообразная оценка поведения флоккул независимо от их формы и сохранение диаметра в качестве определяющей геометрической характеристики.

Количественная оценка влияния напряженности магнитного поля на гидравлическую крупность магнетитовых флоккул изучалась при экспериментальном определении скорости осаждения (по времени опускания границы осаждения) частиц крупностью 95 % кл. – 44 мкм. Содержание твердого составляло 30 % (варьировалось от 10 % до 55 %), напряженность поля изменялась в пределах от 0 до 3 кА/м. Установлено, что интенсивное возрастание скорости осаждения (примерно на 30 %), начинается с напряженности магнитного поля 0,5 кА/м (рис. 1). При увеличении напряженности поля до 1 кА/м скорость осаждения увеличивается вдвое, при дальнейшем увеличении темп прироста скорости несколько замедляется. Характерная длина флоккул лежала в диапазоне 2 ÷ 4 мм при напряженности поля 1,5 ÷ 2 кА/м. Скорость осаждения до измерений в магнитном поле составляла 4,5 мм/с.

Полученные данные позволяют оценивать степень укрупнения осаждающихся частиц при структуризации в слабых магнитных полях. Например, для скорости осаждения флоккул в диапазоне $10 \div 12$ мм/с (напряженность поля $1,5 \div 2$ кА/м) при $\rho_m = 5$ г/см³, $\rho_f = 2$ г/см³, $\rho_e = 1$ г/см³, $V_m = 4,5$ мм/с, получим:

$$d_f : d_m = [V_f(\rho_m - \rho_e)]^{1/2} : [V_m(\rho_f - \rho_e)]^{1/2} = 3 \div 3,2 \quad (3)$$

То есть при гидроклассификации суспензии в магнитных полях напряженностью $1,5 \div 2$ кА/м с крупностью частиц магнетита 30 мкм (95 % кл. – 44 мкм) средний (номинальный) диаметр флоккул составляет $90 \div 100$ мкм.

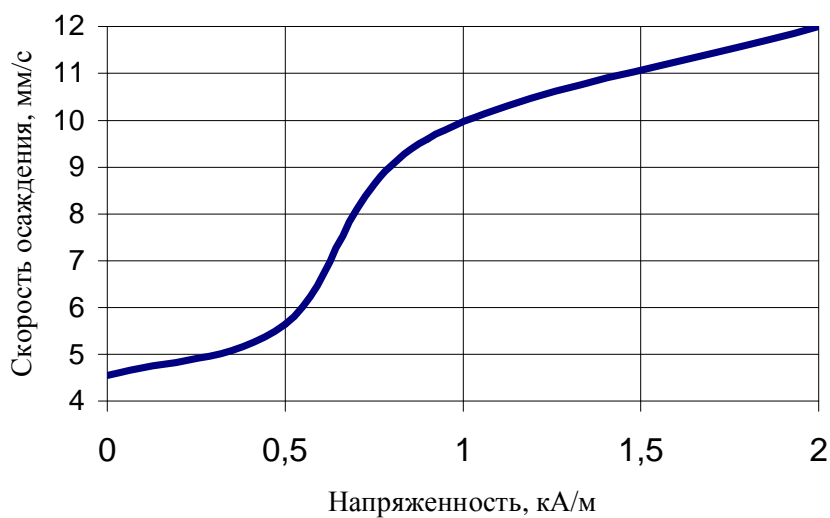


Рис. 1 – Зависимость скорости осаждения частиц от напряженности электрического поля

Согласно классическому подходу отношение диаметров частиц, имеющих одинаковую скорость падения, пропорционально квадратному корню из их плотностей [5]. Так, при $\rho_m = 5$ г/см², $\rho_n = 2,65$ г/см², $\rho_f = 2$ г/см² плотности, соответственно, частицы магнетита, нерудной частицы (кварца) и флоккулы, получим:

$$d_f : d_n : d_m = \sqrt{(\rho_m - \rho_e)} : \sqrt{(\rho_n - \rho_e)} : \sqrt{(\rho_f - \rho_e)} \approx 2 : 1,6 : 1. \quad (4)$$

То есть одинаково быстро осаждаются рудная частица единичного диаметра, флоккула вдвое большего диаметра и нерудная частица, диаметр которой на 40 % меньше диаметра флоккулы или на 60 % больше диаметра

рудной частицы. Либо одинаково быстро осаждаются флоккула единичного диаметра и нерудная частица, диаметр которой составляет 0,8 от диаметра флоккулы.

Условие равнопадаемости флоккул и частиц разных размеров и разной плотности при $\rho_c = 4 \text{ г/см}^2$ (плотность сростка с содержанием железа 52 %), $\rho_\phi = 2 \text{ г/см}^2$, $\rho_n = 2,65 \text{ г/см}^2$ определяется выражением:

$$\begin{cases} d_\phi : d_n = (\rho_n - \rho_\phi)^{1/2} : (\rho_\phi - \rho_\phi)^{1/2} = 1,28 \\ d_\phi : d_c = (\rho_c - \rho_\phi)^{1/2} : (\rho_\phi - \rho_\phi)^{1/2} = 1,28 \\ d_n : d_c = (\rho_c - \rho_\phi)^{1/2} : (\rho_n - \rho_\phi)^{1/2} = 1,35 \end{cases} \quad (5)$$

Например, при номинальном диаметре частицы кварца 74 мкм диаметр сростка с той же скоростью осаждения составит 58 мкм, а равнопадаемой магнетитовой флоккулы – 95 мкм.

Если установить скорость восходящего потока равной скорости осаждения (2), то в слив гидроклассификатора должны быть выведены все равнопадаемые для данной скорости частицы. На практике это не наблюдается. Причина такого несоответствия в том, что усредненный показатель скорости восходящего потока не отражает в полной мере характер движения жидкой и твердой фаз в рабочем пространстве гидроклассификаторов. Поэтому потребовалось в формулу (2) ввести поправочный коэффициент на гидродинамику аппаратов, который составил:

$$K_\partial = V_\partial / V_{44} = 3,5/1,74 = 2, \quad (6)$$

где: $V_\partial = 3,5 \text{ мм/с}$ – паспортное значение скорости восходящего потока в дешламаторах МД-5, МД-9; $V_{44} = 1,74 \text{ мм/с}$ – теоретическая скорость осаждения частиц кварца диаметром 44 мкм, которая является граничным значением для скорости восходящего потока 3,5 мм/с.

Как указано выше, для создания флоккул номинальным диаметром 100 мкм при скорости осаждения 10 – 12 мм/с нужны поля напряженностью 1,5 ÷ 2 кА/м. При такой скорости восходящего потока можно вывести в слив довольно крупные частицы кварца (74 мкм), однако вместе с ними уйдут и

равнопадаемые крупные сrostки (58 мкм) и часть мелких флокул.

Чтобы не сбрасывать в слив сrostки, крупнее, например, 44 мкм, нужно вести процесс с несколько меньшими скоростями восходящего потока. Так, крупность частиц кварца, равнопадаемых со сrostком 44 мкм, определится из второго уравнения системы (5) и составит 60 мкм (что соответствует эквивалентному диаметру или среднему размеру двух смежных сит для класса – 74 + 44 мкм). При этом крупность магнетитовой флокулы, равнопадаемой со сrostком 44 мкм и кварцем 60 мкм составит 74 мкм.

Скорость восходящего потока согласно уравнениям (2), (6) составит 6,4 мм/с, напряженность структурирующего поля (рис. 1) составит 0,6 кА/м.

Таким образом, при скорости 6,4 мм/с в пески гидроклассификатора поступят сrostки крупностью +44 мкм, кварц +60 мкм и магнетитовые флокулы +74 мкм, соответственно, более мелкие фракции поступят в слив. Эту скорость нужно считать максимальной, чтобы не терять со сливом относительно крупные магнетитовые сrostки (крупнее 44 мкм).

Приведем пример использования результатов при проектировании новых магнитно-гравитационных классификаторов, например, МГК [2]. Верхний предел скорости восходящего потока определим выведением в слив сrostков 74 мкм (равнопадаемой частицы кварца – 100 мкм, а магнетитовой флокулы – 125 мкм). В качестве нижнего предела примем скорость осаждения частиц кварца диаметром 74 мкм – условие вывода в слив более мелких нерудных частиц. Тогда согласно уравнениям (2), (6) $V_{мгк}$ составит:

$$9,7 \text{ мм/с} = K_{\partial} \cdot V_{74} \leq V_{мгк} \leq K_{\partial} \cdot V_{100} = 17,7 \text{ мм/с} \quad (7)$$

Скорость восходящего потока внутри указанного диапазона значений устанавливается по эффективности операции магнитной гидроклассификации. По заданным исходным условиям классификации частиц при скорости восходящего потока $9,7 \div 17,7$ мм/с диаметр флокул составит $95 \div 125$ мкм для чего потребуется напряженность структурирующего магнитного поля – $2 \div 3$ кА/м.

Отметим, что скорость восходящего потока (определяется как объем слива в секунду, деленный на площадь зеркала слива, [1]) обеспечивается размерами рабочих камер и удельными нагрузками на аппарат. Это позволяет, оперируя скоростью восходящего потока и производительностью, определять конструктивные параметры магнитно-гидравлических классификаторов.

Выводы

1. Осаждение под действием силы тяжести в диапазоне чисел Рейнольдса $0,4 \div 1,5$ вытянутых магнетитовых флоккул, образованных в магнитных полях напряженностью до 20 кА/м, математически описывается формулой того же вида, что и для отдельной частицы сферической формы с учетом того, что при равных условиях (одинаковой плотности и диаметре) скорость падения длинного цилиндра лишь на 12,5 % больше скорости падения шара.

2. При движении флоккул цилиндрической формы, ось которых либо совпадает с направлением движения, либо перпендикулярна ему (в зависимости от полярности магнитного поля в зоне осаждения) коэффициент сопротивления движению может быть принят одинаковым. При этом характерным размером вытянутой флоккулы является ее диаметр, а не длина, а плотность флоккулы из-за значительного объема увлекаемой магнетитовым скелетом воды оценивается величиной порядка 2 г/см^3 .

3. Для эффективного удаления из пульпы не только мелких, но и крупных нерудных фракций необходимо стремиться поддерживать магнитную структуризацию частиц во флоккулах большого диаметра. Например, для удаления в слив частиц кварца крупностью $74 \div 82 \text{ мкм}$ режим магнитной обработки должен обеспечивать создание и поддержание в устойчивом состоянии в рабочем пространстве гидроклассификаторов продолговатых флоккул с номинальным диаметром 100 – 120 мкм, длиной $2 \div 3 \text{ мм}$. Чтобы не терять со сливом относительно крупные магнетитовые сростки (крупнее 44 мкм), максимальная скорость восходящего потока должна составлять 6,4 мм/с, напряженность структурирующего магнитного поля – 0,6 кА/м.

Список литературы: 1. Богданов О.С. Специальные и вспомогательные процессы: справочник по обогащению руд / О.С. Богданов, В.И. Ревнивцев. – М.: Недра, 1983. – С. 130 – 140. 2. Пат. 59882 Україна, МКМІ В 03 С 1/04. Гравітаційно-магнітний сепаратор / Надутий В.П., Чолишкіна В.В., Усов О.А.; заявник і патентовласник ІГТМ НАН України. – № 20021210723; заявл. 28.12.02; опубл. 15.09.03, Бюл. № 9. 3. Пат. 2183139 Российская Федерация, МКМІ В 03 С 1/04. Магнітний гідросепаратор / Щупановський В.Ф., Лицинський В.С., Остапенко А.В., Свиридов В.И., Яровая Т.И., Чумаков В.А., Чельшикіна В.В., Усов О.А.; заявитель и патентообладатель ОАО «Лебединский ГОК». – № 2000123727; заявл. 14.09.00; опубл. 10.06.02, Бюл. № 11. 4. Кочин Н.Б. Теоретическая гидромеханика / Н.Б. Кочин, И.А. Кибель, Н.В. Розе. – М.: Издат. физ-мат. лит, 1963. – 728 с. 5. Олевский В.А. Размольное оборудование обогатительных фабрик / В.А. Олевский. – М.: Госгортехиздат, 1963. – 447 с.

References: 1. Bogdanov O.S. Special'nye i vspomogatel'nye processy: spravochnik po obogashheniju rud / O.S. Bogdanov, V.I. Revnivcev. – Moscow: Nedra, 1983. – S. 130 – 140. 2. Pat. 59882 Ukrayina, MKMY V 03 S 1/04. Hravitatsiyno-mahnitnyy separator / Nadutyu V.P., Cholyshekina V.V., Usov O.A.;

zayavnyk i patentovlasnyk IHTM NAN Ukrayiny. – № 20021210723; zayavl. 28.12.02 ; opubl. 15.09.03, Byul. № 9. **3.** Pat. 2183139 Rossijskaja Federacija, MKMI B 03 C 1/04. Magnitnyj gidroseparator / *Shhupanovskij V.F., Lishhinskij V.S., Ostapenko A.V., Sviridov V.I., Yarovaya T.I., Chumakov V.A., Chelyshkina V.V., Usov O.A.*; zayavitel' i patentoobladatel' OAO «Lebedinskij GOK». – № 2000123727; zayavl. 14.09.2000 ; opubl. 10.06.2002, Bjul. № 11. **4.** *Kochin N.B.* Teoreticheskaja gidromehanika / *N.B. Kochin, I.A. Kibel', N.V. Roze.* – Moscow: Izdat. fiz-mat. lit, 1963. – 728 s. **5.** *Olevskij V.A.* Razmol'noe oborudovanie obogatitel'nyh fabrik / *V.A. Olevskij.* – Moscow: Gosgortehizdat, 1963. – 447 s.

Поступила в редколлегию (Received by the editorial board) 11.07.14

УДК 622.7:622.341.1

Теоретическая оценка механизма классификации тонких магнитовосприимчивых материалов / В.П. НАДУТЫЙ, В.В. ЧЕЛЫШКИНА, В.В. СУХАРЕВ // Вісник НТУ «ХПІ». – 2014. – № 53 (1095). – (Серія: Хімія, хімічна технологія та екологія). – С. 75 – 83. – Бібліогр.: 5 назв. – ISSN 2079-0821.

Викладено результати досліджень процесу гідрокласифікації з використанням постійних магнітних полів для тонких матеріалів з магнітосприйнятливою компонентою (залізомагнетитові і титаномагнетитові руди, ільменітові піски та ін. із крупністю часток менше 150 мкм). Вирішено наступні задачі: визначено щільність магнетитових флокул, швидкість осадження сферичних і циліндричних флокул у магнітному полі, встановлено залежність швидкості осадження від напруженості магнітного поля, отримано рівняння рівнопадання магнітних (флокул), немагнітних часток і зростків. Отримані результати дозволяють визначати крупність часток при класифікації для різних швидкостей висхідного потоку і напруженості магнітного поля для існуючих гідрокласифікаторів і проектувати нові магнітно-гравітаційні апарати.

Ключові слова: гідрокласифікація, магнітне поле, флокули, швидкість осадження.

UDC 622.7:622.341.1

Theoretical assessment of the mechanism of thin magneto-spirillum materials classification / V.P. NADUTYY, V.V. CHELYSHKINA, V.V. SUKHAREV // Visnyk NTU «KhPI». – 2014. – № 53 (1095). – (Series: Khimiya, khimichna tekhnolohiya ta ecolohiya). – P. 75 – 83. – Bibliogr.: 5. – ISSN 2079-0821.

The results of studies of hydro-classification process, with use of the constant magnetic fields, for thin magneto-spirillum materials, which are having magneto-spirillum component (iron ores and titanium-magnetite ores, ilmenite sands and others with the particles' size less than 150 mk) are presented here. The following tasks are solved: density of magnetite floccules is determined; the deposition rate of spherical and cylindrical floccules in a magnetic field is determined; the dependence of the deposition rate from magnetic field strength is determined; the equations of equal fall of magnetic (floccules), non-magnetic particles and clusters are obtained. Acquired results allows to determine the particles' size in classification for different speeds upstream and magnetic field strength for existing hydro-separators, and to design a new magnetic-gravitational devices.

Key words: hydro-classification, magnetic field, floccules, the deposition rate.