

E_k или уменьшая d_b .

За создание тонкодисперсных пузырьков воздуха более полно, по нашему мнению, отвечают шайбовые аэраторы (таблица).

К преимуществам таких аэраторов можно отнести: тонкое диспергирование пузырьков воздуха; возможность создания восходящего аэрированного потока пульпы, отсутствие крупномасштабного турбулентного (вихревого) перемешивания пульпы с подаваемым воздухом; простота конструкции и регулировки.

Данный тип аэратора внедрен в промышленность на ряде предприятий цветной металлургии (ППО «Бор», ОАО Ярославский ГОК, ОАО «РУСАЛ», ОАО «Бурятзолото» и пр.).

Библиографический список

1. Андреев С.Е., Товаров В.В., Петров В.А. Закономерности измельчения и исчисления характеристик гранулометрического состава. М.: Металлургиздат, 1959. 437 с.
2. Рундквист В.А. Гидродинамические параметры механических флотационных машин // Обогащение руд. 1964. №1. С. 25-30.

3. Шестаков Л.Я. Сравнительные испытания аэраторов флотационных машин // Обогащение руд. 1965. №4. С. 34-38.

4. Тюрникова В.И., Наумов Н.Г. Повышение эффективности флотации. М.: Недра, 1980. 224 с.

5. Matoney J.P., Miller F.M. Cyclo-cell-Development and Application. Mechanization, 1961. - P. 47-53.

6. Малиновский В.А. Элементы основ пенной сепарации // в кн.: Пенная сепарация. М.: ВЗПИ, 1971. С. 4-15.

7. Классен В.И. Промышленные испытания эжекторной флотационной машины для флотации руд // Цветные металлы. 1963. № 4. С.7-13.

8. Абрамович Г.Н. Теория турбулентных струй. М.: Физматгиз, 1960. 715 с.

9. Никаноров А.В., Попова Н.Ю., Вавилов В.Л. Теория и практика селекции минеральных частиц в колонных аппаратах с нисходящим пульповоздушным потоком. - Иркутск: Изд-во Восточно-Сибирского института МВД России, 2007. 131 с.

10. Волкова З.В. К вопросу о механизме флотации // Журн. физ. химии, 1936. Т. 8, №2. С. 197-207.

УДК 622.75/77

ББК 33.4

МОДЕЛИРОВАНИЕ ПРОЦЕССОВ ГРАВИТАЦИОННОГО ОБОГАЩЕНИЯ

К.В.Федотов¹, В.В.Тютюнин²

Иркутский государственный технический университет, 664074, г. Иркутск, ул. Лермонтова, 83.

Описывается экспериментальная установка для определения скорости падения частиц в центробежном поле. Рассматривается метод построения численной модели данного процесса.

Ил. 6. Библиогр. 2 назв.

Ключевые слова: обогащение полезных ископаемых; гравитационное обогащение; гравитация; центробежная сепарация; центрифуги; концентраторы; центробежная сила; фактор разделения; скорость свободного падения; скорость стесненного падения; равнопадаемость; седиментация; классификация.

MODELLING OF PROCESSES OF GRAVITATIONAL ENRICHMENT

K.V. Fedotov, V.V. Tjutjunin

Irkutsk State Technical University
83 Lermontov St., Irkutsk, 664074

The authors describe the experimental installation to determine the rate of particle falling in the centrifugal field. They consider the method to create the numerical model of the given process.

6 figures. 1 table. 1 source.

Key words: enrichment of minerals; gravitational enrichment; gravitation; centrifugal separation; cetrifuges; concentrators; centrifugal force; factor of separation; rate of free falling; rate of constrained falling; equal falling; sedimentation; classification.

Закономерности свободного падения шарообразных тел в поле тяготения Земли изучались Ньютоном, Риттингером, Алленом, Стоксом, Финкеем, Эйнштейном и другими учеными [1], в то время как закономер-

ности свободного падения шарообразных тел в центробежном поле детально не изучались. В этом не было особой необходимости, так как аппараты, использующие принцип центробежного разделения

¹Федотов Константин Вадимович, доктор технических наук, профессор, заведующий кафедрой обогащения полезных ископаемых и инженерной экологии, тел.: (3952)405-430.

Fedotov Konstantin Vadimovich, a doctor of technical sciences, a professor, the head of the Chair of Enrichment of Minerals and Engineering Ecology, tel.: (3952)405-430.

²Тютюнин Веденей Викторович, ассистент-совместитель, аспирант, тел.: (3952)405-686, e-mail: vedeneyt@rambler.ru
Tjutjunin Vedeney Victorovich, an assistant, a postgraduate, tel.: 405686, e-mail: vedeneyt@rambler.ru

многофазных систем, стали появляться лишь во второй половине XX века. В нашем веке требования, предъявляемые к качеству получаемой продукции, возросли, в связи с чем возникла острая необходимость совершенствования конструкций центробежных аппаратов. Для реализации данного направления требуется развивать теоретические основы разделения фазовых систем в центробежном поле.

Постоянное развитие гравитационных методов, их модификация и сочетание с другими обогащательными процессами ставят все новые задачи перед исследователями. В то же время многообразие минеральных частиц с их практически неограниченным разнообразием индивидуальных свойств затрудняет построение достоверных аналитических сепарационных моделей. Вследствие этого развитие гравитационных процессов идет преимущественно экспериментальным путем.

Одним из эффективных методов исследований быстропротекающих процессов полидисперсных систем является возможность визуализации результатов с помощью компьютерной графики.

Для экспериментального определения свободного **падения (движения)** минеральных частиц в центробежном поле была сконструирована и изготовлена лабораторная установка, изображенная на рис. 1.

Сразу отметим, что в классической механике под **движением** понимается изменение положения материальной точки в пространстве относительно других тел, а под **падением** – движение тела в поле тяготения Земли с начальной скоростью равной нулю. Когда мы говорим о **падении** тела в центробежном поле, то понимаем под этим в данной работе **движение** тела в центробежном поле с начальной скоростью равной нулю.

Для визуального наблюдения за минеральной частицей в центробежном поле спроектированная и изготовленная установка (рис. 1) комплектуется высокоскоростной видеокамерой 1 с оптической системой 2, расположенной над объектом исследований. Видеокамера способна делать 800 снимков за секунду при разрешении 1280х960 точек на дюйм, благодаря

высокоскоростному CMOS-сенсору. При сокращении разрешения возможно увеличение числа кадров до 60.000 за одну секунду. В видеокамере имеется высокоскоростная энергозависимая память объемом 4 Гб. Скорость записи в память составляет 1.1 Гб за одну секунду. При подаче сигнала триггера на интеллектуальный блок управления питанием 4 головкой видеокамеры начинается запись. Блок управления головкой видеокамеры питается от аккумуляторной батареи 5. В торце прозрачного цилиндра 3 диаметром 70 мм и длиной 300 мм находится крышка 6 с резьбовым отверстием по центру. Цилиндр заполняется водой, в крышку вкручивается электромагнитный клапан 7, который позволяет выпускать в полость цилиндра минеральную частицу, скорость свободного падения которой в центробежном поле требуется измерить. К валу установки 8 крепятся два кронштейна 9. Головка видеокамеры и цилиндр уравниваются противовесами 10, которые накручиваются на кронштейны. Благодаря тому, что кронштейны могут закрепляться в любой части вала, можно обеспечить различное относительное положение видеокамеры и цилиндра, что в свою очередь позволяет получать три проекции цилиндра и фиксировать перемещение минеральной частицы в цилиндре по трем координатам. Частота вращения цилиндра может регулироваться с помощью частотного преобразователя. Частоту вращения цилиндра в зависимости от частоты, задаваемой на частотном регуляторе и как следствие центробежное ускорение можно менять в диапазоне от 0.08 до 200g.

Видеокамера позволяет фиксировать движение минеральной частицы в цилиндре, также возможно произвести прямой замер координат частицы в нем (начало координат – затвор электромагнитного клапана) в зависимости от времени с точностью до миллионной доли секунды. Далее рассчитывается скорость свободного падения минеральной частицы в центробежном поле с заданными начальными условиями: частота вращения цилиндра, род среды, в которой происходит падение, размеры, форма и плотность минеральной частицы.

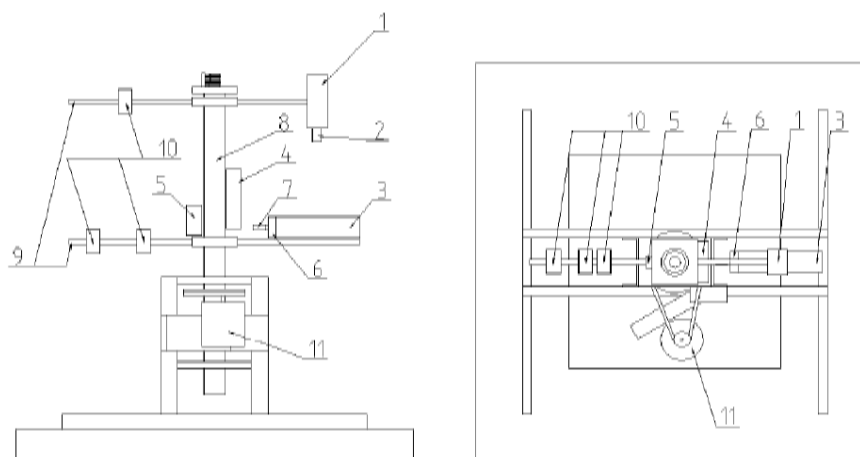


Рис. 1. Лабораторная установка для изучения свободного падения тел в центробежном поле: 1 – высокоскоростная видеокамера; 2 – оптическая система; 3 – прозрачный цилиндр; 4 – блок управления питанием; 5 – аккумулятор; 6 – крышка; 7 – электромагнитный клапан; 8 – вал; 9 – кронштейны; 10 – противовесы; 11 – приводной электродвигатель

Целью единичного эксперимента является определение скорости движения минеральной частицы с известными размерами, формой, плотностью и построение траектории её перемещения в однородной среде под действием центробежной силы с использованием метода визуализации быстротекущего процесса. Эксперимент проводился на лабораторной установке (рис. 1) при нормальных условиях.

В качестве образцов, скорость свободного падения которых измерялась, использовались кусочки свинцового блеска, вольфрамита, кварца.

Изменяемыми факторами эксперимента являются: диаметр частицы – d ; плотность частицы – ρ ; форма частицы – s , определяется коэффициентом формы; плотность среды – Δ ; центробежное ускорение – g .

Данный эксперимент позволил визуально наблюдать и рассчитывать с высокой точностью движение (падение) минеральных частиц в центробежном поле. На рис. 2 показаны отдельные кадры движущейся (падающей) в цилиндре частицы магнетита под действием центробежной силы.

Эксперименты проводились с частицами различной плотности на изменяемых центробежных ускорениях. На рис. 3 представлены траектории движения минеральных частиц магнетита, свинцового блеска и кварца при центробежных ускорениях 5 и 7.81 g с момента начала их движения (падения).

Анализ графика позволяет сделать вывод о том, что изменение величины g приводит к изменению траекторий движения минеральных частиц. Изменения носят нелинейный характер.

Результаты вышеописанного эксперимента показали подход в построении численной модели свободного падения минеральных частиц в изменяемом центробежном поле. Без учета центробежных сил, при исследовании свободного падения частиц, рассматриваются три силы: сила тяжести P , подъемная (архимедова) сила R и сила гидродинамического сопротивления жидкости F . Сила тяжести и архимедова сила направлены по одной оси, поэтому мы можем ввести суммарную составляющую сил, которую принято называть **гравитационной силой** $F_{\text{Гл}}$ [1]:

$$F_{\text{Гл}} = \frac{\pi \cdot D^3}{6} \cdot (\rho_g - \rho_l) \cdot g, \quad (1)$$

где D – диаметр частицы; ρ_g – плотность частицы; ρ_l – плотность жидкости; g – ускорение свободного падения.

В формуле (1) частица считается сферической. В случае несферической частицы можно использовать приведенный диаметр, рассчитываемый по объему частицы. Несферичность также учитывается при расчете силы сопротивления. Для этого вводится коэффициент сферичности. В общем случае сила сопротивления зависит от режима обтекания тела жидкостью. В свою очередь, режим обтекания определяется совокупностью параметров, таких как: крупность частицы, скорость движения частицы, вязкость жидкости и др. Для учета различных режимов необходимо ввести в модель соответствующие формулы расчета сопротивления. При этом сила гидродинамического сопротивления зависит от относительной скорости движения частицы, то есть от разности скоростей движения жидкости и частицы.

Сила сопротивления F_D пропорциональна квадрату скорости и имеет направление, противоположное направлению движения. В центробежном поле необходимо учитывать, что в абсолютной системе координат (система отсчета не связана с вращающейся системой координат) минеральная частица движется за счет сил, создаваемых вращением, т.е. за счет действия центробежной силы, поэтому в формулах расчета силы сопротивления появляется разность скоростей:

$$F_D^x \sim -\frac{1}{2} \text{sign}\{U_x - V_x\} \cdot \Psi \cdot \rho_l \cdot |\mathbf{V} - \mathbf{U}| \cdot (U_x - V_x),$$

$$F_D^y \sim -\frac{1}{2} \text{sign}\{U_y - V_y\} \cdot \Psi \cdot \rho_l \cdot |\mathbf{V} - \mathbf{U}| \cdot (U_y - V_y),$$

$$F_D^z \sim -\frac{1}{2} \text{sign}\{U_z - V_z\} \cdot \Psi \cdot \rho_l \cdot |\mathbf{V} - \mathbf{U}| \cdot (U_z - V_z),$$

где $\mathbf{U}$ – вектор скорости частицы; $\mathbf{V}$ – вектор скорости жидкости; Ψ – динамический коэффициент сопротивления.

Значение коэффициента сопротивления зависит

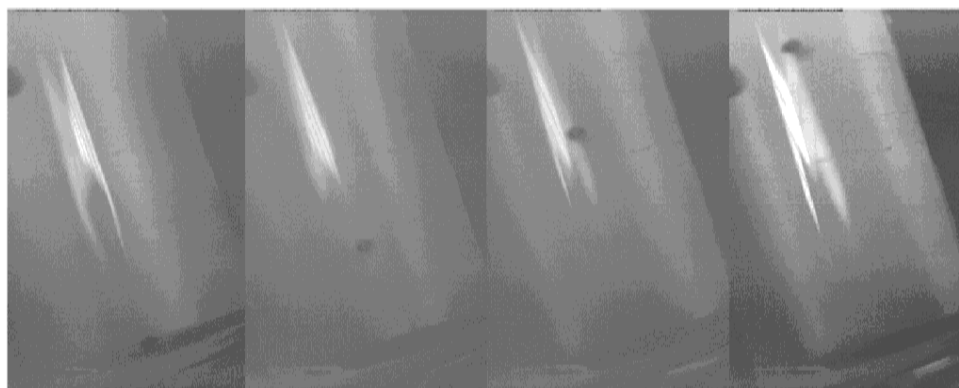


Рис. 2. Покадровое движение (падение) частицы магнетита от торца цилиндра в центробежном поле напряженностью 7 g

от числа Рейнольдса, которое вычисляем по формуле [1]:

$$Re = \frac{|U| \cdot D}{\nu},$$

где ν - кинематическая вязкость жидкости.

Для определения коэффициента Ψ можно воспользоваться диаграммой Релея или таблицей Лященко. Так как таблица Лященко учитывает соотношения, полученные Релеем, мы использовали ее в своих расчетах [2].

В центробежном поле появляется дополнительная сила – **центробежная** F_c , которая пропорциональна расстоянию до оси вращения:

$$F_c = \frac{\pi \cdot D^3}{6} \cdot \rho_g \cdot \frac{U_\varphi^2}{r},$$

где U_φ - тангенциальная составляющая вектора скорости; r - расстояние от частицы до оси вращения.

Суммарная составляющая всех сил, действующих на частицу в центробежном поле, определяется по формуле

$$F_{total} = F_{Gl} + F_D + F_c, \quad (2)$$

$$F_{total} = \frac{\pi \cdot D^3}{6} \cdot \left[(\rho_g - \rho_l) \cdot g + \rho_g \cdot \frac{V_\varphi^2}{r} \right] - C_{sign}\{U - V\} \cdot \Psi \cdot \rho_l \cdot |V - U| \cdot (U - V) \quad (2a)$$

Как видно из уравнения (2a), зависимость между результирующей силой, действующей на частицу, и угловой скоростью, носит не линейный характер, что подтверждается соответствующими изменениями траекторий в движении частиц (рис. 3).

Порядок расчета. Численный расчет проводится следующим образом. Весь временной интервал движения частицы делится на отрезки величиной Δt . На каждом отрезке результирующую силу F_{total} считаем

постоянной. Тогда ускорение частицы находится из уравнения

$$m \cdot \left(\frac{dU}{dt} \right)^{n+1} = \frac{\pi \cdot D^3}{6} \cdot \rho_g \cdot \left(\frac{dU}{dt} \right)^{n+1} = F_{total}^n,$$

где m – масса частицы, тогда соответствующий вектор скорости для вычисления сил на следующем отрезке времени равен

$$U^{n+1} = U^n + \left(\frac{dU}{dt} \right)^{n+1} \Delta t. \quad (3)$$

Новое положение частицы определяется итерационными формулами

$$X^{n+1} = X^n + U_x^{n+1} \cdot \Delta t,$$

$$Y^{n+1} = Y^n + U_y^{n+1} \cdot \Delta t,$$

$$Z^{n+1} = Z^n + U_z^{n+1} \cdot \Delta t.$$

В начальный момент времени вертикальная составляющая скорости частицы равна нулю, а тангенциальная совпадает с угловой скоростью вращения. Начальное ускорение свободно падающей частицы в центробежном поле определяется по уравнению (2a) с учетом равенства нулю разности скоростей.

$$m \frac{dv}{dt} = \frac{\pi \cdot D^3}{6} \cdot \left[(\rho_g - \rho_l) \cdot g + \rho_g \cdot \frac{U_\varphi^2}{r} \right]. \quad (4)$$

Разделив обе части уравнения (4) на массу

$$m = \frac{\pi \cdot D^3 \cdot \rho_g}{6}, \text{ получим}$$

$$\frac{dv}{dt} = \frac{(\rho_g - \rho_l) \cdot g}{\rho_g} + \frac{U_\varphi^2}{r}. \quad (5)$$

Уравнение (5) определяет начальное ускорение частицы, которое зависит как от плотностей частицы и жидкости, так и от скорости вращения и удаленности частицы от оси вращения.

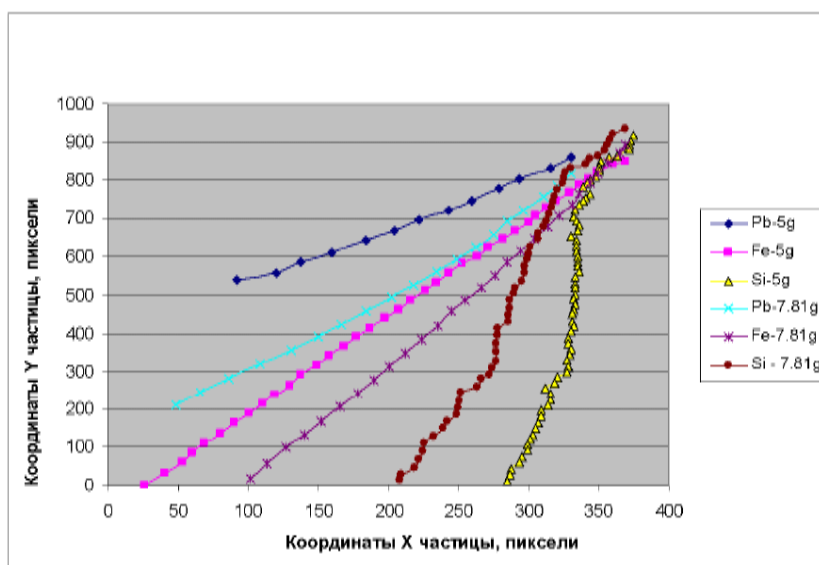


Рис. 3. Траектории движения минеральных частиц в центробежном поле

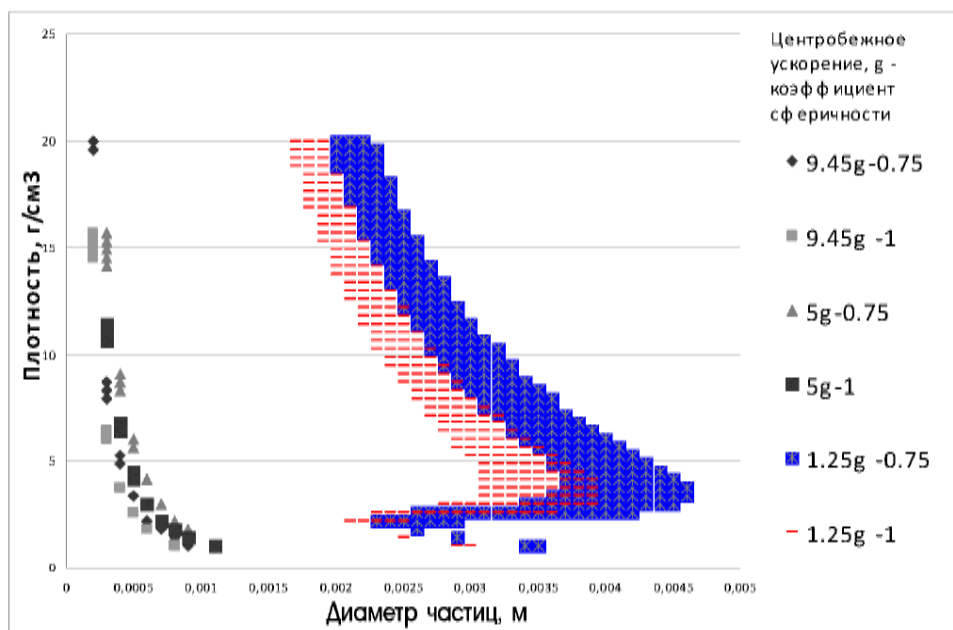


Рис. 4. Распределение равнопадающих в центробежном поле частиц для центробежных ускорений 1.25g, 5g и 9.45g и коэффициентов сферичности 1 и 0,75

Для анализа построенной численной модели была составлена программа с графическим интерфейсом, позволяющая в реальном времени менять различные параметры модели и изучать их влияние на поведение частицы. Некоторые результаты численного моделирования скоростей падения минеральных частиц показаны на рис. 4 и 5, где приведены распределения равнопадающих в центробежном поле минеральных частиц в зависимости от наложенного на них центробежного ускорения с учетом их плотности и диаметра. Следует отметить, что в общем случае законы движения частиц могут быть различными. Это связано с тем, что центробежная сила, так же как и сила тяжести, зависит от параметров частицы; диаметра и плотности. Поэтому частицы с разными характеристиками могут приходить одновременно в одну точку, имея

различные законы скоростей. Так как с практической точки зрения более важно определение положения частицы, чем знание ее скорости, то мы называем *равнопадающими в центробежном поле* частицы, траектории которых приходят через заданную точку.

Расчеты проводились для трех центробежных ускорений – 1.25g, 5g и 9.45g и для двух значений коэффициента сферичности – 0.75 и 1.

Укрупненная диаграмма для центробежных ускорений 5g и 9.45g приведена на рис. 5.

Полученные данные позволяют сделать следующий вывод: с увеличением центробежного ускорения, во-первых, уменьшается диаметр равнопадающих в центробежном поле частиц и, во-вторых, уменьшается диапазон плотностей равнопадаемых в центробежном поле минеральных частиц.

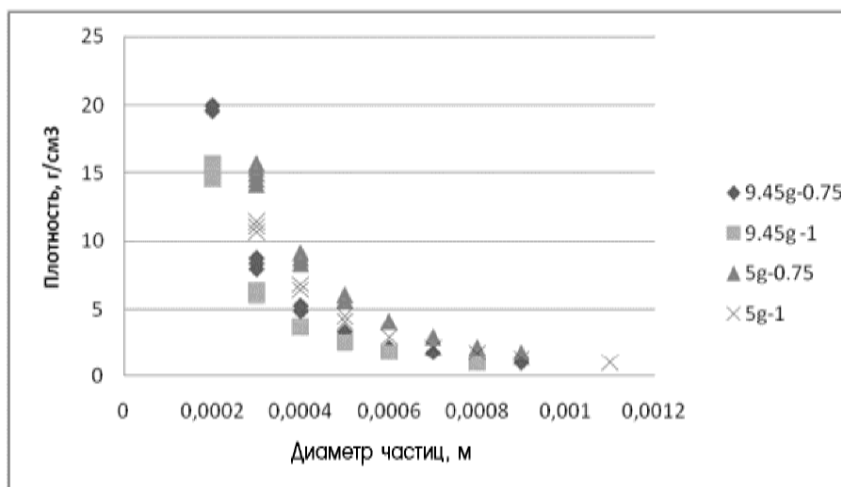


Рис. 5. Распределение равнопадающих в центробежном поле частиц для центробежных ускорений 5g и 9.45g

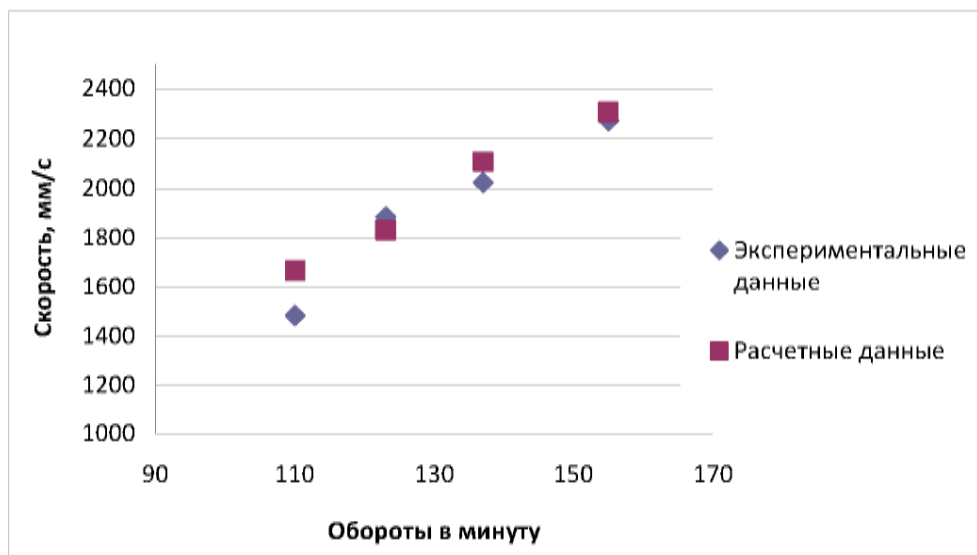


Рис. 6. Сравнение экспериментальных и расчетных данных для свинцового блеска размером 2.56 мм

Корректность построенной численной модели была проверена на ряде экспериментов со свинцовым блеском размером 2.56 мм (рис 6).

На графике (рис. 6) приведены значения средней скорости частицы, полученные в результате эксперимента и рассчитанные на основе модели. Экспериментальные значения средней скорости получены из анализа данных по видеосъемке. Численные значения скоростей рассчитаны как среднее арифметическое значение скоростей на каждом дискретном отрезке времени (см. уравнение 3).

Степень совпадения экспериментальных и расчетных данных подтверждает правильность выбран-

ной математической модели, а полученные результаты расчетов могут служить основой для расчета конструктивных параметров центробежных гравитационных аппаратов.

Библиографический список

1. Кизевальтер Б.В. Теоретические основы гравитационного обогащения. М.: Недра. 1979. 295 с.
2. Гравитационные методы обогащения / под ред. В.А.Рундквиста. М.: Государственное научно-техническое изд-во лит-ры по черной и цветной металлургии. 1953. С. 30-31.

УДК 644.77.023

ВЛИЯНИЕ ЭЛЕКТРОЛИТОВ НА СЕДИМЕНТАЦИОННУЮ УСТОЙЧИВОСТЬ ВОДНЫХ СУСПЕНЗИЙ ТАЛЬКА

А.А.Яковлева¹, М.А.Бочарова²

Иркутский государственный технический университет, 664074, г. Иркутск, ул. Лермонтова, 83.

Рассмотрены результаты седиментационного анализа водных суспензий талька марки «Талькон-30» с различными добавками электролитов. Дана количественная оценка влияния электролитов на седиментационную устойчивость водно-тальковых композиций, приведены результаты экспериментов и их обсуждение с точки зрения протекания процессов адсорбции на поверхности твердой фазы. Установлено, что ион Mg (II) наиболее активно влияет на седиментационную устойчивость грубодисперсной части системы «вода-тальк»³.

Ил. 6. Табл. 3. Библиогр. 11 назв.

Ключевые слова: тальк, седиментационный анализ, дисперсные системы, электролит, седиментационная устойчивость, коагулирующий ион.

¹Яковлева А.А., доктор технических наук, профессор, e-mail: ayakov@istu.edu
Yakovleva A.A., a doctor of technical sciences, a professor, e-mail: ayakov@istu.edu

²Бочарова М.А., инженер, e-mail: kalininsk69@istu.edu
Bocharova M.A., an engineer, e-mail: kalininsk69@istu.edu

³ В экспериментальной работе принимали участие студенты группы ХТО-04-1:
Ха Куок Хань, Нгуен Чонг Дак, Ле Хонг Гам, Во Дай Ту, Чыонг Суан Нам.