

УДК 622.7:519.711.2

**ПРИКЛАДНЫЕ АСПЕКТЫ ПРИМЕНЕНИЯ КОМПЬЮТЕРНОГО МОДЕЛИРОВАНИЯ
ГИДРОДИНАМИКИ МНОГОФАЗНЫХ СРЕД В ИССЛЕДОВАНИЯХ ПРОЦЕССОВ
РАЗДЕЛЕНИЯ МИНЕРАЛОВ ПРИ ОБОГАЩЕНИИ РУД**

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

*Горный институт КНЦ РАН, E-mail: skorohodov@goi.kolasc.net.ru,
ул. Ферсмана, 24, 184209, г. Анапты, Россия*

Представлен вычислительный аппарат CFD (Computational Fluid Dynamics — вычислительная гидродинамика), позволяющий создавать математические модели, которые отображают физические и физико-химические особенности сепарационных процессов. Полнота и степень детализации начальных и граничных условий математической модели определяют возможность валидации и верификации алгоритма и результатов вычислительного эксперимента, дающего представление не только о состоянии гетерогенной среды в настоящий момент, но и прогноз ее эволюции. Определяются три возможные составляющие применимости вычислительного эксперимента для исследования процессов обогащения минералов: исследование процессов в действующих машинах и аппаратах для переработки различных видов сырья; прогнозирование технологических показателей при изменении режимов сепарации и (или) модернизации оборудования; прототипирование новых конструкций оборудования. Рассмотрены компьютерные модели процессов центробежной классификации, винтовой сепарации, магнитно-гравитационной сепарации и флотации.

Компьютерное моделирование, вычислительная гидродинамика, прогнозирование технологических показателей обогащения минералов, центробежная классификация, винтовая сепарация, магнитно-гравитационная сепарация, флотация

DOI: 10.15372/FTPRPI20190216

Подходы к исследованию гидродинамики гетерогенных сред могут быть реализованы в адекватных и гибких математических моделях и базироваться на результатах физических экспериментов, с одной стороны, и вычислительной гидродинамики — с другой. Объединение этих источников знания формируется в развитии вычислительных ресурсов, становящихся все более мощными, производительными и доступными.

Имеющиеся в природе и в различных технологических процессах потоки представляют собой смесь фаз. Для многофазных систем понятие фазы более широко, чем отождествление ее с одним из агрегатных состояний вещества — газообразным, жидким или твердым. В общем случае количество фаз неограниченно. Каждая из них должна отвечать определенным отличительным признакам. Очевидно, что этими признаками должны являться свойства различной природы, которые ответственны за характер взаимодействия данной фазы с другими фазами, с потоком в целом и со сторонними воздействиями на поток. В гетерогенных средах сепарационных процессов обогаще-

ния минералов можно выделить фазы, состоящие из твердых частиц, принадлежащих разным классам крупности. Эти частицы отличаются степенью раскрытия полезного минерала, проявляют различные инертные, магнитные, поверхностные свойства частиц и т. д. Гетерогенную среду сепарационного процесса можно рассматривать как совокупность различных режимов взаимодействия веществ, находящихся в различных агрегатных состояниях в бинарных потоках: “газ–жидкость” или “жидкость–жидкость”, “газ–частицы твердого вещества”, “жидкость–частицы твердого вещества”, “твердые частицы–твердые частицы”. Имея математическую модель одного из указанных режимов, можно описать различные физические процессы. Например, математическая модель режима взаимодействия веществ в потоке “жидкость–частицы твердого вещества” позволяет рассматривать такие процессы и состояния среды, как вязкий и невязкий гидротранспорт частиц, седиментация и ожиженный слой.

Созданию математической модели предшествует формализация объекта моделирования и выработка ряда аксиоматичных допущений о его свойствах в целом и о свойствах его отдельных компонентов [1]. Такими исходными допущениями для гетерогенных сред являются [2]:

- размеры включений или неоднородностей в смеси (среде) во много раз больше молекулярно-кинетических (расстояний между молекулами, размеров кристаллической решетки, средних длин свободного пробега молекул);
- размеры неоднородностей во много раз меньше расстояний, на которых осредненные или макроскопические параметры смеси (среды) или фаз меняются существенно.

Исходя из условий принятия названных допущений, определяется вид и условия взаимосвязи фундаментальных уравнений сохранения массы, импульса и энергии, являющихся основой вычислительной гидродинамики, т.е. аналитическая форма модели. К таким формам, адаптированным в решателе ANSYS Fluent [3], можно отнести модель Volume of Fluid (VOF) Model Theory (теория модели объема жидкости) [4]. Данная модель используется для описания явления на границе несмешивающихся жидкостей, получившего название Kelvin–Helmholtz instability (неустойчивость Кельвина–Гельмгольца) [5], а также для случаев несмешивающихся жидкостей, движения больших пузырей газа, образования волновых эффектов на границах раздела фаз.

Вторая модель — Mixture Model Theory (теория модели смеси) — применима при моделировании многоскоростных многофазных потоков с вероятным образованием локальных равновесных областей и моноскоростных сцепленных потоков. В приложении к процессам обогащения она может использоваться при моделировании седиментации, процессов разделения в циклонах, процессов грохочения тонких фракций минеральных частиц, процессов аэрации с низким содержанием газовой фазы. В большей степени Mixture Model Theory адаптирована к физическим системам, где превалируют инертные свойства фаз, а роль межфазных взаимодействий нивелирована.

Третья модель — многофазная модель Эйлера (Eulerian Model Theory), предназначенная для моделирования гетерогенных сред, представленных несколькими взаимодействующими фазами, количество которых может быть ограничено только возможностями исполнительного устройства (компьютер) и требованиями к сходимости результатов расчета.

Для выбора модели, соответствующей исследуемой гетерогенной среде, должны быть установлены режим взаимодействия вещества в потоке, объем и размеры включений (вторичных фаз), характер потока (турбулентный или ламинарный) и число Стокса.

Объем и размеры вторичных фаз характеризуют поток или как разбавленный, или как плотный. Численным критерием “плотности” потока является интегральная объемная доля вторичных фаз. Если она меньше 10 %, то поток считают разбавленным и полагают, что среднее расстояние между частицами вторичных фаз составляет не менее их удвоенного размера и межчастичным взаимодействием можно пренебречь.

Несмотря на сложность явления турбулентности, многообразие и эмпирический характер подходов к ее описанию, при моделировании турбулентности в основном используются две модели, известные как $k-\varepsilon$ стандартная модель [6] и RSM (Reynolds Stress Model — модель напряжений Рейнольдса) [7]. И та и другая напрямую учитывают диссипативные проявления в первичной (основной, несущей) фазе. Однако уравнения этих моделей содержат члены дополнительных условий, учитывающих влияние на турбулизацию потока свойств вторичных фаз. Применимость таких дополнительных условий определяется исходя из следующих ограничений: рассматриваемый поток является разбавленным; отношение плотностей каждой пары фаз, входящих в гетерогенную среду, соизмеримо с единицей.

Число Стокса, учитывающее соотношение временных и пространственных масштабов исследуемой системы и частиц, входящих в состав вторичных фаз, также позволяет осуществить правильный выбор модели. Так, если $Stk < 1$, то полагают, что частицы тесно связаны с потоком, равновесны по отношению к нему; если $Stk > 1$, то полагают, что частицы будут двигаться независимо от поля скоростей потока.

МОДЕЛЬ ПРОЦЕССА ТУРБУЛЕНТНОГО ТЕЧЕНИЯ ПОЛИДИСПЕРСНОЙ СУСПЕНЗИИ В ГИДРОЦИКЛОНЕ ГЦ-360

Компьютерным моделированием исследованы особенности турбулентного течения полидисперсной суспензии в гидроциклоне ГЦ-360, установлены закономерности распределения концентрации частиц различных фракций и полей скоростей.

В качестве объекта моделирования выбран процесс центробежной классификации промпродукта основной магнитной сепарации, реализованный на обогатительной фабрике АО “Олконт”. В соответствии с существующей технологией немагнитная фракция первой стадии магнитной сепарации, содержащая гематит, подвергается классификации в гидроциклоне ГЦ-360, после чего пески гидроциклона направляются в процесс отсадки с применением отсадочных машин диафрагмового типа для получения гематитового концентрата, а слив гидроциклона — в хвосты.

Разработка модели осуществлялась в программной среде ANSYS. Для моделирования движения непрерывных сред “вода–воздух” использована VOF модель совместно с RSM моделью турбулентности потока. Траектории движения дискретных частиц материала рассчитывались при помощи модели DPM (Discrete Phase Model) [8]. В качестве входных данных использовались гранулометрическая и минералогическая характеристики питания гидроциклона, объемный расход воды, подаваемой на операцию классификации, а также нагрузка по питанию. Данные параметры определены в результате опробования гидроциклона ГЦ-360 на обогатительной фабрике. Объемный расход воды, подаваемый на один гидроциклон, составил 29 м³/ч, производительность по питанию 7.8 т/ч. Минеральный состав питания гидроциклона представлен минералами, %: гематит — 10, магнетит — 1, кварц с полевым шпатом — 73–75, амфиболы, слюды — 10–12, прочие (гранат, эпидот, кальцит, единичные зерна сульфидов) — 3–4.

По результатам расчета модели установлены закономерности процесса классификации промпродукта магнитной сепарации в гидроциклоне ГЦ-360. Определены траектории движения жидкости в рабочем объеме гидроциклона, которые соответствуют общепринятым представлениям о том, что в гидроциклоне образуются два вращающихся вихревых потока, один из которых — внешний нисходящий, второй — центральный восходящий [9].

Характерной особенностью работы гидроциклона является образование воздушного столба. Вблизи геометрической оси гидроциклона центробежная сила становится настолько большой, что происходит разрыв жидкости — вокруг оси образуется воздушное ядро (воздушный столб). Численная модель гидроциклона позволила оценить процесс формирования воздушного столба во времени, начинающийся с образования двух воздушных вихрей у сливного и пескового отверстий гидроциклона, которые в дальнейшем продвигаются к центральной части аппарата и, объединяясь, образуют воздушный столб. Этапы развития этого процесса показаны на рис. 1.

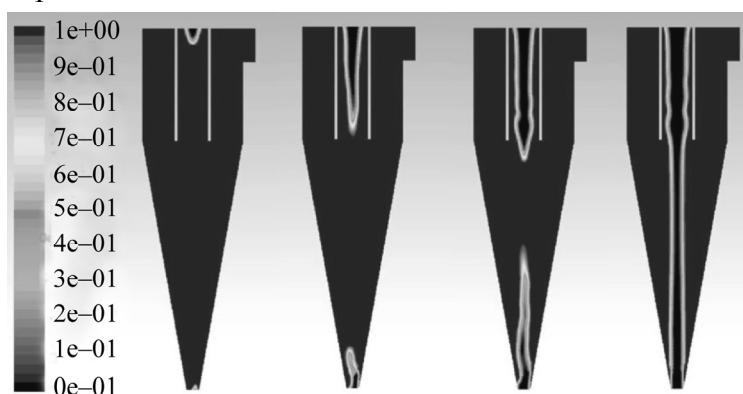


Рис. 1. Объемные концентрации воды в вертикальном сечении расчетного объема модели гидроциклона с момента начала формирования воздушного столба до момента установления течения жидкости в рабочем объеме аппарата

На основе моделирования выполнена оценка распределений тангенциальной, осевой и радиальной составляющих скорости в поперечном сечении рабочего объема гидроциклона ГЦ-360. Качественная картина распределения скоростей (рис. 2) в целом соответствует экспериментальным исследованиям других авторов [10].

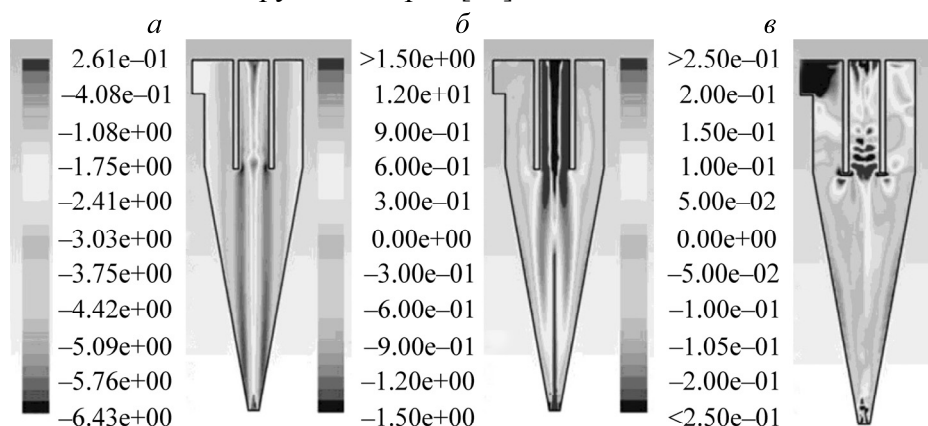


Рис. 2. Распределение тангенциальной (*a*), осевой (*б*) и радиальной (*в*) компонент скорости, м/с, в вертикальном сечении гидроциклона

Для тангенциальной составляющей скорости (рис. 2*a*) выявлено, что ее абсолютное значение увеличивается по мере уменьшения радиуса вращения и во внутреннем потоке может превышать скорость питания. В воздушном столбе значение тангенциальной скорости близко к нулю. Осевые скорости жидкости (рис. 2*б*) плавно и быстро возрастают по мере движения от стенки гидроциклона к центральной части аппарата. Значение осевой скорости изменяется с отрицательно-

го на положительное, переходя через нуль в средней части радиуса гидроциклона. В отношении радиальных скоростей (рис. 2в) имеются весьма противоречивые мнения, однако немногочисленные экспериментальные данные свидетельствуют о том, что в гидроциклоне отсутствует постоянство радиальных скоростей в вертикальных сечениях [11]. Одному и тому же радиусу на разных уровнях по высоте соответствуют различные радиальные скорости.

Разработанная модель гидроциклона позволила определить траектории движения минеральных частиц в расчетном объеме, оценить выход материала в продукты классификации и содержание полезного компонента в них. Наиболее мелкие частицы крупностью < 0.071 мм выносятся восходящим вихрем жидкости в слив, более крупные концентрируются у стенок аппарата и транспортируются нисходящим потоком жидкости в пески. Граничная крупность по данным моделирования приходится на класс крупности -0.071 мм. Выход материала в пески составил 86 % при извлечении около 80 % гематита. Гранулометрические характеристики продуктов классификации, полученные в результате расчета модели и опробования, приведены на рис. 3.

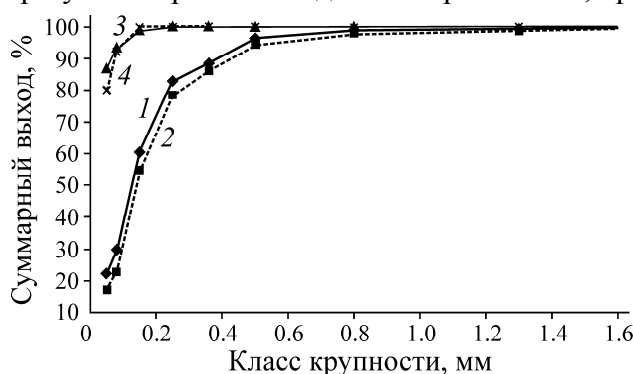


Рис. 3. Гранулометрические характеристики продуктов классификации гидроциклона, полученные в результате расчета модели и опробования: 1 — пески (опробование); 2 — пески (моделирование); 3 — слив (опробование); 4 — слив (моделирование)

Проверка адекватности модели процесса классификации в ГЦ-360 проводилась на основе сравнения данных по выходу частиц различной крупности в продукты классификации, полученные в результате моделирования и опробования гидроциклона на обогатительной фабрике. Абсолютная погрешность рассчитана как модуль разности по соответствующим выходам классов крупности продуктов классификации, которые получены в ходе опробования и моделирования. Значения не превысили 7 %, наибольшее отклонение от экспериментальных данных в классе крупности $-0.1 + 0.071$ мм для песков гидроциклона и в классе -0.071 мм для слива. Эти данные свидетельствуют о соответствии модели процесса классификации промпродукта первой стадии магнитной сепарации в гидроциклоне ГЦ-360 реальному процессу классификации при условиях, созданных на обогатительной фабрике АО «Олкон».

Численное моделирование процесса классификации в гидроциклоне позволило установить закономерности турбулентного течения полидисперсной суспензии: определить траектории движения жидкости и минеральных частиц, исследовать процесс формирования воздушного столба в гидроциклоне, оценить распределение скорости в вертикальном сечении аппарата.

МОДЕЛЬ ПРОЦЕССА ВИНТОВОЙ СЕПАРАЦИИ НА АППАРАТЕ СВ-500

Использование методов вычислительной гидродинамики в процессах обогащения полезных ископаемых позволяет прогнозировать показатели обогащения. С целью оценки возможности использования винтовых сепараторов для разделения промпродукта первой стадии магнитной сепарации обогатительной фабрики АО «Олкон» выполнено численное моделирование процесса винтовой сепарации на аппарате СВ-500.

Разработка модели проводилась в среде ANSYS на моделях VOF, $k-\varepsilon$ модели турбулентности и модели дискретных элементов DPM. Входными данными служили гранулометрический и минералогический составы питания, массовая производительность по питанию и объемный расход воды, которые подобраны в соответствии с рекомендациями завода изготовителя винтового сепаратора.

В результате вычислительного эксперимента получены гидродинамические характеристики потока малой толщины, а также определены траектории движения минеральных частиц в рабочем объеме сепаратора. На рис. 4а показано распределение скорости движения воды на винтовой поверхности, на рис. 4б — распределение частиц по их диаметру в расчетном объеме модели.

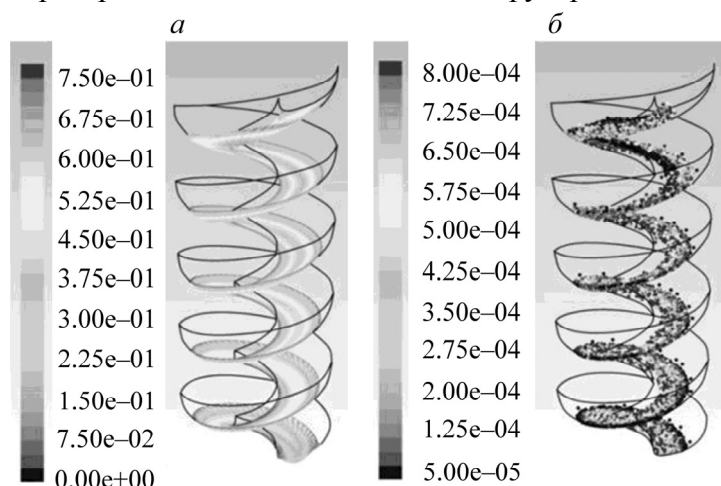


Рис. 4. Распределение скорости движения жидкости на винтовой поверхности сепаратора (а); распределение минеральных частиц по крупности в расчетном объеме модели (б)

Максимальное значение скорости воды достигается в центральной части водного потока, где его толщина максимальна, и составляет 0.6 м/с при расходе воды 0.9 м³/ч. Наиболее крупные частицы концентрируются у внутреннего борта аппарата, мелкие выносятся центробежными силами к внешнему борту (рис. 4б). Частицы гематита имеют тенденцию скапливаться в зоне выхода концентрата.

На основе разработанной модели получены прогнозные показатели обогащения промпродукта основной магнитной сепарации на винтовом сепараторе (табл. 1). С целью оценки адекватности разработанной модели проведен технологический опыт по разделению исходного материала на винтовом сепараторе СВ-500, результаты данного эксперимента также приведены в табл. 1. Условия опыта совпадали с условиями вычислительного эксперимента. Сравнение значений выхода материала в продукты обогащения и содержания гематита в них с данными моделирования позволили оценить адекватность разработанной модели: абсолютная погрешность по выходу материала в продукты обогащения не превысила 6 %, а по содержанию гематита в них — 4 %, что свидетельствует о соответствии модели реальному процессу разделения при заданном режиме работы аппарата.

По данным моделирования можно судить о перспективности использования винтовых сепараторов при получении гематитового концентрата на Оленегорском ГОКе. Использование диафрагмовых отсадочных машин на обогатительной фабрике в ряде случаев не позволяет получать качественный гематитовый концентрат: по результатам опробований извлечение гематита в концентрат отсадки колеблется в довольно широком диапазоне от 5 до 67 %, усредненное значение составило 30 %.

ТАБЛИЦА 1. Показатели обогащения промпродукта основной магнитной сепарации на винтовом сепараторе, полученные в результате вычислительного эксперимента и технологического опыта

Продукт	Выход, %	Содержание гематита, %	Извлечение гематита, %
Вычислительный эксперимент			
Концентрат	5.2	70.1	36.5
Промпродукт	24.9	17.3	43.2
Хвосты	69.9	2.9	20.3
Итого	100.0	10.0	100.0
Технологический опыт			
Концентрат	6.1	66.4	38.7
Промпродукт	30.0	17.0	48.8
Хвосты	63.9	2.0	12.5
Итого	100.0	10.5	100.0

Содержание гематитового железа в концентрате отсадки также колеблется от 4 до 44 % в зависимости от типа руд, поступающих на переработку. Результаты моделирования технологического эксперимента показывают преимущество винтового сепаратора по сравнению с отсадочными машинами. Для подтверждения данного вывода необходимы дальнейшие опытно-промышленные испытания по обогащению гематитсодержащего промпродукта на винтовом сепараторе в условиях обогатительной фабрики на различных видах рудного сырья.

МОДЕЛЬ МГ-СЕПАРАТОРА ДЛЯ ДООЧИСТКИ ЧЕРНОВОГО МАГНЕТИТОВОГО КОНЦЕНТРАТА

Перспективным направлением переработки черновых магнетитовых концентратов является магнитно-гравитационная сепарация (МГ-сепарация). Сущность ее заключается в разделении ферромагнитных частиц по крупности, плотности и магнитной восприимчивости в центробежно-восходящем закрученном потоке жидкости с наложением вертикального слабонеоднородного постоянного магнитного поля [12]. В восходящем потоке воды образуется оживленный слой частиц исходной суспензии, отличающихся крупностью, формой и содержанием полезного компонента — магнетита, что приводит к распределению их по крупности, плотности и магнитной восприимчивости. В оживленных слоях твердые частицы хаотически движутся и интенсивно перемешиваются, что ухудшает их сегрегацию и снижает селективность разделения. При наложении вертикально ориентированного постоянного магнитного поля ферромагнитные частицы оживленного слоя формируют вертикально ориентированные цепочки — ферромагнитные агрегаты, замораживающие хаотическое движение частиц слоя. В состав ферромагнитных агрегатов входят частицы, для которых сила взаимодействия магнитных моментов частиц превышает силу их гидродинамического сопротивления.

Высота магнитно-стабилизированного оживленного слоя частиц суспензии зависит от разности массопотоков подачи исходной суспензии, промывной воды, слива и концентрата сепаратора. Частицы, вошедшие в состав ферромагнитных агрегатов, выводятся в концентрат сепаратора, остальные уходят в слив.

Магнитно-гравитационная сепарация имеет три управляющих параметра: напряженность магнитного поля, скорость восходящего потока воды и скорость ее вращения. Скорость вращения воды изменяет отклонение ферромагнитных агрегатов от вертикального направления и регулирует силу магнитного межчастичного взаимодействия.

Для оптимизации конструкции МГ-сепаратора в программном комплексе ANSYS Fluent создан виртуальный лабораторный стенд, позволяющий получать значения его гидродинамических и технологических параметров. Конструкция МГ-сепаратора состоит из цилиндроконического корпуса со сливным устройством и патрубком выхода концентрата (рис. 5). В корпус аппарата помещается устройство, сочетающее функции подачи исходной суспензии, подачи промывной воды и ее закручивания. Снаружи корпус окружает электромагнитный соленоид, создающий вертикально направленное слабонеоднородное магнитное поле [13].

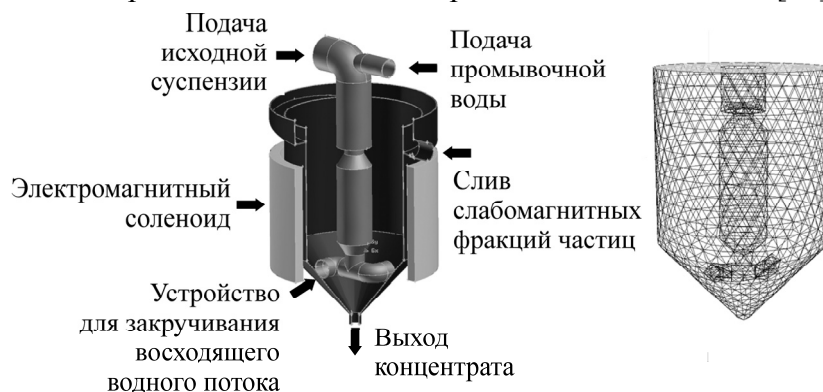


Рис. 5. Геометрия модели МГ-сепаратора и расчетная сетка модели

В лабораторном стенде предусмотрена возможность регулирования скорости подачи исходной суспензии и промывной воды и выпуска концентрата сепаратора. Геометрия модели аппарата и ее расчетная сетка, состоящая из 730000 ячеек, разработана в программе Gambit комплекса ANSYS. Для виртуального стенда разработана модель исходного питания (табл. 2). За основу модели взят черновой магнетитовый концентрат обогатительной фабрики с содержанием 67.84 % железа общего. В состав исходного питания помимо магнетитовых частиц входят сродки магнетита со слабомagnetными минералами различной плотности и крупности, а также шламистые частицы магнетита и немагнитного минерала крупностью $0.15 \cdot 10^{-4}$ м. Всего сформировано 16 различных фракций частиц. Расход исходного питания 0.5 кг/с или 1800 кг/ч.

ТАБЛИЦА 2. Вещественный состав питания и продуктов магнитной сепарации железистых кварцитов

Крупность фракции частиц, 10^{-4} , м	Массовое содержание магнетита, %	Плотность частиц фракции, кг/м ³	Массовая доля фракции в исходном питании
1.20	100	5100	0.157
	90	4855	0.018
	80	4610	0.014
	70	4365	0.010
	30	3385	0.002
	20	3140	0.004
	10	2895	0.006
0.85	100	5100	0.158
	20	3140	0.004
	10	2895	0.014
0.60	100	5100	0.195
	10	2895	0.010
0.40	100	5100	0.190
	10	2895	0.010
0.15	100	5100	0.198
	0	2650	0.006

Анализ результатов моделирования процесса разделения компонентов исходной суспензии на виртуальном стенде позволил получить технологические характеристики данной конструкции МГ-сепаратора. Общая масса твердых частиц ожиженного слоя составляет 3623.6 кг. В табл. 2 приведены также массы отдельных фракций в объеме модели аппарата и их массовое содержание. Концентрат МГ-сепаратора содержит 70.6 % железа общего.

Вычислительные эксперименты на виртуальном стенде позволили исследовать гидродинамику многокомпонентной суспензии и процессы разделения, происходящие в корпусе аппарата. На рис. 6 представлено распределение объемных концентраций жидкой и твердой фаз суспензии на вертикальном срезе аппарата. Видно, что твердые частицы образуют слой с ярко выраженной границей раздела. Поверхность магнитно-стабилизированного слоя частиц совершает гравитационные колебания.

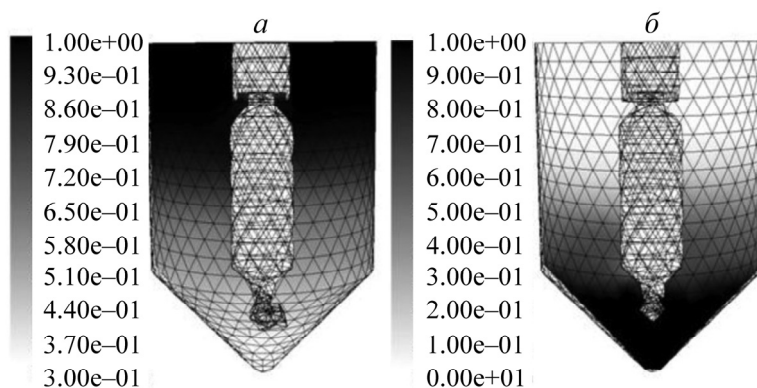


Рис. 6. Распределение объемных фракций воды и твердых частиц фракции $1.2 \cdot 10^{-4}$ м с содержанием железа общего 72.4 %

Магнитно-гравитационная сепарация является перспективным процессом, селективно разделяющим компоненты ферромагнитных суспензий с близкими магнитными и гидродинамическими свойствами, что позволяет использовать ее для регулирования качества концентрата, дообогащения черного магнетитового концентрата и получения продуктов, пригодных для внедоменного получения стали [14].

МОДЕЛЬ ФЛОТАЦИИ ХВОСТОВ АПАТИТОВОГО ПРОИЗВОДСТВА ПРИ ПОЛУЧЕНИИ НЕФЕЛИНОВОГО КОНЦЕНТРАТА

Твердая фаза питания флотации представлена совокупностью мономинеральных и полиминеральных частиц, обладающих различными физическими и физико-химическими свойствами, значения которых имеют непрерывное распределение. Проведение вычислительного эксперимента над моделью гетерогенной среды процесса флотации (ГСПФ) требует определения конечного числа твердых дисперсных (вторичных) фаз с конечными значениями свойств частиц, их составляющих. Для решения этой проблемы разработан метод инициализации узких сепарационных фракций питания флотации, позволяющий определять интегральные значения свойств компонентов твердой фазы флотационной пульпы, интерпретируемые как условия однозначности математической модели процесса флотации. Метод основывается на результатах гранулометрического и минералогического анализов, а также анализа сростковых фаз (форм) питания моделируемого процесса (фазовый анализ) [15].

В методе учтены распределение минеральных частиц по крупности, минеральный состав, степень раскрытия сростков полезного минерала, содержание полезного компонента, оценка поверхностной энергии мономинеральных и полиминеральных частиц. Метод обеспечивает

получение результатов математического моделирования флотации в значениях содержания и извлечения полезного компонента и верификацию математической модели по технологической схеме реального производства или лабораторного эксперимента.

Вычислительный эксперимент над моделью ГСПФ хвостов апатитового производства при получении нефелинового концентрата демонстрирует возможности компьютерного моделирования процесса флотации в программном комплексе ANSYS Fluent на основе разработанного метода инициализации узких сепарационных фракций.

При подготовке и проведении эксперимента решались следующие задачи: построение геометрического образа рабочего объема камеры флотационной пневмомеханической машины ОК-38 и расчетной сетки модели в сеточном генераторе Gambit; отбор пробы питания флотации и инициализация узких сепарационных фракций; изучение баланса потоков основной нефелиновой флотации и расчет базовых качественно-количественных показателей CFD модели ГСПФ в первой камере технологической цепочки процесса; постановка и проведение вычислительного эксперимента; обработка полученной в ходе эксперимента числовой и графической информации.

В основной нефелиновой флотации полезный компонент извлекается в камерный продукт, в пенный продукт извлекаются апатит и темноцветные минералы. Эта операция на АНОФ-2 ОАО “Апатит” осуществляется в двухкамерных флотационных машинах ОК-38 производства компании Outokumpu (Финляндия), соединенных по три в две параллельные технологические линии, расположенные на спадающих по ходу пульпы уровнях. Геометрический образ рабочего объема камеры флотационной пневмомеханической машины ОК-38 создан в сеточном генераторе Gambit и включает в себя область пульпы до нижнего уровня захвата пеносъемных механизмов, области пульпы в зонах люков загрузки питания и выгрузки камерного продукта, область импеллера и область статора (рис. 7).

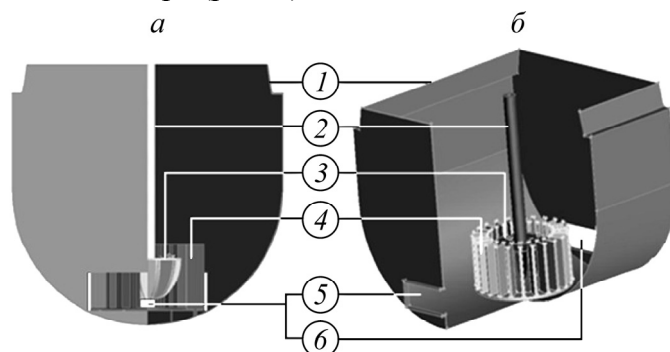


Рис. 7. Конструктивные элементы камеры флотационной машины ОК-38: а — фронтальная проекция; б — изометрическая проекция: 1 — камера; 2 — вал импеллера; 3 — импеллер; 4 — статор; 5 — люк загрузки пульпы; 6 — люк выгрузки камерного продукта

Емкость расчетной сетки модели для подвижной области импеллера 99 109 ячеек, для неподвижной области статора и камеры 397 166 ячеек. В обоих случаях ячейки имеют тетрагональную форму. Подвижная и неподвижная области расчетной сетки имеют общую внутреннюю “стенку”, состоящую из мнимых граничных поверхностей, не препятствующих движению потоков массы и распределению количества движения и энергии. Это позволяет эмулировать вращение области импеллера, которая воспринимается ANSYS Fluent как замкнутая область ячеек сетки, избегая пространственного перекрытия и деформации расчетной сетки. Изображение осевой проекции элементов расчетной сетки модели показано в виде скриншота интерфейса сеточного генератора Gambit (рис. 8).

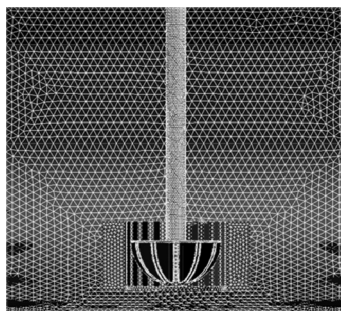


Рис. 8. Осевая проекция элементов расчетной сетки модели

Точкой отбора пробы явился операционный перелив коллектора магнитной сепарации хвостов апатитовой флотации на АНОФ-2 ОАО “Апатит”, прошедших двухстадиальную классификацию. В табл. 3 приведен гранулометрический и минеральный состав пробы и массовый минерально-фазовый состав нефелина в пробе [16].

ТАБЛИЦА 3. Состав пробы питания

Минерал пробы	Класс (мм) / выход (мас. доля)					Итого
	–0.315+0.2	–0.2+0.16	–0.16+0.1	–0.1+0.071	–0.071	
	0.0998	0.1193	0.3072	0.1758	0.2979	
Гранулометрический и минеральный						
Нефелин	0.730	0.730	0.665	0.590	0.520	0.6229
рЭгирин	0.050	0.080	0.164	0.212	0.267	0.1817
П/шпат	0.160	0.131	0.094	0.090	0.065	0.0957
Сфен	0.002	0.006	0.025	0.028	0.035	0.0239
Апатит	0.024	0.020	0.011	0.009	0.011	0.0130
Слюды	0.010	0.008	0.013	0.020	0.025	0.0169
Гидрослюды	0.007	0.010	0.009	0.011	0.013	0.0105
Ильменит	0.000	0.002	0.005	0.015	0.020	0.0104
Лампрофиллит	0.004	0.002	0.003	0.012	0.017	0.0087
Цеолиты	0.008	0.005	0.005	0.004	0.010	0.0066
Титаномагнетит	0.000	0.000	0.001	0.003	0.011	0.0041
Fe гидроокислы	0.005	0.006	0.004	0.003	0.003	0.0039
Энигматит	0.000	0.000	0.001	0.003	0.003	0.0017
Итого	1.000	1.000	1.000	1.000	1.000	1.0000
Минерально-фазовый состав нефелина						
$0 < x < 5$	0.577	0.606	0.612	0.555	0.515	0.5689
$5 < x < 25$	0.101	0.076	0.030	0.022	0.003	0.0331
$25 < x < 55$	0.038	0.039	0.017	0.013	0.002	0.0165
$55 < x < 75$	0.007	0.006	0.003	0.000	0.000	0.0023
$75 < x < 100$	0.007	0.003	0.003	0.000	0.000	0.0020
Итого	0.730	0.730	0.665	0.590	0.520	0.6229

*x — массовая доля включения в сродок с нефелином других минералов пробы

В основу расчета объемных характеристик модели положена технологическая схема получения нефелинового концентрата в ОАО “Апатит”. Фрагмент схемы в пересчете на операцию основной нефелиновой флотации приведен на рис. 9.

ММС в слабом поле				Условные обозначения			
100	0.65	215.3	333.7	$\gamma, \%$	$\beta \text{ P}_2\text{O}_5, \%$	$Q, \text{ т/ч}$	$W, \text{ м}^3/\text{ч}$
23.7				$\beta \text{ Al}_2\text{O}_3, \%$	$\varepsilon \text{ P}_2\text{O}_5, \%$	$\% \text{ тв.}$	$V, \text{ м}^3/\text{ч}$
100	100	39.22	431.6	$\varepsilon \text{ Al}_2\text{O}_3, \%$			
Немагнитный продукт							
Основная нефелиновая флотация							
52.00	0.38	112.0	92.7	48.00	0.94	103.3	241.0
28.38				17.31			
64.00	30.61	54.71	153.7	36.00	69.39	30.09	277.9
Камерный продукт				Пенный продукт			

Рис. 9. Качественно-количественные показатели основной нефелиновой флотации в ОАО “Апатит” по технологической схеме производства

Исходя из количества (двухкамерных) флотационных машин ОК-38 в технологической цепочке основной нефелиновой флотации на АНОФ-2, количество которых (z) равно шести, рассчитано соотношение полных объемных выходов для каждой камеры. Коэффициенты учета интенсивности флотации вычислены для жидкой и твердой фаз:

$$k_{\text{water}} = 1 - \sqrt[3]{\frac{W_1}{W_2}} = 1 - \sqrt[3]{\frac{92.7}{333.7}} = 0.192231,$$

$$k_{\text{solid}} = 1 - \sqrt[3]{\frac{V_1 - W_1}{V_2 - W_2}} = 1 - \sqrt[3]{\frac{61}{97.9}} = 0.075817,$$

где W_1 , W_2 — расход воды в камерный продукт и в поток питания флотации; V_1 , V_2 — расход пульпы в камерный продукт и в поток питания флотации.

Коэффициенты учета интенсивности потоков жидкой и твердой фазы определяют камерную развертку баланса их объемных расходов, учитывающую последовательный отвод хвостов с пенным продуктом. Для первой камеры соответственно имеем:

$$W_3 = k_{\text{water}} W_2 = 0.192231 \cdot 333.7 = 64.147 \text{ м}^3 / \text{ч},$$

где W_3 — расход воды в пенный продукт,

$$W_1 = W_2 - W_3 = 333.7 - 64.147 = 269.6 \text{ м}^3 / \text{ч}.$$

Рассчитанные значения расходов жидкой и твердой фаз и пересчет содержания и извлечения Al_2O_3 и P_2O_5 по фактическому вещественному составу пробы позволили получить базовые показатели для верификации результатов вычислительного эксперимента над моделью флотации хвостов апатитового производства нефелинового концентрата в рабочей (первой) камере флотационной машины ОК-38 (рис. 10).

Поток питания CFD модели ГСПФ				Условные обозначения			
100	0.55	215.3	333.7	$\gamma, \%$	$\beta \text{ P}_2\text{O}_5, \%$	$Q, \text{ т/ч}$	$W, \text{ м}^3/\text{ч}$
23.69				$\beta \text{ Al}_2\text{O}_3, \%$	$\varepsilon \text{ P}_2\text{O}_5, \%$	$\% \text{ тв.}$	$V, \text{ м}^3/\text{ч}$
100	100	39.22	431.6	$\varepsilon \text{ Al}_2\text{O}_3, \%$			
CFD модель ГСПФ в первой рабочей камере ОК-38							
89.61	0.52	192.9	269.6	10.39	0.83	22.4	64.1
24.44				17.29			
92.42	84.31	41.72	360.0	7.58	15.69	25.86	71.6
Поток камерного продукта CFD модели				Поток пенного продукта CFD модели			

Рис. 10. Базовые показатели для верификации результатов вычислительного эксперимента

В эксперименте определялись потоки масс узких сепарационных фракций через поверхности ввода питания и выходов камерного и пенного продуктов и их объемное распределение в расчетной области. В результате получены поля магнитуды скоростей пульпы (рис. 11), что позволило выявить в объеме камеры зоны гидродинамической активности, характеризующиеся образованием локальных турбулентных потоков, снижающих вероятность элементарных актов флотации, а также зоны, где гидродинамическая активность низка, что способствует образованию застойных областей с пониженной концентрацией газовой фазы.

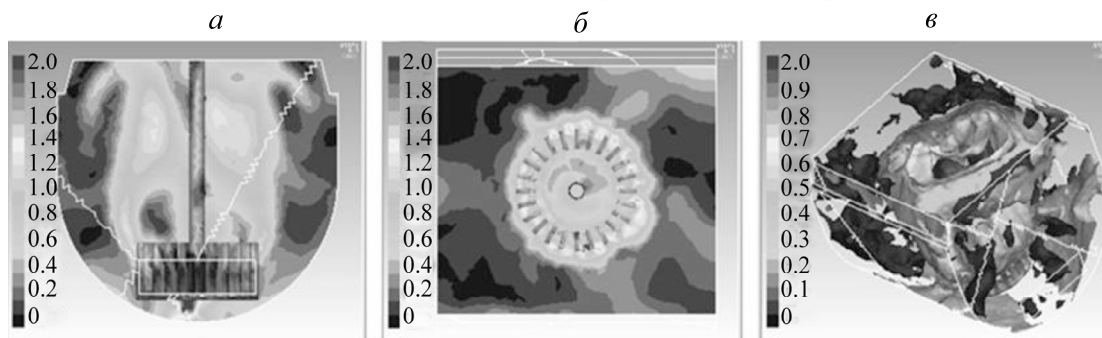


Рис. 11. Вертикальная осевая проекция магнитуды скорости пульпы (а); горизонтальная проекция магнитуды скорости пульпы в плоскости верхнего основания импеллера (б); изоповерхности магнитуды скорости в объеме камеры (в)

Получены индикаторные распределения концентрации узких сепарационных фракций, в которых индикатором распределения является их объемная доля в потоке питания (рис. 12). Данное распределение позволяет оценить характер положения фракции в объеме камеры по сравнению с распределением в питании моделируемого процесса, что выявляет тенденцию заполнения фракцией рабочего объема камеры.

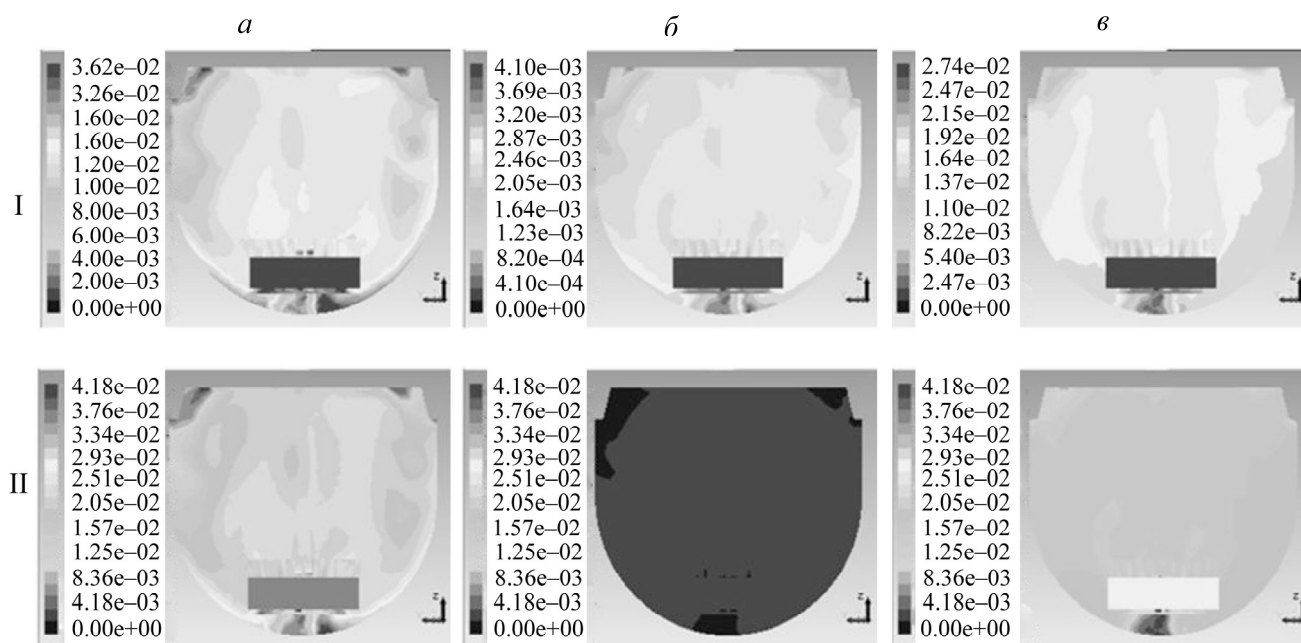


Рис. 12. Индикаторные (I) и средневзвешенные (II) распределения концентраций различных УСФ: а — фракция крупности 0.243 мм, плотность 2649 кг/м³, содержание Al₂O₃ 32.90 %; б — фракция крупности 0.155 мм, плотность 2815 кг/м³, содержание Al₂O₃ 23.08 %; в — фракция крупности 0.155 мм, плотность 3201 кг/м³, содержание Al₂O₃ 5.54 %

Для средневзвешенных распределений концентрации узких сепарационных фракций центр распределения определен как среднее арифметическое объемных долей твердых фаз модели. Средневзвешенное распределение позволяет установить качественную и количественную прогнозные оценки формирования камерного и пенного продуктов.

В табл. 4 приведены значения технологических показателей моделируемого процесса, полученные в результате выполнения вычислительного эксперимента. Столбцы “расчет” содержат значения показателей, соответствующие базовым (рис. 10), а столбцы “результат” — значения вычислительного эксперимента. Использование разработанного метода инициализации узких сепарационных фракций при проведении вычислительного эксперимента над моделью ГСПФ позволило сформулировать условия однозначности с учетом физических и физико-химических свойств компонентов твердой фазы питания флотации.

ТАБЛИЦА 4. Технические показатели моделируемого процесса, %

Параметр	Камерный продукт модели, %		Пенный продукт модели, %	
	Расчет	Результат	Расчет	Результат
Выход, γ	89.61	92.33	10.39	7.67
$\beta_{\text{кам}}$	24.44	24.72	0.52	0.52
$\varepsilon_{\text{кам}}$	92.42	96.36	84.31	88.06
$\beta_{\text{пен}}$	17.29	11.23	0.83	0.86
$\varepsilon_{\text{пен}}$	7.58	3.64	15.69	11.94

Примечание. $\beta_{\text{кам}}$ — содержание полезного компонента в камерном продукте; $\varepsilon_{\text{кам}}$ — извлечение полезного компонента в камерный продукт; $\beta_{\text{пен}}$ — содержание полезного компонента в пенный продукт; $\varepsilon_{\text{пен}}$ — извлечение полезного компонента в пенный продукт.

Важным преимуществом метода является возможность учета процессов, происходящих на границах раздела фаз, для всех фракций, обладающих различными инертными и поверхностными свойствами. Разброс значений базовых показателей для верификации результатов вычислительного эксперимента и показателей флотации, полученных в ходе вычислительного эксперимента, дает возможность прогнозировать технологические показатели флотации в вычислительных экспериментах на основе аппарата вычислительной гидродинамики и инициализации узких сепарационных фракций питания флотации при заданных, типе и производительности оборудования.

ВЫВОДЫ

Применение компьютерного моделирования гидродинамики многофазных сред позволяет выявить закономерности распределения концентраций и скоростей их компонентов в рабочих объемах обогатительных машин и аппаратов, обеспечивает прогноз технологических показателей распределения минералов при заданных питании, типе и производительности оборудования.

Благодаря использованию в вычислительном эксперименте ANSYS Fluent получены интегрально-дифференциальные оценки физических и статистических параметров фаз сред различных обогатительных процессов в любой их области в каждый момент времени как в графическом, так и в числовом виде.

Проведение вычислительных экспериментов для исследования сепарационных процессов дало возможность избежать установки измерительных приборов и датчиков в рабочих объемах обогатительного оборудования, получать данные о процессах, минимизировав необходимые для проведения подобного натурного эксперимента материальные и временные ресурсы.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Самарский А. А., Михайлов А. П. Математическое моделирование: Идеи. Методы. Примеры. — М.: Физматлит, 2001. — 320 с.
2. Нигматулин Р. И. Динамика многофазных сред. Ч. 1. — М.: Наука, 1987. — 464 с.
3. ANSYS Fluent “Theory Guide”, Release 12.1 ANSYS, Inc. 2009.
4. Hirt C. W. and Nichols B. D. Volume of fluid (VOF) method for the dynamics of free boundaries, J. of Computational Physics, 1981, Vol. 39, No. 1. — P. 201–225.
5. Juel A. and Talib E. Oscillatory Kelvin-Helmholtz instability with large viscosity contrast, Manchester Centre for Nonlinear Dynamics and School of Mathematics, University of Manchester, M13 9PL Manchester, 2011. — 30 p.
6. Launder B. E. and Spalding D. B. Lectures in mathematical models of turbulence, Academic Press, London, England, 1972.
7. Bengt Andersson, Ronnie Andersson. Computational fluid dynamics for engineers, Cambridge University Press, NY, 2012. — P. 97.
8. Cundall P. A. A discrete numerical model for granular assemblies, Géotechnique, 1979, Vol. 29, No. 1. — P. 47–65.
9. Справочник по обогащению руд. Подготовительные процессы. — М.: Недра, 1982. — 366 с.
10. Поваров А. И. Гидроциклоны на обогатительных фабриках. — М.: Недра, 1978. — 232 с.
11. Лопатин А. Г. Центробежное обогащение руд и песков. — М.: Недра, 1987. — 224 с.
12. Опалев А. С., Бирюков В. В., Новикова И. В. Закономерности формирования магнитостабилизированного ожиженного слоя в рабочем объеме магнитно-гравитационного сепаратора // ГИАБ. — 2015. — № 10. — С. 118–122.
13. Опалев А. С., Бирюков В. В. Совершенствование конструкции магнитно-гравитационного сепаратора с использованием математического моделирования процесса разделения минералов в ферромагнитной суспензии для повышения глубины обогащения железистых кварцитов // Экологическая стратегия развития горнодобывающей отрасли — формирование нового мировоззрения в освоении природных ресурсов: сб. докл. Всерос. науч.-техн. конф. с участием иностранных специалистов, Апатиты, 13–15 октября 2014 г. — СПб.: Реноме, 2014. — С. 303–313.
14. Opalev A., Biryukov V., Khokhulya M., Shcherbakov A. Substantiation of energy-saving technology for ferruginous quartzites processing using magnetic-gravity processing methods, Int. Multidisciplinary Scientific GeoConference SGEM, 2017, Vol. 17, No. 11. — P. 1089–1096.
15. Скороходов В. Ф., Никитин Р. М., Степанникова А. С. Инициализация узких сепарационных фракций при проведении вычислительного эксперимента над моделью гетерогенной системы процесса флотации // Современные процессы комплексной и глубокой переработки труднообогатимого минерального сырья (Плаксинские чтения 2015): Материалы междунар. совещания. — Иркутск: ООО “ПЦ РИЭЛ”, 2015. — С. 258–261.
16. Скороходов В. Ф., Никитин Р. М., Рухленко Е. Д., Веселова Е. Г. Оценка флотационных свойств компонентов пробы питания основной нефелиновой флотации для вычислительного эксперимента. // Вестн. КНЦ РАН. — 2013 — № 2. — С. 79–91.

Поступила в редакцию 09/XI 2018

После доработки 09/XI 2018

Принята к публикации 26/III 2019