

# ПУТИ РАЗВИТИЯ ТЕОРИИ ОБОГАТИТЕЛЬНЫХ ПРОЦЕССОВ И СОЗДАНИЯ ИННОВАЦИОННЫХ ТЕХНОЛОГИЙ КОМПЛЕКСНОГО ИСПОЛЬЗОВАНИЯ СЫРЬЯ



**А. А. Абрамов,**  
проф, д-р техн. наук  
Московский государ-  
ственный горный  
университет

Современные технологии обогащения полезных ископаемых обеспечивают довольно высокую степень комплексного использования сырья. Однако дальнейшее решение взаимосвязанных проблем более рационального использования природных ресурсов, экологии, энергетики и управления производством требует технологий переработки и обогащения минерального и других видов сырья качественно нового уровня. Успешное решение этих проблем невозможно без дальнейшего развития теории обогатительных процессов, а именно: теории избирательного (селективного) раскрытия минералов, селективного разделения минералов, отделения компонентов органических и неорганических веществ от воды. Развитие теории обогатительных процессов жизненно необходимо также для решения проблем экологии и разделения неорганических и органических продуктов в других отраслях промышленности. Целью статьи является рассмотрение путей развития теории обогатительных процессов и создания инновационных технологий комплексного использования сырья.

## Развитие теории избирательного (селективного) раскрытия минералов

Увеличение степени селективного раскрытия минералов в процессах дробления и измельчения позволит существенно повысить извлечение ценных компонентов и резко снизить их потери в хвостах обогащения в виде переизмельченных зерен и сростков с минералами породы [1].

Повышения эффективности работы существующего дробильного оборудования может быть достигнуто увеличением числа качаний дробящего тела (конуса, щеки) и совершенствованием профиля дробящей камеры. Повышение эффективности измельчения в шаровых и стержневых мельницах (на 30–70 %) достигается путем снижения крупности питания, увеличения пропускной способности, выявления оптимальной частоты их вращения и оптимальной рационализованной загрузки мельниц измельчающими телами определенной формы. Использование при этом инерционного привода в дробилках и наложение малых импульсов энергетического воздействия на дробимый материал способствуют разупрочнению материала и улучшают раскрываемость минералов. Применение

химических добавок — понизителей прочности материала, использование некатарактного режима работы шаровых мельниц (при доизмельчении промпродуктов и концентратов), установка в замкнутых циклах измельчения флотоклассификаторов, монокамер, флотоотсадочных машин, аппаратов гравитационного обогащения, флотация песков гидроциклонов в машинах типа «Ским Эйр» с целью вывода из процесса раскрытых зерен полезных минералов, применение более эффективных грохотов и классифицирующих устройств в циклах измельчения позволяют снизить переизмельчение извлекаемых минералов [1, 2]. Однако традиционное исполнение методов дробления и измельчения принципиально не может обеспечить реализацию принципов избирательного раскрытия минералов.

Согласно теории Орованна – Гриффитса – Ребиндера – Ревнивцева [3], избирательное раскрытие минералов из сростков должно включать стадии концентрации дефектов кристаллических решеток соприкасающихся минералов на поверхности их контакта в сростке, образования в результате этого локальной концентрации напряже-

ний и зародышевых микротрещин; развития и объединения их в магистральную макротрещину и, наконец, образования поверхности разрушения. Возможность раскрытия минералов из сростков именно по поверхности их срастания обусловлена наибольшей дефектностью этой зоны в связи с различием параметров кристаллических решеток соприкасающихся минералов. Чтобы обеспечить эффективное протекание вышеуказанных стадий, составляющих процесс разупрочнения границ срастания минералов, следует соблюдать следующие технологические принципы.

1. Деформационные нагрузки должны быть растягивающими или сдвигающими. В зависимости от физических свойств минералов этот принцип может быть реализован несколькими способами:

♦ если составляющие сросток минералы обладают различными упруго-пластическими свойствами — использованием чисто механических пульсирующих сжимающих нагрузок (например, всесторонним сжатием материала в рабочей зоне аппарата; изменением давления окружающей жидкой или газовой среды; многократными ударами

кусков друг о друга или о твердую поверхность и т. д.);

- ♦ воздействием колебаний различной частоты или энергией ударных волн, вызывающих растягивающие напряжения на границах зерен минералов, обладающих различной «пропускной способностью» по отношению к внешним воздействиям;

- ♦ термической обработкой материала, минералы которого значительно отличаются термическим коэффициентом объемного или линейного расширения (сжатия) или анизотропией тепловых свойств;

- ♦ обработкой электрическими или магнитными полями, если компоненты кусков или зерен обладают различными свойствами, приводящими к селективному поглощению электромагнитных колебаний поля (явления электрострикции, магнитострикции, электрического пробоя по электропроводящим поверхностям и др.);

- ♦ другими приемами, основанными на использовании каких-либо специфических свойств минералов и текстурных особенностей того или иного полезного ископаемого.

2. Мощность энергетического воздействия на каждый кусок или полиминеральное зерно (независимо от вида энергии, вызывающей деформацию) должна быть достаточной для образования микротрещин на межзерновых границах, но не в объеме кристалла. Этого можно достигнуть, например, подвергая кусок многократному воздействию малыми импульсами энергии, вызывающими накопление необратимых напряжений на межзерновых границах.

3. Частота и скорость деформаций должны быть достаточно высокими, чтобы снизить потери энергии на пластическую деформацию материала. В то же время скорость деформации должна быть такой, чтобы края возникающей трещины находились под действием растягивающих напряжений достаточное время для обеспечения диффузии в нее поверхностно-активных веществ (эффект Ребиндера) и проявления механохими-

ческого эффекта, интенсифицирующего развитие микротрещин.

Непосредственный процесс разрушения предварительно разупрочненных зерен также должен осуществляться с соблюдением ряда принципов.

1. Уровень энергетических воздействий должен быть выше энергетических импульсов в процессе разупрочнения, но не превышать предела, при котором начинается разрушение самих кристаллов.

2. Чтобы достигнуть особо высокой селективности раскрытия, материал следует подвергать постепенно нарастающему энергетическому воздействию с выведением из процесса раскрытых зерен, поскольку прочность межзерновых границ для различных кусков варьирует в определенном диапазоне.

3. Плотность энергии должна быть высокой, для того чтобы в каждой разрушаемой частице создать требуемую концентрацию напряжений. При этом желательно, чтобы так же, как и при разупрочнении, это были в основном растягивающие и касательные напряжения либо ударные импульсного характера со строго дозированной силой удара.

Достоверность основных положений разработанной теории принципиально подтверждена экспериментально результатами вибрационного (Механобр), электромагнитного (МГТУ), импульсного (ИПКОН РАН), термического и других методов энергетического воздействия на исходный рудный материал еще четверть века назад [3–5]. Были предложены разнообразные конструкции электрогидравлических и электроимпульсных дробилок ударного и взрывного действия, струйных, вибра-

ционных, планетарных и центробежных мельниц, ударных мельниц самоизмельчения и мельниц с измельчением токами высокой частоты, дезинтеграторов ультразвукового действия, а также с использованием мощной импульсной, низкотемпературной плазменной технологии и др. [1, 2, 4]. Показано, что, кроме повышения степени интергранулярного раскола, они могут обеспечить большую равномерность гранулометрического состава, повышение КПД и производительности аппаратов по свежобразованной поверхности. Однако предлагаемые новые нетрадиционные методы дезинтеграции не получили широкого распространения на практике. Результаты анализа причин этого показывают, что в них практически не учитывается зависимость вида энергетического воздействия от характера различий в свойствах минералов в сростке (упруго-пластических, термических, магнитных, электрических и т. д.), а также необходимой мощности и частоты энергетического воздействия от значений физических или электрофизических параметров минералов в сростке.

Теоретическое и экспериментальное обоснование данных зависимостей в результате проведения специальных исследований с использованием современного оборудования является первоочередной задачей. Они позволяют:

- ♦ определить оптимальные области применения того или иного вида энергетического воздействия на основании физических или электрофизических свойств минералов сырья;

- ♦ установить количественные зависимости требуемой мощности и режима энергетического воздействия от параметров и свойств кристаллической решетки минералов в сростках;

- ♦ обосновать основные характеристики новых аппаратов избирательного раскрытия минералов с применением различных видов энергетического воздействия;

- ♦ обосновать значения частоты, амплитуды, вектора и величины энергетических импульсов ударной волны, обеспечивающих эффективное разупрочнение горной массы



при взрыве в процессе горных работ. Параметры взрыва можно регулировать содержанием газообразующих компонентов во взрывчатом веществе его расходом, расположением взрывных скважин с учетом стратиграфических особенностей залегания рудных тел.

В совокупности все это позволит практически решить проблему разупрочнения исходного минерального сырья и избирательного раскрытия минералов из сростков, резко увеличить извлечение ценных компонентов и степень комплексности использования даже труднообогатимого сырья при снижении энергоемкости, капитальных затрат и эксплуатационных расходов.

### Развитие теории процессов разделения минералов

Процессы разделения минералов основаны на различии в их механических, кристаллохимических, спектроскопических, радиоспектроскопических, магнитных, электрических, физико-химических, термических и других свойствах [2]. Особое значение среди технологических процессов разделения минералов имеют гравитационные, радиометрические, магнитные, электрические, флотационные процессы и процессы разделения по крупности.

*Процессы разделения минеральных частиц по крупности – грохочение и классификация.* Разделительными признаками процессов грохочения и классификации являются крупность, плотность и форма частиц. Эффективность используемых процессов грохочения или классификации определяет эффективность разделения минералов в обогатительных аппаратах. Наибольшее значение ее достигается при переработке материала заданного для каждого из них диапазона крупности [2].

Сущность способов интенсификации и повышения эффективности грохочения заключается в увеличении вероятности прохождения зерен требуемой крупности через отверстия просеивающей поверхности. Она достигается в настоящее время применением «актив-



ных» поверхностей – использованием эластомеров, волнообразной установки сита (принцип Umbrex), применением сит с непосредственным возбуждением и сит, отдельные участки которых (или сита одного грохота) имеют различные параметры колебаний или градиенты интенсивности колебаний [6]. Дальнейшее совершенствование процессов грохочения связано с разработкой количественных закономерностей стесненного падения зерен различного гранулометрического состава и влажности исходного материала от размера и формы отверстий сит на грохоте, частоты и амплитуды колебаний просеивающей поверхности, угла наклона сита и угла подбрасывания материала, способа грохочения.

*Классификация* осуществляется в горизонтальном или восходящем потоке среды под действием гравитационных сил и сил сопротивления, а также в центробежном поле, где классифицируемые частицы испытывают дополнительное воздействие центробежных сил инерции. Современной тенденцией является использование грохотов тонкого грохочения вместо гидравлических классификаторов. Это позволяет снизить ошламование извлекаемых минералов, повысить точность разделения материала по крупности, улучшить качественные и количественные показатели как измельчительных, так и обогатительных операций. Гидравлические грохоты с эластичной синтетической сеткой способны работать также на плотных пульпах (60–65 % твердого) [6].

Повышение эффективности работы основных классифицирующих аппаратов в цикле измельчения – гидроциклонов – достигается путем строго спи-

рального ввода питания, применения новых износостойких материалов (керамики, специальной резины, полиуретана и др.), насосов с регулируемой частотой вращения и создания систем автоматизации [2].

Дальнейшее повышение эффективности классификации в горизонтальном и восходящем потоках среды будет определяться успехами в изучении закономерностей

движения зерен различной крупности, плотности и формы в стесненных условиях. Для повышения эффективности классификации в центробежных аппаратах необходим учет еще и сегрегации, а также разделения зерен в пристенном слое.

*Процессы гравитационного обогащения* широко используются при переработке и обогащении различных видов минерального сырья. Они осуществляются в тяжелых средах, потоках постоянного и переменного направления, на наклонной плоскости и в центробежном поле [2, 7].

Теоретической основой совершенствования гравитационных процессов обогащения является углубление наших представлений о закономерностях движения частиц разной плотности, крупности, формы в стесненных условиях под действием силы тяжести, центробежных (и центростремительных) сил и противодействующих им сил сопротивления среды [7, 8]. В качестве разделительных признаков могут служить: реологические параметры среды разделения; реологические параметры среды, подверженной одновременно действию электрических и магнитных полей; скорости движения зерен в пульсирующем потоке жидкости; скорости движения зерен в струе жидкости, текущей по наклонной плоскости; скорости движения зерен в центробежном поле потока жидкости.

Решением уравнений движения частиц с учетом действующих на них сил можно оценить оптимальные значения гидродинамических параметров существующих процессов, а также возможное аппаратное оформление нового гравитационного процесса. Примене-

ние теории случайных процессов позволит установить распределение частиц по продуктам разделения, описать кинетику процесса и связать результаты обогащения с производительностью гравитационного аппарата.

На основании результатов теоретических исследований можно будет дать обоснованные рекомендации по совершенствованию, интенсификации и развитию методов гравитационного обогащения. В соответствии с полученными закономерностями, они могут включать разрушение или, наоборот, создание в разделительных зонах аппаратов определенной структурированности суспензии с необходимым значением вязкости и плотности среды с учетом закономерностей движения частиц в стесненных условиях под действием силы тяжести или центробежных (и центростремительных) сил и противодействующих им сил сопротивления среды. Реализация их в практических условиях может быть достигнута:

- ◆ изменением конструктивных и тем самым гидродинамических параметров аппаратов гравитационного обогащения (центробежных концентраторов, спиральных, крутонаклонных сепараторов и др.);

- ◆ изменением свойств среды разделения применением специальных реагентов и материалов, а также регулированием интенсивности потоков и характера циклов в зоне разделения;

- ◆ наложением вибрационного или ультразвукового полей. Показано, что применение вибрационного или ультразвукового воздействия существенно повышает эффективность разделения при отсадке, концентрации на столах и разделении в тяжелых суспензиях. В связи с этим создан ряд новых аппаратов: вибросепаратор, виброшлюз, виброконцентратор.

Детальное изучение гидродинамики процессов гравитационного обогащения в пристенном слое аппаратов [8] позволит разработать более эффективные процессы и аппараты, в первую очередь – для переработки и обогащения тонкозернистых материалов и шламов. Установлена, например, эффективность применения орбитальных колебаний в шлюзах и концентраторах, измененного шага спирали в

винтовых и рифлей в центробежных концентраторах и т. д.

*Процессы магнитной сепарации* являются основными при обогащении руд черных металлов и широко используются в комбинации с другими процессами обогащения в схемах обогащения других видов минерального сырья [1, 2, 9]. Они основаны на различии в магнитных свойствах разделяемых минералов, главным образом на различии в их магнитной восприимчивости. Селективность и эффективность разделения материалов при магнитной сепарации возрастают с увеличением различия между значением их удельной магнитной восприимчивости, однородности поля сепаратора по величине магнитной силы и уменьшением диапазона крупности зерен в исходном материале [2, 9]. Поэтому разработка новых способов (и машин) магнитной сепарации и повышение ее эффективности могут быть осуществлены за счет увеличения разделительных сил (магнитных и центробежных); повышения напряженности магнитного поля; нейтрализации поверхностных сил, вызывающих адгезионную флокуляцию.

Для увеличения различия в удельной магнитной восприимчивости разделяемых минералов можно использовать предварительную магнитную обработку (подмагничивание) исходного материала или электрохимическую (катодную) обработку пульпы, не говоря уже о магнетирующем обжиге исходного материала. Увеличить силу магнитного поля можно как за счет разработки новых конструкций высокоградиентных сепараторов («магнитных фильтров»), так и за счет использования низко- и высокотемпературных сверхпроводников. Это позволяет увеличить напряженность поля на порядок, расширить номенклатуру обогащаемого сырья, повысить эффективность разделения.

При обогащении сильномагнитных руд и материалов, кроме магнитной восприимчивости частиц, важную роль играют также их коэрцитивная сила, остаточная индукция, размагничивающий фактор. От их значений зависит как образование флоккул в поле сепаратора или намагничивающего аппарата, так и степень их сохранения после уда-

ления из поля. Поэтому значительный интерес представляют новые конструкции струйного и электромагнитного сепаратора с демагнитизацией материала после каждой ступени, сепаратора с вращающимся двойным магнитным полем для сухого обогащения железной руды, электромагнитного гидроциклона с концентратором магнитного потока, позволяющего в 8–9 раз снизить напряженность магнитного поля при обогащении магнитных руд.

Несомненно, что повышение эффективности процессов магнитной сепарации будут зависеть от успехов теоретического обоснования гидродинамических закономерностей движения частиц в магнитном поле с учетом их свойств и свойств среды разделения.

*Процессы электрической сепарации.* При электрической сепарации в настоящее время используются главным образом различия в электропроводности (в электростатических, коронно-электрических и коронно-электростатических сепараторах), электризации (в трибоэлектрических и пневмоэлектрических сепараторах), диэлектрической проницаемости и при изменении температуры (в диэлектрических и пироэлектрических сепараторах). Сепарация на основе пьезоэлектрического и фотоэлектрического эффектов, униполярной проводимости и других электрических свойств является резервом практической реализации в будущем [2, 10].

Повышение эффективности электрической сепарации достигается изменением электрических свойств поверхности разделяемых минералов в результате термических, трибоадгезионных, механических и радиационных воздействий, обработкой материала неорганическими и органическими реагентами, разработкой принципиально новых конструкций сепараторов, основанных на более эффективном использовании векторной диаграммы сил, действующих на частицы в электрическом поле сепараторов [2, 10]. Усиление контрастности электрических свойств разделяемых минералов и повышение эффективности процесса электрической сепарации при этом обусловлены:

- ◆ селективной зарядкой выделяемых минералов при контактной элект-



ризации путем подбора соответствующих электризующих поверхностей и термической обработкой при 50–300 °С с учетом оптимальной температуры нагрева для каждой пары разделяемых минералов;

♦ изменением концентрации свободных носителей электрического заряда и работы выхода электрона при закреплении на поверхности минералов реагентов. Селективной физической сорбцией или хемосорбцией реагентов на одном из минералов можно добиться изменения не только величины, но и знака заряда, возникающего на нем при контактной электризации. Концентрация и подвижность носителей заряда у минералов-полупроводников могут быть изменены также термическим, радиационным, химическим кондиционированием и другими методами предварительной обработки;

♦ активизацией примесных уровней и увеличением концентрации носителей зарядов в зоне проводимости минералов при радиационном воздействии. Например, при инфракрасном облучении (с длиной волны от  $10^{-6}$  до  $1,5 \cdot 10^{-2}$  м и интенсивностью 0,7–0,9 В/см<sup>2</sup>) контактный заряд силикатных минералов увеличивается в несколько раз.

Эффективность каждого из перечисленных направлений будет определяться достоверностью выявленных закономерностей его влияния на изменение электрофизических характеристик (уровня Ферми, соотношения электронов и дырок и общего электронного состояния поверхности) разделяемых минералов.

Объективная оценка физических и физико-химических характеристик минералов, выявление взаимосвязи между характеристиками валентной зоны и зоны проводимости, концентрацией носителей заряда (электронов и дырок) и проводимостью минералов позволит обоснованно выбирать наиболее подходящий метод предварительной обработки материала и за счет этого резко повысить эффективность процесса электрической сепарации.

Отсутствие теоретического и экспериментального обоснования взаимосвязи между электрофизическим состоянием разделяемых минералов, факторами, влияющими на нее, и поведени-

ем минералов при электрической сепарации не позволяет объективно оценить необходимые условия процесса разделения, что, в свою очередь, затрудняет проектирование более эффективного оборудования, средств контроля, регулирования и создание оптимальных условий процесса электрической сепарации.

*Процессы радиометрической сепарации* основаны на различии во взаимодействии минералов с ядерно-физическими излучениями. Результатом их взаимодействия являются: ядерные реакции, вызывающие искусственную (наведенную) радиоактивность у некоторых минералов; возбуждение люминесценции; отражение первичного излучения от поверхности минералов; поглощение (абсорбцию) первичного излучения или изменение энергии магнитного поля и его характеристики [2, 11].

Из многих возможных эмиссионно- и абсорбционно-радиометрических способов обогащения в настоящее время в промышленных условиях наиболее широко применяют авторадиметрический, фотонейтронный, нейтронно-активационный, рентгенорадиометрический, рентгенолюминесцентный, фотолюминесцентный, люминесцентный, фотометрический, гамма-абсорбционный, нейтронно-абсорбционный и фотоабсорбционный [2]. Их применяют как в качестве основных и доводочных операций (сепарации) при обогащении различных типов полезных ископаемых, так и для особенно эффективной операции предконцентрации (сортировки) бедных руд.

Определение зависимости эффективности признака разделения (оцениваемого соотношением показателей признака разделения и контрастности) от особенностей электронной и ядерно-физических свойств разделяемых минералов позволит сравнивать эффективность различных радиометрических процессов и выбирать наиболее подходя-

щий для данного сырья в технологическом отношении. Данная зависимость необходима также для совершенствования конструкций существующих радиометрических сепараторов и расширения их номенклатуры, что существенно расширит возможности комплексной переработки сырья и охраны окружающей среды, снизит себестоимость конечной продукции горно-обогатительного производства [1, 2].

*Процессы флотационного обогащения.* С применением флотации в настоящее время перерабатывают более 90 % руд цветных металлов, значительную часть редких и благородных металлов, горнохимического и другого минерального сырья [12]. Бурное развитие флотации сопровождается интенсивным использованием разновидностей пенной, адсорбционной и адгезионной флотации во многих отраслях промышленности и при решении экологических проблем.

Решение технологических, экономических и экологических проблем с использованием флотации и дальнейшее ее развитие связаны с необходимостью перехода от качественных представлений во флотации к количественным закономерностям. Научной основой такого перехода является новая гипотеза флотации, отвечающая теоретически обоснованным требованиям к элементарному акту флотации [12]. Эффективная флотация минералов, не обладающих природной гидрофобностью, по данной гипотезе достигается при наличии на их поверхности не только хемосорбированного, но и физически сорбированного собирателя, обеспечивающего как термодинамические, так и кинетические функции при закреплении на пузырьках и флотации



минеральных частиц. Отсутствие одной из форм сорбции собирателя на поверхности приводит к депрессии минерала. Только для природно-гидрофобных минералов достаточно одного физически сорбированного собирателя на их поверхности. Новая гипотеза флотации и разработанная методология теоретических расчетов в совокупности с результатами экспериментальной проверки теоретически возможных вариантов позволяют осуществить переход от качественных представлений во флотации к количественным закономерностям, обеспечить на их основе совершенствование и оптимизацию технологических процессов [1, 12]. Условием широкой реализации теоретически обоснованных оптимальных физико-химических условий технологических процессов на обогатительных фабриках является разработка аналитических комплексов для определения концентрации реагентов в жидкой фазе пульпы. Такие комплексы необходимы также для контроля загрязнения окружающей среды и решения связанных с этим экологических проблем [1, 2].

Возможность и перспективность перехода от качественных представлений во флотации к необходимым для практики флотационного обогащения количественным закономерностям подтверждены в промышленных или полупромышленных условиях. Так, например, подтверждена достоверность

теоретически обоснованных оптимальных условий: сульфидизации и флотации окисленных свинцовых минералов (в течение многих лет на Зырянской фабрике) и окисленных минералов меди (на Алмалыкской и Зырянской фабриках); активации и дезактивации сульфидов цинка солями меди (на Зырянской фабрике); селективной флотации сульфидов с катионным собирателем (на Сорской фабрике); флотации несulfидных минералов с оксигидрильным собирателем: флюорита (на фабрике в Монголии); апатита (на комбинате «Апатит»), карбонатной флотации (на примере Каратау); различных вариантов флотации сульфидных минералов свинца, цинка, меди с сульфидрильным собирателем (на фабриках Зырянская, Белоусовская, Алмалыкская, Сулливан) и медно-никелевой флотации (на Ждановской фабрике); разделения цинково-пиритного концентрата с известью (на Зырянской и Белоусовской фабриках); свинцово-медной флотации в режиме Шеридана – Гриссвольда (на Зырянской и Алмалыкской фабриках); цинк-цианидного разделения свинцово-медного концентрата (на укрупненной установке института Механобр) [1, 12]. Их использование обеспечивает оптимизацию и стабилизацию флотационного процесса за счет нейтрализации непостоянства ионного, молекулярного и коллоидного состава жидкой фазы пульпы (обус-

ловленного изменчивостью состава перерабатываемых руд, технологических и оборотных вод) и обеспечения образования оптимального сорбционного слоя собирателя на поверхности минералов при коллективной и селективной их флотации.

Новая гипотеза флотации и разработанная методология теоретических расчетов позволяют также [12]:

- ♦ объяснить сущность и обосновать оптимальные условия методов интенсификации технологических процессов флотации на фабриках (дополнительной загрузкой аполярных масел, использованием смеси собирателей, энергетических воздействий, электрохимической обработкой пульпы, регулировкой ее окислительно-восстановительного потенциала и др.);

- ♦ предложить и обосновать методы повышения селективности процесса флотации. К ним относится, во-первых, реализация предложенных на основании новой гипотезы флотации принципов выбора и синтеза более селективных собирателей. Во-вторых, может быть достигнуто увеличение различия в значениях потенциала и составе сорбционного слоя на поверхности разделяемых минералов под действием реагентов, энергетических воздействий или изменения значений окислительно-восстановительного потенциала пульпы.

Переход от качественных представлений во флотации к необходимым для практики флотации количественным закономерностям позволит осуществить надежный автоматический контроль и регулирование технологических процессов на фабриках, резко улучшить их технологические и экономические показатели. Снижение расхода реагентов и осуществление кондиционирования оборотных вод при этом существенно облегчит решение проблем охраны окружающей среды.

Теоретической базой решения проблемы оптимизации физико-механических условий флотации при разработке конструкций новых флотационных машин и аппаратов являются закономерности физической теории минерализации пузырьков при флотации [12]. Использование их позволило создать, например, такие аппараты, как машины



пенной сепарации, «КС», машины типа «Ским Эйр» для крупнозернистой флотации, машины с пульсационным аэратором и пневматические аппараты, в том числе с разнонаправленными потоками для флотации материала широкого диапазона крупности.

Дальнейшее обоснование условий повышения вероятности встречи частицы и пузырька, закрепления частицы и удержания ее на пузырьке в турбулентных условиях флотации позволит создать более совершенные флотационные аппараты. Так, например, результаты последних исследований в этом направлении позволили создать ряд перспективных аппаратов и технологий для извлечения тонких частиц при флотации [12, 13].

*Перспективы создания принципиально новых процессов и аппаратов.* Создание принципиально новых обогатительных процессов и аппаратов должно базироваться на использовании комбинации силовых полей и излучений: магнитного, электрического, центробежного, вибрационного, ультразвукового, радиационного, а также термического и химического воздействий с целью изменения свойств разделяющей среды и поверхности разделяемых частиц. На основе комбинации, например, вибрационного и гравитационного полей, создан ряд новых аппаратов: вибросепаратор, виброшлюз, виброконцентратор; в результате комбинирования магнитного, электрического и гравитационного силовых полей – аппараты магнитогидродинамической и магнитогидростатической сепарации. Исследуется возможность использования пьезоэлектрических, диэлектрических и других свойств минералов с целью создания новых эффективных процессов и аппаратов для их разделения. Новые процессы разделения минералов должны разрабатываться как составная часть экологически чистой технологии переработки и обогащения полезных ископаемых.

### Развитие теории разделения твердой и жидкой фаз

К процессам разделения твердой и жидкой фаз относятся в первую очередь процессы сгущения и фильтрования продуктов обогащения.

*Сгущение.* Интенсификация процесса сгущения в аппаратах осаждения может быть достигнута применением полимерных флокулянтов; магнитной и электрической обработкой пульпы, вызывающей коагуляцию минеральных частиц; добавкой вспомогательных порошков, обеспечивающих агломерацию тонких частиц за счет адгезии; магнитной флокуляцией на твердых магнитных частицах в переменном магнитном поле; аэрофлокуляцией и др. [2]. При неэффективности известных методов интенсификации процесса сгущения используются специальные конструкции осадительных или фильтрующих центрифуг [1, 2]. Сущностью методов интенсификации процесса сгущения является обеспечение оптимальных условий образования «мостиковых» структур, адгезионных центров или магнитной флокуляции, приводящих к слипанию тонких частиц в крупные ассоциаты (флоккулы), обладающие более высокой скоростью осаждения.

Обоснование закономерностей образования ассоциатов (флоккул) частиц и влияния крупности на скорость их осаждения необходимо для определения оптимальных условий их формирования и осаждения, выявления конструктивных особенностей и необходимых параметров возможных аппаратов сгущения. Достоверность полученных закономерностей будет зависеть от степени учета природы минералов (например, при магнитной флокуляции), характера активных центров на их поверхности (при использовании флокулянтов и других реагентов), значений рН нулевого заряда поверхности (в присутствии используемых реагентов).

*Фильтрация.* Для фильтрования сгущенного продукта используют в основном дисковые вакуум-фильтры и фильтр-прессы различных конструкций [2]. Для интенсификации процессов фильтрования и снижения влажности осадка используются водяной пар для обработки осадка и реагенты для обработки сгущенной пульпы, физические воздействия на пульпу и осадок (электроосмос и др.). Этому способствует также использование новых конструкций секторов дисковых вакуум-фильтров из легких антикоррозийных материалов (в том числе из синтетиче-

ских), пресс-фильтров типа «Ларокс» (Финляндия) или КМП-22 (Россия), высоковакуумных насосов. Сущностью методов интенсификации процессов фильтрования и снижения влажности осадка является гидрофобизация поверхности частиц твердой фазы, вызывающая образование крупных гидрофобных флокул, и снижение вязкости жидкой фазы, резко увеличивающих скорость и полноту удаления воды из фильтруемого материала.

Закономерности гидрофобизации поверхности частиц определяются на основе новой гипотезы флотации. Для обоснования условий максимальной скорости фильтрации необходимо определить оптимальное соотношение степени гидрофобности стенок каналов фильтрации и их капиллярного противодействия протеканию через них жидкости.

### Принципы создания инновационных технологий комплексного использования сырья

Сущностью проблемы создания инновационных технологий комплексного использования сырья является обеспечение:

- ♦ необходимого качества сырья, поступающего на обогащение;
- ♦ максимального его разупрочнения и селективности раскрытия минералов в процессах добычи, дробления и измельчения;
- ♦ эффективного разделения минеральных частиц в технологических циклах переработки и обогащения в условиях охраны окружающей среды.

Основой решения проблемы являются результаты геолого-технологического картирования месторождения, достижения в теории, технике и технологии разделительных процессов и охраны окружающей среды.

*Обеспечение требуемого качества минерального сырья, поступающего на обогащение,* и максимальная эффективность горно-обогатительного комплекса достигаются при выполнении условий [1, 2]:

- ♦ раздельной добычи и переработки технологически несовместимых сортов руд. Совместная переработка руд различного вещественного состава снижает технологические и технико-экономические показатели обогаще-



ния. Поэтому на большинстве современных горно-обогатительных предприятий руды предварительно разделяют на 2–3 сорта, на некоторых — на 8–11 («Сартори» в Италии, «Сулливан» в Канаде и др.);

- ♦ максимально возможного удаления породы из крупнокусковой и дробленной горной массы, чтобы снизить бесполезные энергетические, капитальные и эксплуатационные затраты на дробление, измельчение и обогащение. Это может быть достигнуто выделением в поточном или порционном режиме (операциями предконцентрации) отвальных крупнокусковых хвостов на сепарационных комплексах (с использованием методов радиометрии или разделения в тяжелых суспензиях);

- ♦ постоянства содержания ценных компонентов, вредных примесей, а также физико-механических свойств руды, близких к проектным показателям каждого технологического сорта. Оно может быть обеспечено на основании результатов геолого-технологического картирования месторождения, позволяющих сформировать технологические потоки руды, однородные по составу.

Перечисленные условия могут быть реализованы при наличии ядерно-физических средств контроля состава рудного сырья, создании радиометрических контрольных станций и сепарационных комплексов, определяемых вещественным составом добываемых руд.

*Обеспечение максимального разупрочнения исходного сырья и селективности раскрытия минералов в процессах добычи, дробления и измельчения [3–5] базируется на совокупности методов технологической минералогии и технико-эко-*

*номических характеристиках дробильно-измельчительных аппаратов, что позволяет предложить оптимальную схему дезинтеграции руды при минимальных энергозатратах в системе «взрывание — дробление — измельчение» и получить конечный продукт заданного гранулометрического состава. Наиболее приемлемой в ближайшее время, очевидно, станет стадийная схема, представляющая собой комбинацию традиционных методов (для дробления и измельчения крупнозернистого материала) и нетрадиционных (специальных) методов селективного раскрытия минералов.*

*Обеспечение эффективного разделения минеральных частиц в технологических циклах переработки и обогащения достигается путем:*

- ♦ расширения области применения методов предварительной концентрации руд с использованием процессов обогащения в тяжелых средах, отсадки и радиометрических методов обогащения (рентгенорадиометрической, рентгенолюминесцентной, радиорезонансной, гамма-абсорбционной, фотометрической сортировки и др.) с учетом совершенствования схем рудоподготовки, обеспечивающих наиболее экономически выгодное соотношение крупности продуктов дробления и измельчения для максимальной эффективности технологических процессов обогащения;

- ♦ применения в процессе обогащения новых теоретически обоснованных, более эффективных режимов обогащения, способов интенсификации технологических процессов в теоретически обоснованных оптимальных условиях и стадийных схем обогащения на основании результатов технологических исследований;

- разработки с учетом результатов технологических исследований и широкого распространения для переработки трудно-

обогатимого сырья комбинированных схем, включающих или различные методы обогащения, или сочетание методов обогащения с методами пиро- и гидрометаллургии (особенно с операциями экстракционного и сорбционного извлечения металлов из руд и растворов, а также биологического выщелачивания металлов) [1, 2, 14];

- ♦ разработки с учетом теории технологических процессов и внедрения нового, более производительного оборудования, конструкторской модернизации и повышения работоспособности действующего оборудования с целью подготовки его к автоматическому управлению;

- ♦ дальнейшей автоматизации обогатительных фабрик за счет внедрения разработанных систем автоматизации на базе автоматического контроля ионного состава пульпы, вещественного состава руды и продуктов обогащения, широкого применения для управления процессами электронно-вычислительной техники.

*Кондиционирование оборотных и очистка сточных вод* являются необходимым условием охраны окружающей среды при переработке полезных ископаемых. Для удаления твердых частиц из оборотных и сточных вод используются процессы осаждения, фильтрации и методы флотации, разработанные специально для извлечения тонких частиц неорганического и органического происхождения (методы IAF, DAF, NF, CAF, APF, BAF, FF и др. [13]). Удаление растворимых компонентов органических и неорганических веществ из оборотных вод в процессе их кондиционирования должно осуществляться в соответствии с физико-химической моделью используемого технологического процесса.

### Заключение

Дальнейшее развитие теории обогатительных процессов обеспечит создание не только более эффективных технологических процессов, но и принципиально новых процессов и технологий переработки и обогащения различных типов минерального сырья в условиях охраны окружающей среды. Они позволят снизить энергоемкость получения товарной продукции и ее





себестоимость, повысить комплексность использования сырья, решить насущные проблемы охраны окружающей среды горно-обогатительного производства, обеспечить народное хозяйство всеми необходимыми видами минерального сырья. Условием этого являются приоритетность развития теории, техники и технологии обогащения полезных ископаемых в общей системе: разработка месторождения – переработка и обогащение сырья – металлургическое (химическое) производство. ■■■

**Ways for the development of the theory of mineral processing and elaboration of innovation technologies for comprehensive utilization of the mineral feedstock.**

**A. A. Abramov**

The state-of-the art of mineral processing technology provides for rather high level of the comprehensive utilization of the mineral feedstock. However, further solving of interrelated problems of more efficient utilization of natural resources, environmental safety, energy and production management dictates the necessity for a qualitatively new level of technology for the processing of minerals and other raw materials. The so-called "breakthrough technologies" offered in the last century, which upgraded versions have been used by the industry over 25-30 years are not able to solve these problems. Successful solution of the above mentioned problems cannot be found without further development of the theory of mineral processing, namely, the elaboration of the theory of selective release of mineral grains, selective separation of minerals, separation of organic and inorganic components from water. Further development of the theory of mineral processing is of vital importance for the solving of environmental problems and separation of inorganic and organic products in other industries. This article discusses the ways for the development of the theory of mineral processing and elaboration of innovation technologies for comprehensive utilization of raw materials.



*Список литературы = References:*

1. *Абрамов А. А.* Технология переработки и обогащения руд цветных металлов. М.: Изд-во МГТУ, 2005. Т. 3, кн. 1, 2. = *A. A. Abramov.* Processing, beneficiation and comprehensive utilization of solid minerals. М.: MSMU Publishers, 2003, 2004. Vol. 1, 2 (in Russian).
2. *Абрамов А. А.* Переработка, обогащение и комплексное использование твердых полезных ископаемых. М.: Изд-во МГТУ, 2003, 2004. Т. 1, 2. = *A. A. Abramov.* Technology of non-ferrous metal ore processing and concentration. М.: MSMU Publishers, 2005, Vol. 3, books 1, 2 (in Russian).
3. *Revnitsev V. I.* We really need revolution in comminution. Proceed. XVI IMPC, Part A. Ed. K.S. Eric Forssberg, Elsevier, 1988. pp. 93–114.
4. *Чантурия В. А.* Перспективы устойчивого развития горноперерабатывающей индустрии России // Прогрессивные технологии комплексной переработки минерального сырья: сборник. М.: Изд. дом «Руда и Металлы», 2007. С. 5–22. = *V. A. Chanturia.* Prospects for the sustainable development of the mineral mining and processing industry of Russia. // Breakthrough technologies of comprehensive processing of mineral raw materials: Collected articles. М.: Ruda i Metally Publishing House, 2007, p. 5–22 (in Russian).
5. *Гончаров С. А.* Физико-технические основы ресурсосбережения при разрушении горных пород. М.: Изд-во МГТУ, 2007. = *S. A. Goncharov.* Physical and engineering fundamentals of resource saving in rock breaking. М.: MSMU Publishers, 1997. (in Russian).
6. *Вайсберг Л. А., Картавий А. Н., Коровников А. Н.* Просеивающие поверхности грохотов. Конструкции, материалы, опыт применения. СПб: Изд-во ВСЕГЕИ, 2005. = *L. A. Vaisberg, A. N. Kartaviy, A. N. Korovnikov.* Sieving surfaces of screens. Structures, materials, application practice. St. Petersburg.: VSEGEI Publishers, 2005. (in Russian).
7. *Кизельватер Б. В.* Теоретические основы гравитационных методов обогащения. М.: Недра, 1979. = *B. V. Kizelwater.* Theoretical grounds of gravity preparation methods, М.: Nedra Publishers, 1979. (in Russian).
8. *Богданович А. В., Федотов К. В.* Техника и технологии гравитационного обогащения песков и тонковкрапленных руд // Прогрессивные технологии комплексной переработки минерального сырья: сборник. М.: Изд. дом «Руда и Металлы», 2007. С. 69–83. = *A. V. Bogdanovich, K. V. Fedotov.* Equipment and technology for gravity separation of sands and finely impregnated ores. // Breakthrough technologies for comprehensive processing of mineral raw materials: Collected articles. М.: Ruda i Metally Publishing House. 2007, pp. 69–83 (in Russian).
9. *Кармазин В. В., Кармазин В. И.* Магнитные и электрические методы обогащения. М.: Недра, 1988. = *V. V. Karmazin, V. I. Karmazin.* Magnetic and electric methods of mineral processing. М.: Nedra Publishers, 1988. (in Russian).
10. *Олофинский Н. Ф.* Электрические методы обогащения. М.: Недра, 1970. = *N. F. Olofinskiy* Electric methods of mineral processing. М.: Nedra Publishers, 1970 (in Russian).
11. *Мокроусов В. А., Пилеев В. А.* Радиометрическое обогащение нерадиоактивных руд. М.: Недра, 1979. = *V. A. Mokrousov, V. A. Pileev.* Radiometric separation and concentration of nonradioactive ores. М.: Nedra Publishers, 1979 (in Russian).
12. *Абрамов А. А.* Флотационные методы обогащения (3-е изд.). М.: Изд-во МГТУ, 2008. = *A. A. Abramov.* Flotation methods of mineral processing (3rd Edition). М.: MSMU Publishers, 2008 (in Russian).
13. *Rubio J.* Unconventional flocculation and flotation techniques. Flotation and flocculation. From fundamentals to applications. Strategic Conference and Workshop. Hawaii, 2002.
14. *Масленицкий Н. Н., Беликов В. В.* Химические процессы в технологии переработки труднообогатимых руд. М.: Недра, 1986. = *N. N. Maslenskii, V. V. Belikov.* Chemical processes of the technology for the processing ores with poor processibility characteristics. М.: Nedra Publishers 1986.