

УДК 622.7:519.711.2

**В.Ф. Скороходов, Р.М. Никитин, В.П. Якушкин**

## **МОДЕЛИРОВАНИЕ ПРОЦЕССА ФЛОТАЦИИ С ПРИМЕНЕНИЕМ СИСТЕМ ИНЖЕНЕРНОГО АНАЛИЗА\***

*Рассмотрена возможность использования компьютерного моделирования процесса флотации. Предложен метод учета взаимодействия жидкой, газовой и твердых гидрофильных и гидрофобных фаз при моделировании разделения минералов флотацией. Создана компьютерная модель флотационной машины, используемой при получении нефелинового концентрата.*

*Ключевые слова: компьютерное моделирование, флотация, гидродинамика фаз гетерогенной системы, поверхностная энергия, многоскоростной многофазный континуум, CFD-метод.*

**К**омплексное использование перерабатываемых в ОАО «Апатит» апатит-нефелиновых руд – важнейшая задача с точек зрения повышения уровня технологии, экономики предприятия и охраны окружающей среды [1]. Необходимость решения этой задачи обусловлена интенсивным наполнением хвостохранилищ этого предприятия, ростом потребления минеральных концентратов, уменьшением содержания  $P_2O_5$  в апатит-нефелиновых рудах месторождений Хибинского массива.

Технология переработки апатит-нефелиновых руд включает два основных последовательных процесса: первый – получение апатитового концентрата, второй – получение нефелинового концентрата. Апатитовый концентрат на предприятиях ОАО «Апатит» получают методом прямой флотации с использованием флотационных машин колонного и пневмомеханического типов. Хвосты апатитовой флотации, содержащие нефелин и другие минералы, такие как апатит, сфен, эгирин, титаномагне-

тит, полевой шпат, являются исходным сырьем для выделения нефелинового концентрата. Промежуточными стадиями между флотацией апатита и основной обратной флотацией нефелина являются классификация и магнитная сепарация. На этих стадиях из исходного материала отделяют титаномагнетит и плохо флотируемые при существующей технологии классы крупности минералов питания нефелиновой флотации.

В основной нефелиновой флотации полезный компонент извлекается в камерный продукт, а в пенный продукт извлекаются апатит и темноцветные минералы. Эта операция осуществляется в двухкамерных флотационных машинах ОК-38 производства компании Outokumpu (Финляндия), соединенных по три в две параллельные технологические линии, расположенные на спадающих уровнях по ходу пульпы. Эксплуатационные характеристики камеры флотационной машины ОК-38 приведены в табл. 1.

Основная флотация при получении нефелинового концентрата имеет

\* Работа выполнена при финансовой поддержке Министерства образования и науки Российской Федерации. Госконтракт № 16.515.16.5038.

Таблица 1

**Эксплуатационные характеристики камеры флотационной машины ОК-38, используемой в производстве нефелинового концентрата**

Эксплуатационная характеристика	Единицы	Значение
Эффективная емкость камеры	м <sup>3</sup>	38,1
Диаметр импеллера	м	0,9
Скорость вращения импеллера	об/мин	150
Потребляемая мощность	кВт	30ч40
Давление подачи воздуха	бар	4,8
Расход воздуха через механизм импеллера	м <sup>3</sup> /мин	10ч20
Размеры одной оснащенной камеры	м	
длина		3,60
ширина		4,92
высота		6,32
высота до уровня съема пены		3,20
Расход пульпы питания	м <sup>3</sup> /час	431,6
Содержание твердого на входе пульпы питания	%	
массовое		39,21
объемное		22,68
Выход пенного продукта	%	64,39
Выход камерного продукта	%	35,61

значительный потенциал повышения показателей обогащения. Их анализ наглядно демонстрирует, что операционные потери извлечения твердого, содержащего  $Al_2O_3$ , с пенным продуктом составляют порядка 36 %.

В предшествующих работах, связанных с оптимизацией и модернизацией технологии получения нефелинового концентрата, выделяются такие направления как использование магнитной сепарации в полях низкой и высокой напряженности, применение прямой флотации нефелина катионным собирателем, оценка влияния на качество конечной продукции технологических факторов [2]. Одним из перспективных направлений повышения эффективности и интенсификации флотации нефелина является применение реагентов собирателей в виде активированных водных дисперсий воздуха (АВДВ).

Малоизученными особенностями технологии получения нефелинового

концентрата являются гидродинамика отдельных компонентов минерального состава пульпы и дисперсной газовой фазы в камере флотационной машины, а также особенности физико-химических процессов, происходящих на границах раздела жидкой, газовой и твердых фаз. Для сокращения сроков и себестоимости такого рода исследований, и изучения технологических процессов флотации без непосредственного приборного вмешательства, вносящего в результаты исследований значительные погрешности и неточности, с успехом могут применяться комплексы современных инженерных вычислительных систем. К их числу относятся CAD/CAM/CAE – системы (системы автоматизированного проектирования, технологической подготовки производства и инженерного анализа), способные достаточно эффективно выявлять качественные и количественные оценки параметров различных технологиче-

ских процессов. Элементами данных систем являются:

- CAD (Computer Aided Design) – инструментальный комплекс интегрированных программных средств, предназначенный для автоматизированного проектирования геометрического образа объекта исследования и используемый в качестве компьютерной поддержки при формировании конструкторского проекта;

- CAM (Computer Aided Manufacturing) – комплекс автоматизации технологической подготовки производства, включающий средства технологической подготовки к производству опытных и серийных образцов оборудования и обеспечивающий автоматизацию программирования и управления в процессе их изготовления;

- CAE (Computer Aided Engineering) – комплекс интегрированных программных средств автоматизированного инженерного анализа, предназначенный для анализа и инверсионного моделирования физических процессов.

Использование компьютерных технологий моделирования физических и физико-химических процессов как инструмента инженерного анализа при исследовании флотации, сегодня столь же востребовано, как и проведение непосредственных измерений величин, характеризующих свойства поверхностей взаимодействующих фаз, и лабораторных экспериментов по флотационному разделению минералов [3].

Объединение в одной работе представлений о гидродинамике компонентов аэрированной пульпы в камере флотационной машины ОК-38 и физико-химических процессах на границах взаимодействующих при флотации фаз с объектно-ориентированным конечно-элементным моделированием стационарной технологической макро-

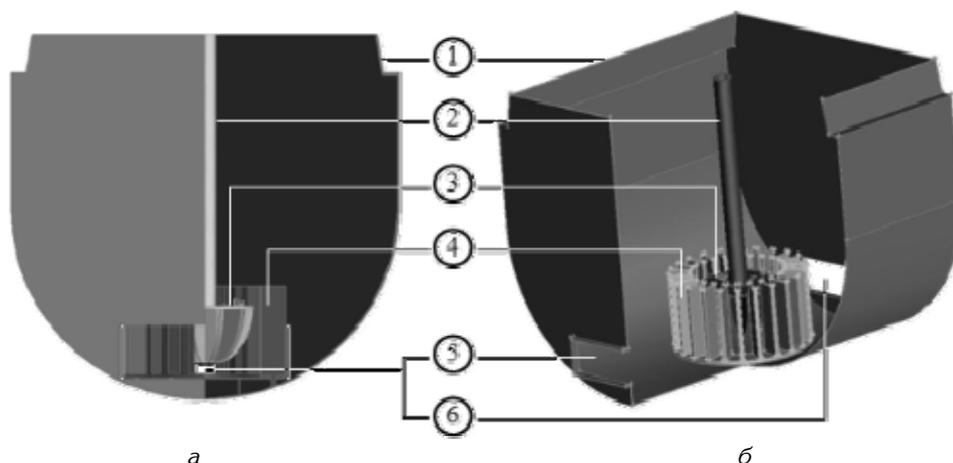
системы, – одно из направлений проводимых авторами исследований. Актуальность выбранного направления состоит в возможности, с одной стороны, изучения, описания и прогнозирования процессов разделения минералов при получении нефелинового концентрата с использованием CAD/CAM/CAE – систем, а с другой стороны, создания надежного инструмента для прототипирования<sup>1</sup> новых перспективных конструкций флотационного оборудования.

### **Компьютерное моделирование гидродинамики компонентов аэрированной пульпы и физико-химических процессов на границах взаимодействующих фаз при обратной флотации нефелина во флотационной машине ОК-38**

Флотация представляет собой сложно формализуемый, с точки зрения физико-математических и вероятностных закономерностей процесс, в основе которого лежат множественные взаимодействия фаз гетерогенной системы, происходящие на пространственном микро-уровне [4]. Акт каждого такого взаимодействия локализован в определенном интервале времени, а событийность его носит вероятностный характер. Одной из причин, вызывающих пространственно-временную нестабильность образования флотокомплексов, является возникновение и рассеяние локальных областей турбулизации пульпы. Таким образом, результат флотации зависит от степени противодей-

---

<sup>1</sup> Прототипирование — быстрая (черновая) реализация базовой функциональности для анализа работы системы в целом. После этапа прототипирования следуют этапы пересмотра конструкции, детализовки, реализации и тестирования системы.



**Рис. 1. Конструктивные элементы компьютерной модели 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

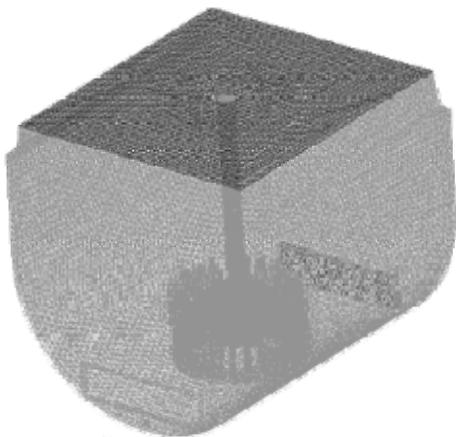
ствия двух тенденций, эволюционирующих в технологическом объеме флотационной машины. Первая, — это макропроцессы формирования высоко градиентных полей скоростей и концентраций компонентов гетерогенной системы. Вторая, — это интенсивность и характер взаимодействия поверхностей флотируемых частиц с жидкой и газообразной фазами.

В контексте современной гидродинамики процессы, происходящие при флотации, могут рассматриваться на основе представлений о многоскоростном многофазном континууме (ММК) [5], представляющем собой совокупность множества континуумов, каждый из которых относится к своей фазе и заполняет один и тот же объем, занятый пульпой в камере флотационной машины. Движение каждой из фаз по отношению к другим фазам характеризуется в ММК как взаимопроницающее, а для каждого составляющего континуума в каждой точке пространства обычным образом определяется приведенная плотность, концентрация, скорость и другие па-

раметры, относящиеся к своему континууму и своей фазе.

Модель ММК в камере флотационной машины ОК-38 создана в программной среде ANSYS Fluent с использованием в качестве сеточного генератора программы Gambit. Основной задачей создания геометрического образа камеры флотационной машины явилась конструкторская документация, разработанная компанией Outokumpu. Геометрический образ включает в себя область пульпы до нижнего уровня захвата пеносъемных механизмов, областей пульпы в зонах люка загрузки пульпы и люка выгрузки камерного продукта, область импеллера и область статора. Конструктивные элементы модели камеры флотационной машины ОК-38 показаны на рис. 1.

Расчетная сетка конечных элементов модели содержит соответственно для подвижной области импеллера 99109 ячеек, а для неподвижной области статора и камеры 397166 ячеек. Графическое изображение результата работы сеточного генератора Gambit приведено на рис. 2.



**Рис. 2. Вид расчетной сетки конечных элементов модели**

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<sup>2</sup> вращение области импеллера, воспринимаемой программной средой ANSYS Fluent замкнутой областью ячеек сетки, избегая пространственного перекрытия и деформации расчетной сетки.

**В модели на данном этапе решается задача** разделения твердых компонентов пульпы по признаку флотуемости. Следует отметить, что в рамках исследования гидродинамики флотации CFD-методами (Computational Fluid Dynamics – вычислительная гидродинамика) проводились работы по созданию двухфазных моделей, описывающих процессы распределения дисперсной газовой фазы в жидкой фазе. В частности, такая работа по моделированию фло-

тационной машины колонного типа была проведена в Горном институте КНЦ РАН в 2010 году [6].

**Основой решения задачи** является метод количественной оценки поверхностной энергии минеральных зерен по установленной связи между ее величиной и значениями энергии ионного взаимодействия в кристаллической решетке минерала. Названный метод основывается на т.н. геоэнергетической теории А.Е. Ферсмана [7] и работах В.В. Зуева и др. [8], посвященных кристаллоэнергетике и оценке свойств твердых материалов. Геоэнергетическая теория А.Е. Ферсмана рассматривает энергию ионного взаимодействия в кристаллической решетке минерала, исходя из представлений о полном потенциале ионизации (энергетической константе,  $\epsilon_k$ ), присущем каждому входящему в решетку аниону или катиону. Результаты расчетов по формуле, предложенной А.Е. Ферсманом для оценки энергии ионного взаимодействия в кристаллической решетке минерала, хорошо коррелируют с экспериментальными данными и подобными расчетами, проведенными А.Ф. Капустинским [9]. Формула А.Е. Ферсмана имеет следующий вид:

$$U_v = 4187 \cdot 256 \cdot 10^{-9} \frac{\rho}{\mu} \sum_{i=1}^n \epsilon_k j_i,$$

где:  $U_v$  – объемная энергия ионного взаимодействия в кристаллической решетке минерала, кДж/см<sup>3</sup>; 256 – поправка А.Е.Ферсмана на вклад ионов в энергию решетки минерала;  $\rho$  – плотность минерала, кг/м<sup>3</sup>;  $\mu$  – молярная масса минерала, кг/моль;  $n$  – количество сортов ионов, входящих в решетку;  $\epsilon_k$  – энергетическая константа иона  $i$ -го сорта;  $j_i$  – количество ионов  $i$ -го сорта.

<sup>2</sup> Эмуляция — воспроизведение программными или аппаратными средствами либо их комбинацией работы других программ или устройств.

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 [8], позволяют проводить расчеты поверхностной энергии минералов по линейной эмпирической зависимости

$$E_S = 0,0025U_0 + 0,3052 \text{ Дж/м}^2$$

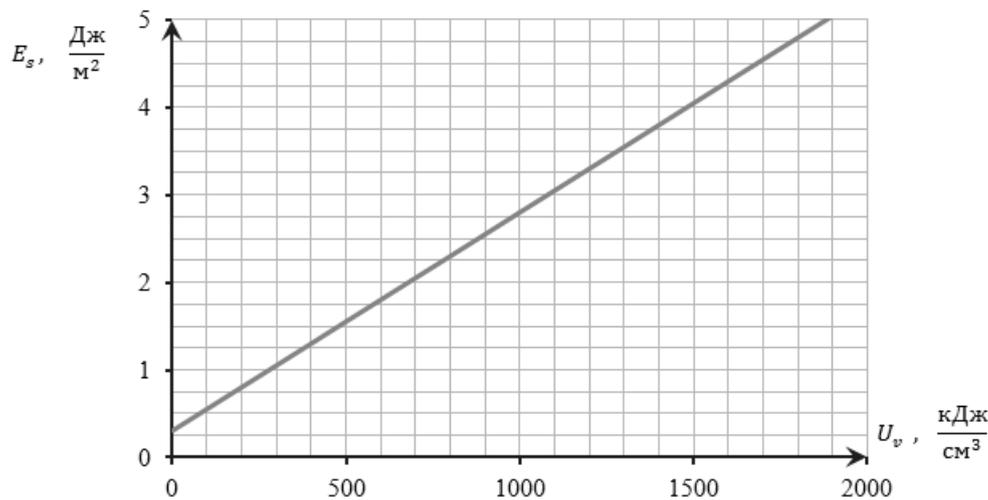
с достаточно высокой достоверностью аппроксимации  $R^2 = 0.8919$ . Графическая интерпретация этой зависимости представлена на рис. 3.

В основу работы решателя программной среды ANSYS Fluent положена система нелинейных дифференциальных Эйлеровых уравнений сохранения массы, импульса и энергии. Данный подход предполагает рассмотрение одной из участвующих в процессе фазы, в качестве первичной (несушей). Такой фазой является водный раствор ПАВ заданной концентрации. Дисперсная газовая фаза и отдельные классы крупности минеральных компонентов смеси воспринимаются решателем также в виде псевдожидкостей, каждая из которых характеризуется присущими ей свойствами (плотностью, крупностью и поверхностной энергией локальных объемов частиц, распределением концентрации, скоростью).

Движение гетерогенной системы в пневмомеханической машине сопровождается формированием и разрушением областей турбулентности потока. Поэтому параметры модели для учета данного явления включают стандартную  $k-\epsilon$  – модель турбулентности. Наиболее сложным этапом работы модели является период выраженного переходного процесса от со-

стояния покоя до выхода системы на стационарный режим работы. Удовлетворительная сходимость модели при реализации этого процесса обеспечивается текущими настройками решателя по величине числа Куранта (R.Courant) и временного интервала дискретизации расчета, определяющего точность вычислений.

Модель многофазной системы представлена 4-мя фазами: водный раствор ПАВ, диспергированный воздух, две твердые гранулированные фазы. Динамические характеристики модели по расходам пульпы и сечению канала вала импеллера соответствуют технологической карте, регламентирующей производство нефелинового концентрата на АНОФ-2. При проведении компьютерного эксперимента, поставленного на основе модели процесса флотации, взаимодействие фаз должно учитывать доминирование поверхностных сил над объемными силами, действующими на участвующие в процессе твердые фазы. Такой характер взаимодействия фаз обеспечивается применением названного выше метода количественной оценки поверхностной энергии минеральных зерен. Поэтому начальные и граничные условия модели, а также параметры, описывающие эффекты парных взаимодействий частиц компонентов гетерогенной смеси, определены так, что твердые фазы, кроме рассчитанных по апатиту и нефелину значений поверхностных энергий зерен минералов, отличаются так же плотностью и крупностью. Гидрофобная флотлируемая твердая дисперсная фаза имеет плотность  $3300 \text{ кг/м}^3$  при крупности  $100 \text{ мкм}$ , а гидрофильная нефлотлируемая дисперсная фаза имеет плотность  $2700 \text{ кг/м}^3$  при крупности  $80 \text{ мкм}$ .



**Рис. 3. Зависимость поверхностной энергии минерала от энергии ионного взаимодействия в его кристаллической решетке**

Достоинствами модели являются:

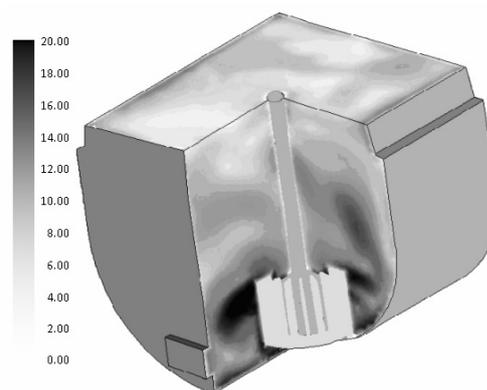
Возможность для каждого момента времени производить покомпонентную оценку расхода (кг/с или м<sup>3</sup>/с) через поверхности массообмена моделируемого объема и окружающей среды, обеспечивающая контроль над параметрами флотации.

Графическая интерпретация результатов расчета скорости и объемной концентрации для каждой из участвующих в процессе фаз.

Перестройка режимов работы модели флотационной машины в реальном времени. К таким режимам можно отнести скорость вращения ротора, концентрацию ПАВ в воде, объемное содержание компонентов питающей пульпы и скорость ее подачи, интенсивность подачи газовой фазы, массовый баланс потоков камерного и пенного продуктов.

#### **Результаты компьютерного моделирования и выводы**

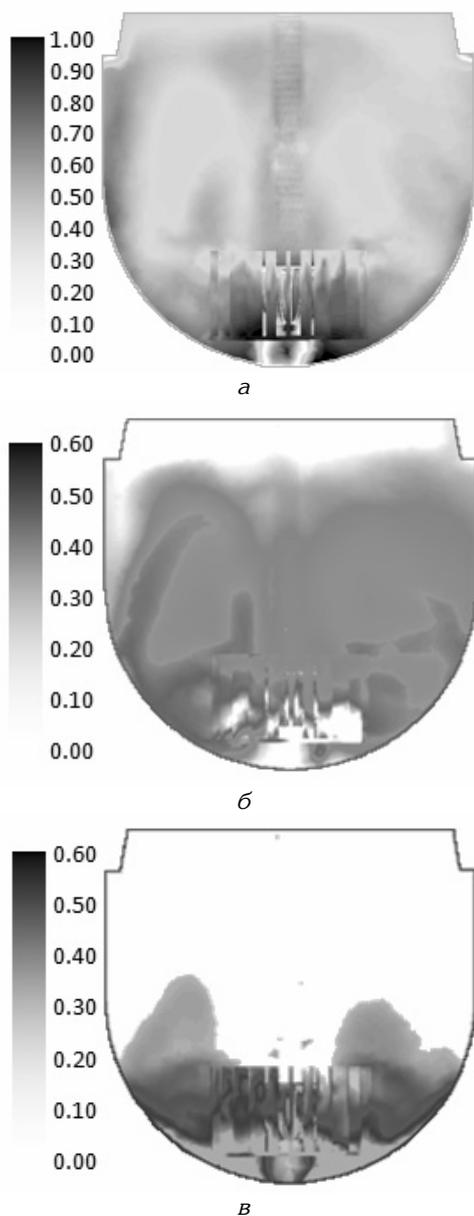
На рис. 4 показано трехмерное поле скоростей пульпы по истечении первых 100 секунд работы компью-



**Рис. 4. Изображение результата моделирования трехмерного поля скоростей (м/с) пульпы по истечении 100 секунд процесса**

терной модели флотационного разделения заданной минеральной смеси.

Полученное изображение позволяет судить о выраженной неоднородности гидродинамического режима в области объема пульпы, вызываемой высокой степенью турбулизации в камере флотационной машины. Снижения влияния турбулентности на процесс флотации следует искать в дополнительных элементах конст-



**Рис. 5. Изображение результата моделирования распределения концентраций компонентов пульпы по истечении 100 секунд процесса:** а — газовая фаза; б — флотируемая фаза; в — нефлотируемая фаза

рукции камеры, которые позволили бы снизить вихреобразование на ее

горизонтах, лежащих выше диска импеллера.

Повышение эффективности флотации помимо снижения влияния турбулентности может являться так же следствием применения реагентов собирателей в виде АВДВ за счет распределенной радиальной и многоуровневой ее подачи в камеру флотационной машины.

В компьютерной модели реализован метод количественной оценки поверхностной энергии минеральных зерен, который может использоваться в последующих более полных и детальных моделях флотации при задании условий взаимодействия фаз. Применимость метода подтверждается полученным выраженным разделением в объеме камеры компонентов пульпы по признаку флотируемости. Рис. 5 показывает распределение концентраций газовой фазы и двух твердых фаз, — соответственно флотируемой и нефлотируемой, в центральном сечении камеры для момента времени 100 секунд процесса.

Дальнейшее развитие модели предполагает реализацию следующих основных этапов:

Увеличение числа твердотельных мелкодисперсных фаз с учетом представительства минералов в хвостах апатитовой флотации и градации фаз по классам крупности.

Подача в зону статора АВДВ первоначально по одноточечной схеме реализуемой сегодня в ОАО «Апатит», и далее по схеме с радиальным и многоуровневым распределением точек ввода дисперсии воздуха.

Внесение конструктивных дополнений и изменений в геометрический образ камеры, которые бы позволили снизить интенсивность влияния турбулентности на ход флотации.

---

## СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. *Обогащение* апатито-нефелиновых руд Хибинского массива. Под ред. Г.А.Голованова, Мурманское книжное издательство, 1967.
2. *Ратобильская Л.Д., Бойко Н.Н., Кожевников А.О.* Обогащение фосфатных руд. М.: Недра, 1979.
3. *Самарский А.А., Михайлов А.П.* Математическое моделирование: Идеи. Методы. Примеры. М.: Физматлит, 2001.
4. *Глембоцкий В.А., Классен В.И.* Флотация. М.: Недра, 1973.
5. *Нигматулин Р.И.* Динамика многофазных сред. М.: Наука, 1987.
6. *Скорородов В.Ф., Юрзин С.В., Бирюков В.В.* Исследование гидродинамических характеристик колонной флотационной машины на основе методов вычислительной гидродинамики. Проблемы и тенденции рационального и безопасного освоения георесурсов. Сборник докладов Всероссийской научно-технической конференции, посвященной 50-летию Горного института КНЦ РАН. Апатиты. СПб, 2011.
7. *Ферсман А.Е.* Геохимия. М. — Л., ОНТИ, Химгеорет, 1936.
8. *Зуев В.В., Поцелуева Л.Н., Гончаров Ю.Д.* Кристаллоэнергетика как основа оценки свойств твердотельных материалов. СПб, 2006.
9. *Капустинский А.Ф.* Z. Kristallogr., 1933. **IVAB**

---

## КОРОТКО ОБ АВТОРАХ

*Скорородов В.Ф.* — доктор технических наук, заведующий лабораторией новых обогащительных процессов и аппаратов ФГБУН Горный институт КНЦ РАН, e-mail: skorohodov@goi.kolasc.net.ru,  
*Никитин Р.М.* — ведущий технолог лаборатории новых обогащительных процессов и аппаратов ФГБУН Горный институт КНЦ РАН, e-mail: remnik@yandex.ru,  
*Якушкин В.П.* — кандидат технических наук, зав. кафедрой «Обогащение полезных ископаемых» ГОУ ВПО Московский Государственный Открытый Университет, e-mail: msou.NRGU@list.ru.



---

## ГОРНЯЦКОЕ АРГО



- **КОНЕЦ ПРОХОДКИ ДОНБАССА** — расшифровка маркировки проходческого комбайна КПД.
- **КОНЬ** — выемка отбойным молотком в лаве 2 метра на метр.
- **КОПЫТНЫЕ** — доплата за время нахождения в пути к рабочему месту. Они же ходовые.
- **КОРЖ** — большой кусок породы, упавший с кровли, или имеющий тенденцию к падению. Размеры коржа могут достигать метров, а вес несколько тонн.
- **КОРМИЛЕЦ** — очистной комбайн. Он же трактор, железяка, бала-лайка.
- **КОРОНКА** — сменный наконечник на забурнике.
- **КОРУЦИЯ (КОРОСТА)** — ДКНЛ.
- **КОРЧАГИН** — кирка.
- **КОСТЕР (КЛЕТЬ)** — конструкция в виде сруба, выкладывается из деревянных стоек — предназначена для поддержания кровли.
- **КОШКА** — самодельный примитивный тормоз для удержания обрвавшего вагона.
- **КРОВЛЯ** — расположенные выше пласта угля пласты породы, различные по мощности и по крепости; собственно, не жаргонизм, а официальный термин.