

УДК 622.7:519.711.2

**ПРИМЕНЕНИЕ МЕТОДОВ ВЫЧИСЛИТЕЛЬНОЙ ГИДРОДИНАМИКИ
К ИССЛЕДОВАНИЮ И АНАЛИЗУ ПРОЦЕССОВ РАЗДЕЛЕНИЯ МИНЕРАЛОВ**

**В. Ф. Скороходов, М. С. Хохуля, А. С. Опалев,
В. В. Бирюков, Р. М. Никитин**

*Горный институт Кольского научного центра Российской академии наук
ул. Ферсмана, 24, 184209, г. Апатиты, Россия*

Для изучения параметров гетерогенных сред в рабочих объемах магнитно-гравитационных, гравитационных и флотационных аппаратов применены методы вычислительной гидродинамики. В результате численного моделирования сепарационных процессов получены графические и численные данные, характеризующие особенности их протекания. Обоснованы предложения по совершенствованию ряда конструкций гравитационного и магнитно-гравитационного обогатительного оборудования. Предложен подход к оценке поверхностной энергии частиц минералов при моделировании процесса флотации.

Вычислительная гидродинамика, численное моделирование, сепарационный процесс, магнитно-гравитационный сепаратор, гидравлический сепаратор, флотационная машина, псевдооживленный слой

Достижению высоких показателей обогащения и повышению уровня экологической безопасности и ресурсосбережения при переработке руд, характеризующихся тонкой вкрапленностью ценных компонентов и сложным минеральным составом, способствуют совершенствование и разработка новых аппаратов и технологий. Создание нового обогатительного оборудования — научно-техническая проблема, связанная с проведением комплекса проектно-конструкторских, инженерных, технологических и организационно-технических работ. В настоящее время одним из основных направлений исследования и анализа процессов разделения минералов, способствующих разработке нового сепарационного оборудования, является компьютерное моделирование, основанное на многоитерационных численных методах решения уравнений вычислительной гидродинамики [1–3].

Технологии компьютерного моделирования, позволяющие сократить издержки комплекса проектно-технологических работ и повысить степень верификации принимаемых конструкторских и инженерных решений, интегрированные в современные CAD/CAM/CAE системы, бурно развиваются. Темпы их развития отвечают темпам развития вычислительной техники.

Повышение уровня исследований и анализа процессов разделения минералов на основе применения методов вычислительной гидродинамики позволяет получить информацию, которая может быть использована для выработки качественно новых подходов к совершенствованию

нию и разработке обогатительного оборудования. Прежде всего это закономерности движения выделенных узких фракций минеральных компонентов и распределения их объемных концентраций, эффекты влияния сторонних силовых воздействий различной физической природы и интенсивности, а также переходных режимов работы обогатительного оборудования на дисперсные минеральные частицы, находящиеся в исследуемой области сепарационного процесса [4, 5].

Известные аналитические модели массопереноса в системах субстанциональных уравнений не учитывают особенности гидродинамики многофазных потоков в зонах сложной геометрии. Решение данной проблемы и, в частности, для сепарационных процессов, происходящих в определенных пространственных и физических условиях, возможно с применением численных методов (например, метод конечных элементов) и развитой с середины прошлого столетия теории многофазного многоскоростного континуума (ММК) [6–8].

Использование дифференциальных уравнений сохранения массы, количества движения и энергии обуславливает индивидуальную их запись для каждой из псевдофаз. Псевдофаза понимается авторами как узкая минеральная фракция, сформированная по признаку принадлежности ее частиц к диапазону интенсивности того или иного свойства, а среда — как суперпозиция взаимопроникающих континуумов, каждый из которых относится к своей псевдофазе. Это позволяет создавать модели конкретных аппаратов, исследовать в их рабочих объемах кинетику разделения перерабатываемого материала, выработать рекомендации по совершенствованию основного обогатительного оборудования и оптимизировать технологические режимы его работы.

Эффективным инструментом для моделирования гетерогенных сред с применением методов CFD (Computational Fluid Dynamics — вычислительная гидродинамика) служит широко распространенный программный комплекс ANSYS Fluent. Это мощный “решатель” задач для объектов, представляющих собой области, в которых протекают гидродинамические и обменные процессы.

Если разработчик модели воспринимает объект исследования как физическую систему с присущими ей свойствами и находящуюся в определенной связи с окружающей средой, то Fluent работает с геометрическим образом системы, разбитым на ограниченное множество элементарных объемов, объединенных в расчетную сетку модели. Точность и информативность вычислительного эксперимента во многом обусловлены дискретностью, качеством и структурой расчетной сетки. Таким образом, представление области пространства, где протекает сепарационный процесс, в виде системы с ограниченным числом степеней свободы позволяет в ходе вычислительного эксперимента неограниченно приблизиться к характеристикам подобного натурального эксперимента. С другой стороны, задаваемая во Fluent формулировка условий однозначности модели и возможность экстраполировать текущие результаты расчета в значения технологических параметров обогащения позволяют осуществлять, во-первых, оценку степени адекватности модели реальному физическому процессу и, во-вторых, прогнозирование развития моделируемого процесса.

В данной работе представлены примеры применения методов вычислительной гидродинамики к исследованию и анализу гравитационных, магнитно-гравитационных и флотационных процессов разделения минералов.

ИССЛЕДОВАНИЕ ПРОЦЕССА РАЗДЕЛЕНИЯ В ГИДРАВЛИЧЕСКОМ СЕПАРАТОРЕ

Метод CFD был применен для исследования процесса разделения немагнитных фракций железных руд в восходящем потоке жидкости. Предметом исследований явилась проблема, связанная с тем, что гравитационные методы обогащения с применением подготовительных

операций тонкого грохочения или гидравлической классификации не обеспечивают в полной мере эффективного разделения материала, состоящего из тонких зерен слабомагнитных минералов. При классификации минералов, имеющих разную плотность или форму частиц, получают гидравлические классы, отличающиеся от классов крупности тем, что в гидравлическом классе мелкая его часть представлена минералами большей плотности, а крупная — минералами меньшей плотности. С уменьшением крупности зерен коэффициент равнопадаемости уменьшается, а модуль шкалы гидравлической классификации увеличивается.

Для решения обозначенной проблемы переработки такого материала проводится предварительное выделение его крупной части грохочением с последующей классификацией подрешетного продукта. Оптимизация гидравлической классификации может быть достигнута путем создания в различных частях сепаратора определенной структурированности суспензии с необходимым значением вязкости и плотности среды за счет изменения конструктивных и, как следствие, гидродинамических параметров сепаратора. Для проверки выдвинутой идеи разработана CFD модель гидравлического сепаратора с наклонными пластинами (рис. 1).

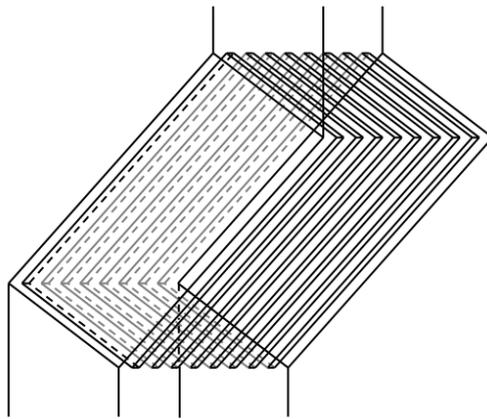


Рис. 1. Наклонные пластины гидравлического сепаратора

При формулировке условий однозначности модели учтено соответствие свойств псевдофаз свойствам реального материала. Псевдофазы модели сформированы из двух фракций гематита с диаметрами частиц $8.5 \cdot 10^{-5}$ и $1.5 \cdot 10^{-4}$ м при плотности 5200 кг/м^3 и двух фракций минералов группы амфиболов с такими же размерами при плотности 3000 кг/м^3 .

Наиболее важными характеристиками моделируемого процесса является распределение объемной концентрации псевдофаз, а также изменение скоростей стесненного падения частиц различной крупности в определенных областях аппарата. На рис. 2 показаны осевые срезы полей распределений концентраций псевдофаз, полученные в вычислительном эксперименте.

Анализ результатов моделирования позволил установить, что на вертикальных участках модели сепаратора дисперсные псевдофазы ожижаются, образуя слои с высокими скоростями фильтрации жидкости. По мере того как суспензия входит в зону наклонных каналов, сегрегируемые частицы псевдофаз оседают на верхних внешних поверхностях пластин с образованием слоя осадка. Этот осадок перемещается в нижнюю зону сепаратора с пониженными скоростями фильтрации жидкости. Часть частиц осаждается в зону разгрузки модели сепаратора, а зерна, оставшиеся в суспензии, переносятся по наклонным каналам в верхнюю часть аппарата, откуда транспортируются в приемник легкой фракции. Таким образом, разделение продукта под дей-

ствием восходящего потока воды происходит не в объеме пульпы по принципу равнопадаемости или гидравлической классификации, а внутри псевдооживленного слоя, находящегося в пространстве между пластинами, обеспечивающими более высокую скорость сепарации.

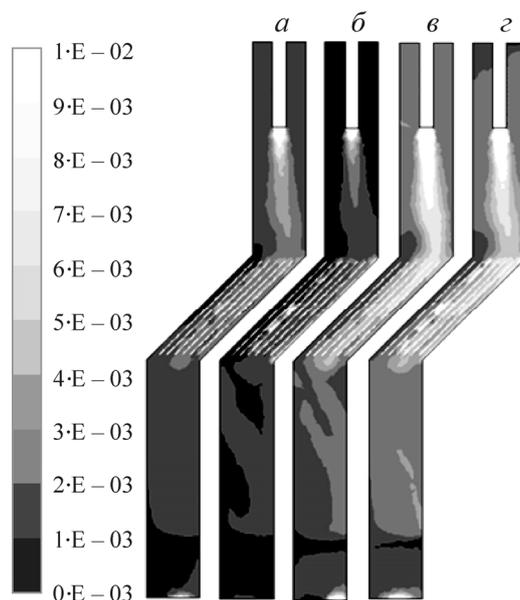


Рис.2. Осевые срезы полей распределений концентраций псевдофаз: *a* — гематит, $d = 8.5 \cdot 10^{-5}$ м; *б* — гематит, $d = 1.5 \cdot 10^{-4}$ м; *в* — амфиболы, $d = 8.5 \cdot 10^{-5}$ м; *г* — амфиболы, $d = 1.5 \cdot 10^{-4}$ м

Данные по выходу псевдофаз в слив сепаратора свидетельствуют о преимущественном выносе в легкую фракцию мелких зерен амфиболов. Наименьший выход наблюдается у зерен гематита крупностью $1.5 \cdot 10^{-4}$ м, который на начальных стадиях разделения значительно меньше выхода зерен амфиболов крупностью $8.5 \cdot 10^{-5}$ м.

Выполненные с применением CFD метода исследования и анализ процесса разделения материалов, представленных в двух классах различной крупности, позволяют сделать вывод о том, что в объеме суспензии происходит классификация частиц по принципу равнопадаемости, а на рабочей поверхности пакета пластин — по принципу сегрегационного расслоения минералов по наклонной плоскости. Благодаря сочетанию двух видов разделения, одновременно происходит гидравлическая сепарация исходного материала на фракции и последующее фракционное обогащение, за счет чего исключается негативное влияние частиц разной гидравлической крупности друг на друга.

Таким образом, в моделируемом процессе показана возможность оптимизации гидравлической классификации и приемлемость конструкции гидравлического сепаратора с наклонными пластинами. Выявлен механизм процесса разделения тонких классов железосодержащих руд, заключающийся в преимущественном проявлении принципа сегрегационного расслоения минералов на наклонной поверхности.

РАЗРАБОТКА И СОВЕРШЕНСТВОВАНИЕ МАГНИТНО-ГРАВИТАЦИОННЫХ СЕПАРАТОРОВ

Одно из направлений проведенных исследований процессов разделения связано с необходимостью разработки и совершенствования магнитно-гравитационных (МГ) сепараторов. Цель этих исследований — повышение селективности разделения тонкоизмельченных сильномагнитных руд, частицы которых обладают низкой контрастностью свойств.

Поскольку в отличие от обычной магнитной сепарации магнитно-гравитационная сепарация является более селективным процессом разделения, она позволяет получать более качественные концентраты (не более 2.5 % SiO_2 и около 70 % $\text{Fe}_{\text{общ}}$) при переработке тонковкрапленных железистых кварцитов. Кроме того, гибкое управление параметрами сепарации (напряженность магнитного поля, скорость восходящего потока) обеспечивает оперативное реагирование на изменение вещественного состава перерабатываемых руд и стабилизацию качества производимых железорудных концентратов.

Вместе с тем некоторые недостатки МГ-сепараторов приводят к потерям железа с тонкими ферромагнитными частицами. Для выяснения причин, вызывающих эти потери, методами вычислительной гидродинамики выполнены исследования и анализ течения многофазной ферромагнитной суспензии в рабочем объеме МГ-сепаратора.

На первом этапе создана CFD модель процесса течения ферромагнитной суспензии, находящейся в зоне воздействия восходящего закрученного водного потока и однородного магнитного поля. В ходе вычислительного эксперимента выявлено, что в сепараторе формируется прецессирующий вихрь и рециркуляционные течения, наличие которых изменяет скорость восходящего водного потока в широком диапазоне, что отрицательно сказывается на селективности процесса разделения.

На последующем этапе в модель введены изменения, состоящие в том, что с целью стабилизации скоростей восходящего водного потока и выравнивания полей концентрации компонентов суспензии по вертикальной оси корпуса МГ-сепаратора размещена дополнительная цилиндрическая вставка, внутри которой установлен соленоид.

Вычислительный эксперимент показал, что дополнительный соленоид, силовые линии которого сонаправлены с силовыми линиями основного соленоида, позволяет уменьшить неоднородности результирующего магнитного поля в зоне разделения, а использование дополнительной вставки устраняет рециркуляционные течения и пульсации скоростей в сепарационном пространстве. На рис. 3 представлены поля вертикальной компоненты скорости воды в МГ-сепараторе типовой конструкции (а) и с установленной вставкой (б).

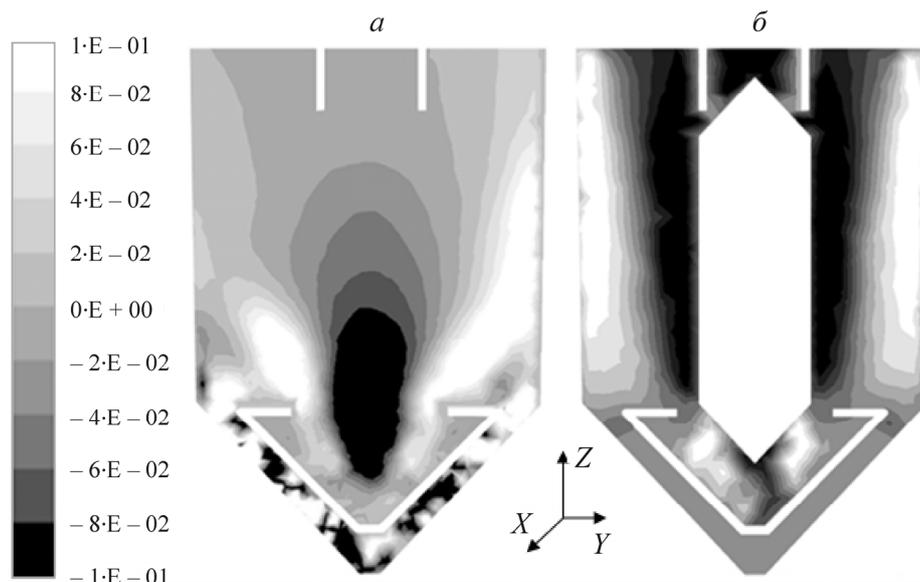


Рис.3. Поля Z-компоненты скорости (м/с) воды в МГ-сепараторе типовой конструкции (а) и с установленной вставкой (б)

Также анализ результатов вычислительных экспериментов позволил получить эмпирическую формулу для определения минимального значения напряженности магнитного поля H (кА/м), при котором частицы с максимальным диаметром d (м) переходят в сливную фракцию, при заданной скорости восходящего водного потока V (м/с), в диапазоне крупности от 0 до 10^{-4} м и с содержанием C (%) магнетита в частице [9]:

$$H = \sqrt{\frac{V}{d^2 \cdot 10^{10}} - a + bC} \cdot sC^{3/2}, \quad (1)$$

где $a = 0.9324 \cdot 10^{-4}$; $b = 0.1242 \cdot 10^{-5}$; $s = 35 \cdot 10^{-8}$ — эмпирические коэффициенты.

Полученные на основе данной формулы зависимости значений напряженности магнитного поля от крупности частиц, выносимых в слив МГ-сепаратора при различных скоростях восходящего водного потока, приведены на рис. 4.

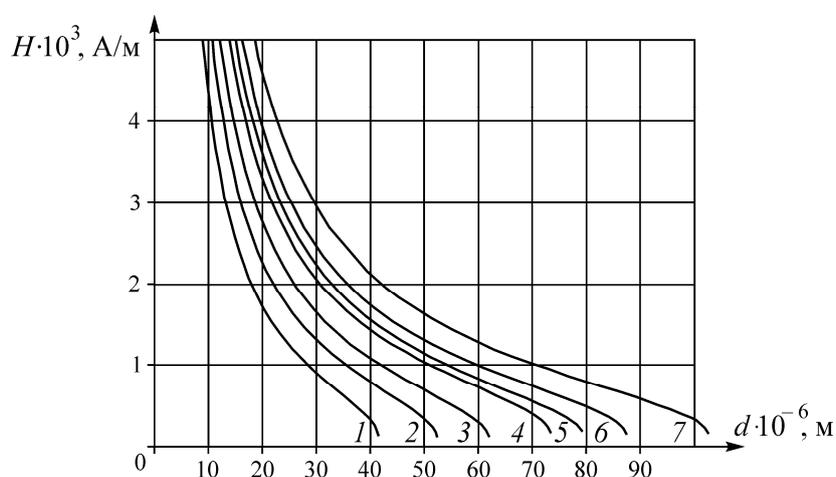


Рис.4. Зависимость напряженности магнитного поля от крупности частиц, выносимых в слив МГ-сепаратора, при различных скоростях восходящего водного потока, м/с: 1 — $V = 3 \cdot 10^{-3}$; 2 — $V = 5 \cdot 10^{-3}$; 3 — $V = 7 \cdot 10^{-3}$; 4 — $V = 1 \cdot 10^{-2}$; 5 — $V = 1.2 \cdot 10^{-2}$; 6 — $V = 1.5 \cdot 10^{-2}$; 7 — $V = 2 \cdot 10^{-2}$

ПОДХОД К ФОРМУЛИРОВКЕ УСЛОВИЙ ОДНОЗНАЧНОСТИ CFD МОДЕЛИ ПРОЦЕССА ФЛОТАЦИИ

Исследования и анализ процесса флотационного разделения минералов с применением CFD метода рассматриваются авторами как поиск исчерпывающей численной модели процесса флотации. Такая модель должна учитывать факторы, влияющие не только на флотируемость частиц того или иного минерала с учетом степени его раскрываемости, но и на возможность получения сепарационных характеристик для различных видов флотационного оборудования в широком диапазоне режимов его работы. Необходимость разработки CFD модели процесса флотационного разделения минералов связана, в частности, с решением вопросов совершенствования используемой флотационной техники в цикле получения нефелинового концентрата из текущих хвостов апатитовой флотации при переработке апатит-нефелиновых руд.

В соответствии с технологией получения нефелинового концентрата, реализованной на АНОФ-2 ОАО «Апатит» из сырья, представленного рудами Хибинских месторождений, потери Al_2O_3 в основной нефелиновой флотации составляют более 36 %. Однако ее технологические

показатели могут быть улучшены за счет оптимизации параметров флотационного разделения внутри рабочей камеры флотационной машины ОК-38, используемой в данном переделе. Один из путей оптимизации — использование в процессе флотации активированной водной дисперсии воздуха (АВДВ), которая обеспечивает сохранение контрастности свойств поверхностей частиц различных минералов и позволяет варьировать степень и топологию аэрирования рабочей зоны.

В продолжение исследований разработана CFD модель разделения узких флотационных фракций по признаку флотируемости. Основной задачей этой части работы являлась проверка возможности применения метода количественной оценки поверхностной энергии минеральных зерен по установленной связи между ее величиной и значениями энергии ионного взаимодействия в кристаллической решетке минерала при формулировке условий однозначности математической модели процесса флотации. Названный подход основывается на геоэнергетической теории А. Е. Ферсмана [10] и исследованиях В. В. Зуева [11], посвященных вопросам кристаллоэнергетики минералов. Формула, предложенная А. Е. Ферсманом, имеет вид

$$U_v = 1071.5 \frac{\rho}{\mu} \sum_{i=1}^n \varepsilon_k j_i, \quad (2)$$

где U_v — объемная энергия ионного взаимодействия в кристаллической решетке минерала [кДж/см³]; 1071.5 — поправка А. Е. Ферсмана на вклад ионов в энергию решетки минерала; ρ — плотность минерала, г/см³; μ — молярная масса минерала, г/моль; n — количество сортов ионов, входящих в решетку; ε_k — энергетическая константа иона i -го сорта; j_i — количество ионов i -го сорта.

Большинство физико-химических свойств минералов может быть количественно описано с позиций удельных значений энергии ионного взаимодействия в кристаллической решетке. К этому числу относится и поверхностная энергия. Исследования, проведенные в работе [11], позволяют рассчитать поверхностную энергию минералов [Дж/м²] по линейной эмпирической зависимости

$$E_s = 0.0025U_v + 0.3052 \quad (3)$$

с достаточно высокой достоверностью аппроксимации $R^2 = 0.8919$.

Модель создана в программной среде ANSYS Fluent с использованием в качестве сеточного генератора программы Gambit. Основой создания геометрического образа камеры флотационной машины ОК-38 послужила конструкторская документация, разработанная компанией Outokumpu. Геометрический образ включает в себя область пульпы до нижнего уровня захвата пеносъемных механизмов, зоны люка загрузки пульпы и люка выгрузки камерного продукта, подвижную область импеллера и область статора. Расчетная сетка конечных элементов модели содержит соответственно для подвижной области импеллера около 10^6 ячеек, а для неподвижной области статора и камеры $\sim 4 \cdot 10^6$ ячеек. В модели представлены четыре псевдофазы: водный раствор ПАВ, диспергированный воздух, две твердые гранулированные фазы. Динамические характеристики модели по расходам пульпы и воздуха соответствуют технологической схеме, регламентирующей производство нефелинового концентрата на АНОФ-2.

При проведении вычислительного эксперимента учитывалось, что при взаимодействии псевдофаз поверхностные силы должны доминировать над объемными. Такой характер взаимодействия псевдофаз обеспечивался применением метода количественной оценки поверхно-

стной энергии минеральных зерен. Поэтому условия однозначности модели и параметры эффектов парных взаимодействий частиц определялись так, что твердые псевдофазы, кроме рассчитанных по свойствам апатита и нефелина значений поверхностных энергий, отличались также плотностью и крупностью. Гидрофобная дисперсная псевдофаза имела более высокую плотность при более высокой крупности по сравнению с гидрофильной.

Результаты вычислительного эксперимента показали выраженное разделение твердых псевдофаз с выносом гидрофобной фазы — более плотной и крупной к поверхности пенообразования и повышение концентрации в нижних придонных слоях модели камеры гидрофильной фазы.

На рис. 5 представлено распределение объемных концентраций флотируемой и нефлотируемой узких флотационных фракций на вертикальном срезе модели камеры флотомшины ОК-38 через 100 с после начала процесса флотации.

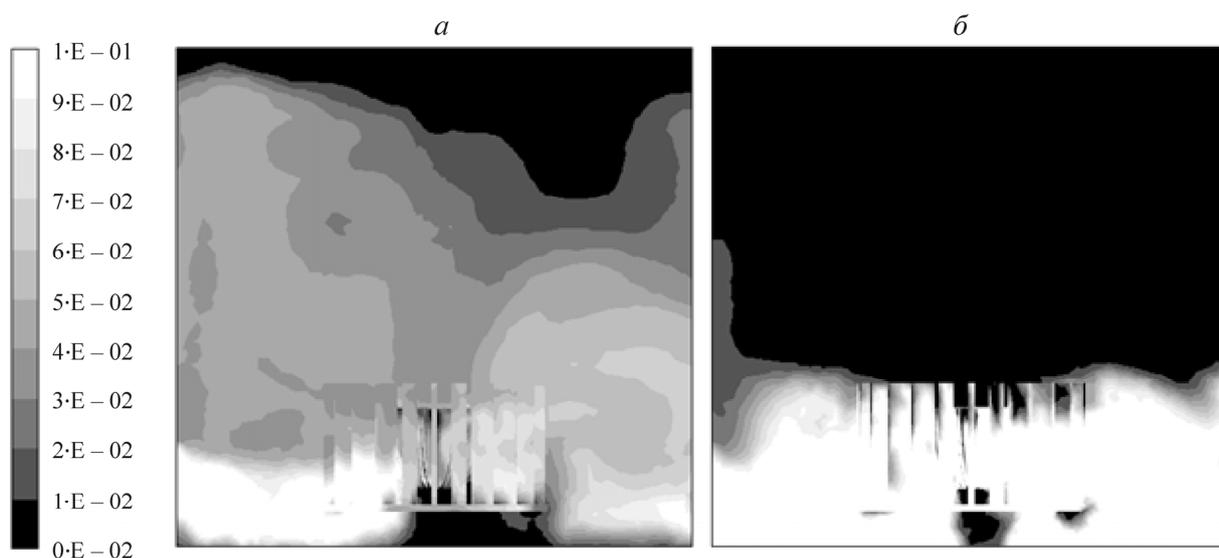


Рис.5. Распределение объемных концентраций флотируемой и нефлотируемой узких флотационных фракций: *а* — флотируемая фаза; *б* — нефлотируемая

Достоинствами данной CFD модели разделения узких флотационных фракций по признаку флотируемости в камере машины ОК-38 являются возможности учитывать флотационные свойства каждой псевдофазы и характер межфазных взаимодействий, в каждый момент времени проводить оценку массового баланса пульпы и ее компонентов, интерпретируя результаты расчета как технологические показатели процесса флотации.

ВЫВОДЫ

1. Методами вычислительной гидродинамики на базе универсального программного комплекса ANSYS-Fluent выполнено моделирование и определены значения параметров многофазных потоков (локальные скорости движения и объемные концентрации псевдофаз) в рабочих объемах обогатительных аппаратов.

2. Разработана модель гидравлического сепаратора, состоящего из устройства с наклонными пластинами и секций для выделения легкой и тяжелой фракций материала. На основе результатов моделирования выявлены особенности разделения тонких классов железосодержащих руд, заключающиеся в преимущественном проявлении принципа сегрегационного расщепления минералов по наклонной поверхности пластин.

3. Показано, что размещение внутри сепаратора цилиндроконической вставки с дополнительным соленоидом устраняет неоднородности результирующего магнитного поля и рециркуляционные течения в виде пульсаций скоростей в рабочем пространстве аппарата, что позволяет сократить потери железа с тонкими фракциями перерабатываемого материала.

4. Показана возможность создания действующих математических моделей процессов разделения минеральных компонентов флотацией на базе уравнений вычислительной гидродинамики и положений геоэнергетической теории и кристаллоэнергетики с соответствующей моделируемому процессу формулировкой условий однозначности модели.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. **Shukla S. K., Shukla P., and Ghosh P.** Evaluation of numerical schemes for dispersed phase modeling of cyclone separators, *Engineering Applications of Computational Fluid Mechanics*, 2011, Vol. 5, No. 2.
2. **Leeuwner M. J., Eksteen J. J.** Computational fluid dynamic modeling of two phase flow in hydrocyclone, *The Journal of the Southern African Institute of Mining and Metallurgy*, 2008, Vol. 108, No. 4.
3. **Doroodchi E., Galvin K. P., Fletcher D. F.** The influence of inclined plates on expansion behaviour of solid suspensions in a liquid fluidized bed — a computational fluid dynamics study, *Powder Technology*, 2005, Vol. 156, No. 2.
4. **Hedvall P., Nordin M.** Plant Designer: A crushing and screening modeling tool. Mineral processing plant design, practice and control: Proceedings, Society for mining, metallurgy and exploration, Inc., 2002, Vol. 1.
5. **Harris M., Runge K., Whiten W., and Morrison R.** JK-SimFloat as a practical tool for flotation process design and optimization. Mineral processing plant design, practice and control: Proceedings, Society for mining, metallurgy and exploration, Inc., 2002, Vol. 1.
6. **Нигматулин Р. И.** Динамика многофазных сред. Ч. I. — М.: Наука, 1987.
7. **Bowen R.** Theory of mixtures, *Continuum Physics*, New York: Academic Press, 1976.
8. **Drew D., Lahey R.** In particulate two-phase flow. Butterworth-Heinemann, Boston, 1993.
9. **Патент № 2387483 РФ.** Способ обогащения дисперсных ферромагнитных материалов / Н. Н. Мельников, А. Ш. Гершенкоп, В. Ф. Скороходов, В. В. Бирюков // Оpubл. в БИ. — 2010. — № 12.
10. **Ферсман А. Е.** Геохимия. — М.; Л.: ОНТИ, Химтеорет., 1936.
11. **Зуев В. В., Поцелуева Л. Н., Гончаров Ю. Д.** Кристаллоэнергетика как основа оценки свойств твердотельных материалов. — СПб., 2006.

Поступила в редакцию 25/II 2013