

622.7

к 686

В. В. Коростовенко

**ЭЛЕКТРОФИЗИЧЕСКИЕ
МЕТОДЫ**

**в комбинированных
технологиях переработки
минерального сырья**

Красноярск 2008

622.3
К 686

ФЕДЕРАЛЬНОЕ АГЕНТСТВО ПО ОБРАЗОВАНИЮ
СИБИРСКИЙ ФЕДЕРАЛЬНЫЙ УНИВЕРСИТЕТ

Издается в рамках гранта Красноярского
краевого фонда науки «Научные проекты»

В. В. Коростовенко

**ЭЛЕКТРОФИЗИЧЕСКИЕ МЕТОДЫ
В КОМБИНИРОВАННЫХ
ТЕХНОЛОГИЯХ ПЕРЕРАБОТКИ
МИНЕРАЛЬНОГО СЫРЬЯ**

Монография

Научная библиотека СФУ



A1064840B



Красноярск
ИПК СФУ
2008

УДК 622.235:622.765.5:620.191.1
ББК 33.4
К 66

Рецензенты: д-р техн. наук, проф. Московского института сталей и сплавов Л.С. Стрижко; д-р техн. наук, проф. Иркутского государственного технического университета Б.Л. Тальгамер

К 66 Коростовенко, В. В.
Электрофизические методы в комбинированных технологиях переработки минерального сырья : монография / В. В. Коростовенко. – Красноярск : ИПК Сиб. федер. ун-та, 2008. – 216 с.

ISBN 978–5–7638–0808–7

В монографии выполнен анализ комбинированных методов обогащения минерального сырья на основе энергетических воздействий на многофазные системы в основных процессах переработки сульфидных и окисленных руд. Изложены теоретические исследования условий и физических процессов, характерных при разрядноимпульсной обработке минеральных ассоциаций, технологических пульп и суспензий, позволяющие реализовать новые технологии в операциях рудоподготовки, разделения фаз в технологических растворах и пульпах. В книге также описаны теоретические исследования нелинейных волновых процессов в жидких и полидисперсных средах и их прикладные результаты.

Для специалистов, решающих проблему повышения полноты и комплексности извлечения полезных ископаемых из минерального сырья, и студентов горных и металлургических специальностей.

66 К 66. г. Красноярск-05.
И. В. Вавилова, 08.

БИБЛИОТЕКА ЦЕНТРА ЦВЕТНЫХ МЕТАЛЛОВ
УДК 622.235:622.765.5:620.191.1
ББК 33.4

ISBN 978–5–7638–0808–7

© Сибирский федеральный
университет, 2008

ОГЛАВЛЕНИЕ

Предисловие.....	3
Введение.....	4
1. Анализ комбинированных методов обогащения минерального сырья на основе энергетических воздействий.....	6
1.1. Энергетические методы подготовки минерального сырья к обогащению.....	6
1.2. Комбинированные методы направленного изменения поверхностных свойств минералов.....	9
1.3. Разрядноимпульсные методы в обогащении и гидрометаллургии.....	13
2. Методические принципы исследований.....	26
2.1. Область исследований, технологическое оборудование и инструмент.....	26
2.2. Исследование физико-химических характеристик рабочей среды и динамических процессов.....	34
3. Теоретические исследования нелинейных волновых процессов в жидких и полидисперсных средах.....	37
3.1. Особенности импульсного воздействия на объект обработки.....	37
3.2. Гидродинамические и теплофизические характеристики импульсного разряда в жидких средах.....	45
3.3. Динамика ударных волн в водных дисперсиях минералов.....	51
4. Интенсификация рудоподготовки на основе разработанной теории.....	67
4.1. Разупрочнение минеральных сростков высокоэнергетическим импульсным воздействием.....	67
4.2. Исследование по избирательному раскрытию минералов.....	71
4.3. Исследования структурно-химических изменений минералов при импульсном воздействии.....	76
5. Разрядноимпульсные методы в комбинированных схемах основного обогащения сульфидных руд.....	82
5.1. Исследование влияния высокоэнергетического импульсного воздействия на физико-химические свойства жидкой фазы пульпы.....	82

5.2. Исследование возможности активации реагентов.....	87
5.3. Интенсификация коллективной флотации полисульфидных руд высокоэнергетическими импульсными методами.....	90
5.4. Высокоэнергетические импульсные методы в операции разделения коллективных концентратов.....	105
6. Импульсные методы в комбинированных схемах переработки труднообогатимых окисленных руд.....	114
6.1. Комбинированные методы подготовки труднообогатимых руд к флотации.....	114
6.2. Методические особенности исследований по переработке окисленных руд.....	116
6.3. Исследование влияния расхода сульфидизатора на степень сульфидирования при разрядноимпульсном воздействии.....	120
6.4. Исследование фазовых превращений в оксидах меди при взрывной детонационной обработке.....	123
6.5. Изучение добавок различных восстановителей при разрядноимпульсной обработке на флотацию окисленных руд.....	129
7. Высокоэнергетические импульсные методы в гидрометаллургических процессах.....	142
7.1. Исследование влияния импульсных полей взрывного типа на свойства водных дисперсных коллоидных систем.....	142
7.2. Экспериментальное изучение кинетики осаждения коллоидных частиц.....	147
7.3. Высокоэнергетические методы в освещении флотационных стоков и в системах водооборота.....	151
7.4. Сгущение концентратов и разрушение флотационных пен.....	155
7.5. Импульсные методы в комбинированных технологических схемах переработки золотосодержащих руд и отходов обогащения.....	159
7.6. Исследование возможности применения импульсных методов для интенсификации процесса выщелачивания платино-палладиевых катализаторов.....	180
7.7. Высокоэнергетическая импульсная интенсификация процесса автоклавного разложения пирротинового концентрата.....	184
Заключение.....	193
Библиографический список.....	198

ПРЕДИСЛОВИЕ

Освоение месторождений минерального сырья и его переработка в последние годы значительно усложнились, что связано, с одной стороны, с вовлечением в разработку все более бедных руд и окисленных соединений, с другой – с недостаточным их обогащением. Эти обстоятельства являются причиной постоянного поиска новых технологий и средств, призванных повысить качество перерабатываемого сырья и снизить его потери.

В настоящей работе обобщены результаты исследований перспективного, но недостаточно полно изученного разрядноимпульсного метода воздействия на минеральное сырье в технологиях его переработки, выполненные под руководством автора в Красноярском институте цветных металлов за последние двадцать пять лет.

В восьмидесятые годы прошлого столетия появились публикации, в основу которых была положена гипотеза о практически неограниченном и всегда эффективном в технологическом и экологическом аспектах применении электроимпульсного метода обработки материалов. Фактические возможности метода исследовались в данной работе.

Достаточно обширный комплекс лабораторных и производственных исследований выполнен творческим коллективом института в составе: А.В. Галайко, И.Н. Голышевой, И.А. Попова, А.И. Рюмина, А.Г. Степанова, Т.А. Стрекаловой, А.И. Титовской, М.Г. Художитковой, И.И. Шепелева.

Исследования по сульфидированию и выщелачиванию проведены совместно с другими организациями: Гинцветмет (В.В. Мечев, В.А. Щербаков), ИХХТ СОРАН (В.Г. Кулебакин, А.М. Жижаяев), СибцветметНИИпроект (В.Е. Аврамов, И.Е. Хмельковский). Узлы разрядноимпульсных установок изготавливались при участии НПО «Сибцветметавтоматика».

Автор выражает глубокую благодарность старшему преподавателю Н.М. Капличенко за помощь в подготовке данной работы к публикации.

ВВЕДЕНИЕ

Современное состояние минерально-сырьевой базы страны и объективно сложившиеся тенденции развития горного производства и металлургии определяют необходимость создания и широкого применения технических средств и технологий для комплексного и более полного извлечения полезных ископаемых из недр и добытого сырья на стадии переработки.

Развитие ресурсосберегающих технологий при добыче полезных ископаемых все более прочно основывается на расширении вовлечения в разработку запасов, традиционно считавшихся забалансовыми, и полезных ископаемых, сконцентрированных в техногенных месторождениях, что увеличивает сырьевую базу. Вместе с тем переработка рудного сырья сопровождается неоправданно высокими потерями, достигающими только в оловянной, свинцово-цинковой и медной отраслях 52–60 %.

Несовершенство перерабатывающего производства зачастую обусловлено объективными причинами, главной из которых акад. Б.Н. Ласкорин считает практическую невозможность использовать традиционные методы для интенсификации процессов обогащения полезных ископаемых. В результате этого только в цветной металлургии теряется более 15 % меди, 50 % цинка, 45 % серы и 13–14 % благородных металлов. Ужесточение природоохранного законодательства еще более обостряет проблему повышения полноты и комплексности использования минерального сырья.

В этих условиях все большее внимание уделяется разработке комбинированных схем и технологий, в том числе основанных на энергетических воздействиях, к числу которых относятся высокоэнергетические импульсные методы, базирующиеся на весьма кратковременном действии источника мощного импульса. Источниками такого воздействия являются взрыв химических ВВ и высоковольтный электрический разряд в жидких полидисперсных средах, осуществляемый пробоем межэлектродного промежутка либо взрывным испарением проводника малого сечения, замыкающего разрядный промежуток.

Широкие возможности высокоэнергетических методов в переработке минерального сырья до последнего времени не находили достаточно полного применения по ряду причин. К основным из них можно отнести следующие: отсутствие достаточно глубокого научного изучения процессов, происходящих в технологической среде при импульсном воздействии; неопределенность области применения таких воздействий

с экстраполяции отдельных успешных случаев их практической реализации на множество отраслей научной и практической деятельности, что необоснованно создает ложное представление о всеприемливости высокоэнергетических импульсных методов, в том числе в химической технологии; отсутствие достаточно достоверной опытно-промышленной оценки технологий на базе импульсных методов; крайне ограниченная номенклатура конкретных решений по применению импульсных методов в ресурсосберегающих технологиях переработки минерального сырья.

Таким образом, высокоэнергетические импульсные методы в комбинированных технологиях переработки минерального сырья, призванных повысить полноту и комплексность его использования при одновременном снижении антропогенной нагрузки в районах размещения территориально-промышленных комплексов, требуют научного обоснования и широкого промышленного освоения.

Для достижения поставленной цели в данной работе определен комплекс основных задач. В части возможных границ проблемы выполнены следующие: произведен анализ проблемы рационального освоения месторождений руд цветных металлов, основанный на ресурсосбережении и оптимальном природопользовании; обоснована область применения высокоэнергетических импульсных методов воздействия на технологические объекты при освоении минеральных ресурсов месторождений на стадии переработки минерального сырья.

В дополнение к опубликованным сведениям по теории импульсных воздействий представлены результаты изучения динамики ударных волн, возникающих при импульсном воздействии в многокомпонентных средах; качественно-количественной оценки системы прямых и отраженных волн сжатия и растяжения и научного обоснования их роли в процессах фрагментации твердой фазы минеральной пульпы, разупрочнения и избирательного раскрытия минеральных ассоциаций; исследования физико-химической механики дисперсных систем в сильных импульсных полях; кинетики реологических, структурно-химических, физико-химических изменений в жидкой и твердой фазах многокомпонентных сред; оценки качественных и количественных характеристик импульсной обработки растворов, суспензий и пульпы различного минералогического состава; оптимизации параметров импульсного воздействия; физического моделирования импульсного разряда в технологических объектах с различными исходными характеристиками; лабораторной и укрупненно-лабораторной оценки импульсных методов в комбинированных технологиях переработки минерального сырья и отходов горного и металлургического производств.

Реализация теоретических и лабораторных исследований отражена в разработке новых технологий переработки минерального сырья, обеспечивающих реализацию принципов ресурсосбережения и рационального природопользования; технико-экономическом сравнении разработанных и традиционных технологических схем с целью экономической и природоохранительной оценки применения импульсных методов в процессах переработки минерального сырья; разработке рекомендаций для промышленного применения высокоэнергетических импульсных методов в процессах рудоподготовки, основного обогащения и гидрометаллургии.

Автор выражает уверенность, что предложенные читателю материалы позволят не только дополнить теоретические сведения о механизме действия разноимпульсных полей на водные дисперсии минералов, но и расширить область их использования для обработки полидисперсных систем.

1. АНАЛИЗ КОМБИНИРОВАННЫХ МЕТОДОВ ОБОГАЩЕНИЯ МИНЕРАЛЬНОГО СЫРЬЯ НА ОСНОВЕ ЭНЕРГЕТИЧЕСКИХ ВОЗДЕЙСТВИЙ

1.1. Энергетические методы подготовки минерального сырья к обогащению

По определению акад. Л.А. Барского комбинированная переработка минерального сырья представляет собой сочетание методов и процессов обогащения и металлургии для наиболее эффективного разделения компонентов. В основе технологии разделения компонентов по их физическим и физико-химическим свойствам лежит создание градиента концентрации частиц минералов, ионов или молекул в жидкой или газовой фазе, а также на границах раздела фаз с помощью различных внешних воздействий [1].

Объективно сложившиеся тенденции развития сырьевой базы цветной металлургии предопределили два основных направления переработки минерального сырья. Первое направление основано на тради-

ционных технологиях переработки с получением на стадии обогащения моноселективных концентратов и последующей комплексной переработкой их по известным пиро-, химико-, гидрометаллургическим технологиям. Это направление по-прежнему сохраняет свое значение при переработке руд по характеристикам вещественного состава, относящихся к легкообогатимым. Совершенствование традиционных технологий на стадии обогащения преследует цель повысить полноту извлечения полезных компонентов из исходного сырья при одновременном снижении антропогенного воздействия обогатительного производства на окружающую среду. Один из путей развития направления – создание высокоэффективных комбинированных процессов и комбинированных технологических схем.

Второе направление охватывает труднообогатимое сырье, отличающееся сложным вещественным составом. Основано оно на комбинированных технологиях, предусматривающих на стадии обогащения выделение в моноселективные концентраты части полезных компонентов, а в последующих стадиях перевод трудноразделяемых минеральных ассоциаций в полиметаллические продукты и дальнейшую их селекцию пиро-, гидрометаллургическими и обогатительными методами.

В процессах первичной переработки минерального сырья можно выделить две основные группы методов, применяемых в комбинированных процессах и схемах обогащения: энергетические и химико-металлургические.

Анализ опубликованных сведений [2–12] показывает, что химико-металлургическая подготовка к последующим операциям обогащения основана на направленном превращении минералов, не связанном с механическим раскрытием сростков, изменением размера или формы вкрапленности.

К таким процессам, по мнению А.М. Гольмана [12], следует отнести четыре группы процессов: перевод кристаллов полезного компонента из одной аллотропической модификации в другую; изменение химического состава минерала; раскрытие сростков выщелачиванием или перевод в газовую фазу одной из составляющих сростка; перевод в жидкую или газовую фазу полезного компонента или вмещающей породы.

Применение химико-металлургических методов на стадии доводки существенно увеличивает полноту и комплексность переработки минерального сырья. Ряд исследователей Гинцветмета [13] отмечает, что резкий «прорывной» скачок в повышении комплексности использования руд может обеспечить только переработка минерального сырья по комбинированным технологиям, сочетающим обогатительные и химико-металлургические методы.

Выбор эффективных методов на стадии обогащения базируется на совершенствовании и разработке методов и способов предварительного разупрочнения и избирательного раскрытия минералов и на направленном изменении поверхностных свойств минералов, включая, как следствие, фазовые превращения поверхностных соединений. Эта задача во многом решается применением энергетических воздействий. Так, при наличии упрочненных рудообразующих компонентов и зон срастания, отличающихся от теоретической модели раскрытия минералов (на основе представлений о разрушении полиминеральных кристаллических агрегатов, гипотезы Гриффитса о трещинообразовании и механохимической теории Ребиндера), возникает необходимость в предварительном разупрочнении.

Принципиально возможны несколько путей реализации разупрочнения, определяемых в каждом конкретном случае физико-механическими свойствами минеральных компонентов руд, причем вид разупрочняющего воздействия определяется видом энергии. По этому принципу применяются традиционные механические пульсирующие нагрузки, воздействие энергией ударных волн в водной или газообразной средах, термическая обработка нагревом или охлаждением либо сочетанием нагрева в одной среде с охлаждением в другой и прочие виды энергетического воздействия в специально разрабатываемых аппаратах на основе эффектов электрострикции, магнитострикции, электртрического пробоя и др.

При разупрочнении мощность энергетического воздействия, приходящаяся на сrostок, с одной стороны, должна обеспечивать развитие микротрещин в зоне контакта, т.е. достижение усталостного разупрочнения. С другой стороны, по данным В.И. Ревнивцева, должны быть соблюдены некоторые условия [14]:

- деформационные нагрузки должны быть растягивающими или сдвиговыми;
- независимо от вида энергии единичная мощность воздействия должна вызывать разрушение только зоны контакта, не сказываясь на усталостной прочности кристаллов;
- частота энергетических воздействий и скорость деформации должны выбираться из условия снижения потерь энергии на пластическую деформацию материала, а продолжительность растягивающих воздействий должна быть достаточной для диффузии поверхностно-активных веществ.

Традиционные механические методы раскрытия минеральных агрегатов, как правило, основаны на избыточности напряжений деформации. Как считает проф. А.А. Абрамов [15], по этой причине широко используемые методы дробления и измельчения не позволяют раскрыть

полезные минералы в руде со степенью селективности, необходимой для технологии последующего обогащения.

При избирательном раскрытии нашли применение аппараты, действие которых основано на использовании электрогидравлического эффекта, электрических импульсов, знакопеременных (растягивающих, сжимающих, сдвиговых) нагрузок, взрывного и взрывоструйного самоизмельчения (предложения Гросса и Снайдера).

В интенсификации процесса раскрытия минералов особое место занимает электрохимическая технология, предложенная и фундаментально разработанная проф. В.А. Чантурия. По этой технологии на руду, измельчаемую в шаровой мельнице, оснащенной системой кольцеобразных электродов, накладываются электрохимические воздействия. При поляризации сульфидных руд при мокром измельчении на границе контакта минералов протекают электрохимические реакции с образованием новых продуктов и в итоге происходит разрушение частицы по границам срастания. Одновременно при наложении электрического тока на минеральные суспензии возникает направленный поток электронов, ускоряющий диффузию дислокаций из объема минерала к границам зерен и плоскостям срастания. В конечном счете производительность процесса измельчения повышается на 10–15 % с увеличением степени раскрытия минералов.

В.Я. Богусловский и В.Ю. Петров предложили комбинированный способ дезинтеграции руды, основанный на сочетании электрической и ультразвуковой энергий, действующих на минеральную среду в пульпе. При этом часть ударных волн, обладающих сверхзвуковой скоростью, поглощается на плоскостях спайности агрегатов, составляющие которых имеют различную акустическую характеристику, что сопровождается раскрытием агрегатов.

Ультразвуковые колебания высокой интенсивности используются для раскрытия минералов комбинированной обработкой на базе ультразвукового и электромагнитного методов, описанных Ю.П. Ереминым и Т.В. Глембоцкой [17]. Анализ перспективных разработок, основанных на вибрационном воздействии с целью интенсификации процессов обогащения, выполнен Т.Г. Томовым [18].

1.2. Комбинированные методы направленного изменения поверхностных свойств минералов

Как отмечает проф. В.А. Чантурия, вовлечение в переработку труднообогатимых руд сложного вещественного состава возможно при

использований химико-металлургических методов переработки или разработке методов повышения контрастности технологических свойств минералов с последующим обогащением сырья классическими методами обогащения либо комбинирование обоих процессов. Преимущество последнего направления по сравнению с первым заключается в значительно меньших энергетических затратах и отсутствии дополнительных капитальных затрат на строительство новых производственных цехов [16].

Направленное изменение поверхностных свойств минералов достигается энергетическими воздействиями при различных методах: электрохимических, термохимических, гидротермальных, термальном сульфидировании, ультразвуковом, радиационных, электронно-лучевых, плазменных, электровзрывных и других.

Передовые позиции в исследовании этой области занимали Институт проблем комплексного освоения недр, Гинцетмет, Механобр, Унипромедь, НИИ ВН ТПИ, ПКБ Электрогидравлики (Украина).

Анализируя разработанные способы направленного изменения свойств минералов, Д.Н. Абишев [19] подразделяет их на два вида. Первый характеризуется кардинальным изменением свойств сопутствующих им ценных минералов и полной перестройкой структуры их кристаллической решетки путем термических и термохимических воздействий. К этому виду из числа методов, основанных на энергетических воздействиях, следует отнести термомагнитное обогащение пиритсодержащих материалов [20] и группу методов, базирующихся на термической обработке руд без их расплавления – термическое обогащение. Обжиг руд подразделяется на следующие виды: с термической диссоциацией соединений, окислительный и сульфатизирующий, хлорирующий и восстановительно-хлорирующий.

По данным М.С. Зака, Е.Ф. Чехова и др. [21], известна комбинированная технология, основанная на хлоридовозгоночном обжиге в печах кипящего слоя и гидрометаллургии хлоридовозгонов с использованием твердого хлоринатора (хлористого кальция, вводимого в кипящий слой в виде порошка или водного раствора), позволяющая в сочетании с окислительным и магнетирующим обжигами комплексно перерабатывать сульфидное и окисленное полиметаллическое сырье с извлечением цветных металлов и железа. Такая технология обеспечивает комплексную переработку труднообогатимого сырья.

Прошла испытания комбинированная схема, включающая автоклавное выщелачивание с дальнейшим высокотемпературным гидролизом и получением в итоге цинка из оксидов железа. По данным В.В. Беликова, В.А. Конева, Е.В. Кондукова и др. авторов [22], выщелачивание сравнительно бедных коллективных концентратов в две стадии с высокотемпературным гидролизом является эффективным.

Повышение эффективности флотации по предложению В.А. Луганова, М.Ж. Садыкова, Т.К. Ушакова, Н.Е. Роммбетова [23] возможно селективным сульфидированием, в том числе высокотемпературным сульфидированием парообразной серой окисленных соединений свинца и цинка при парциальном давлении серы в газовой фазе выше 2 Па. Этими же авторами предложен комбинированный метод переработки окисленных и смешанных труднообогатимых руд, включающий сульфидирующий обжиг, совмещенный с автогенным пирротинизирующим обжигом пиритных концентратов, с последующей переработкой огарков методами флотационного и магнитного обогащения.

Гинцветметом совместно с Красноярским институтом цветных металлов [24] предложен комбинированный метод подготовки к флотации путем теплового сульфидирования элементной серой, сероводородом и газовой смесью, состоящей в основном из паров серы и сероводорода в соотношениях, близких к восстановленной газовой смеси в плавильных агрегатах, и их флотации.

Для переработки сульфидных свинцово-цинковых промпродуктов Б.Б. Бейсамбаевым с соавторами разработаны технологии [25], использующие методы горячей (260–270 °С) и холодной (без нагревания) сульфатизации концентрированной серной кислотой, позволяющие эффективно переводить в растворимые формы сульфидные соединения свинца и цинка.

Согласно исследованиям И.Н. Плаксина, И.Н. Шафеева, В.А. Чангурия, С.Б. Леонова, поверхностные свойства минеральных частиц изменяются воздействием ионизирующих облучений, положенных в основу радиационно-химических способов интенсификации процессов обогащения за счет избирательного изменения флотационных свойств минералов и реагентов-собирателей [26–28]. Воздействие гамма-излучения на сульфидные минералы приводит к различным результатам в зависимости от степени окисленности, создает условия для восстановления поверхности аналогично воздействию сернистого натрия.

Согласно патенту США [29], извлечение меди при флотации можно повысить путем предварительной обработки пульпы ионизированным сульфидом. По данным Г.Р. Бочкарева, В.И. Ростовцева и др., предварительная обработка руды ускоренными электронами при измельчении вызывает перераспределение выхода классов в измельченном продукте, причем растет выход технологически ценных классов и улучшаются показатели флотации [30]. В этой же работе отмечается, что обработка ускоренными электронами усиливает магнитные свойства слабомагнитных железосодержащих минералов в железных и других рудах.

Для ускорения химических реакций, процессов растворения, кристаллизации может использоваться электромагнитная пульпоподготовка. Как отмечает В.И.Классен [31], при электромагнитной обработке воды и пульпы свойства среды изменяются в зависимости от напряженности энергетического поля, причем изменения носят периодический характер.

Промышленные испытания ультразвуковой обработки пульпы, выполненные Ю.П. Ереминым, Т.В. Глембоцкой, А.З. Аксеновым, показали, что такая обработка приводит к улучшению показателей извлечения, особенно при обработке в высокочастотном (18–22 кГц) диапазоне [32; 33]. Положительные результаты ультразвуковой обработки были получены Н.Н. Хавским, А.А. Вершицким и в гидрометаллургических технологиях [34].

Из числа энергетических методов следует отметить также описанное В.Г. Кулебакиным механическое активирование в комбинированных гидрометаллургических процессах [35] и тонкое измельчение в специальных измельчителях с повышенной кинетической энергией разрушения, при котором по оценке Т.С. Юсупова растет структурная упорядоченность в поверхностных слоях и возникают некомпенсированные связи, изменяющие энергетическое состояние [36].

Анализируя перечисленные выше комбинированные методы с использованием энергетических воздействий (ударных, термических, звуковых и ультразвуковых, радиационных, электромагнитных и др.) для направленного изменения поверхностных свойств минералов, можно сделать вывод, что, обладая в каждом конкретном случае несомненными достоинствами, они требуют достаточно сложного аппаратного обеспечения, при этом ряд методов отличается повышенной опасностью для персонала (например, на основе ионизирующих облучений) либо окружающей среды (хлорирующий и восстановительно-хлорирующий обжиг). Решение всего комплекса вопросов технологического применения этих методов предопределяет высокие капитальные и эксплуатационные затраты.

Этих недостатков лишена весьма эффективная электрохимическая технология, научно обоснованная проф. В.А.Чантурия [16; 26–28; 37–40]. Глубокая научная проработка и сравнительная технологическая простота обусловили наиболее широкое использование электрохимической технологии из числа методов, основанных на энергетических воздействиях. Электрохимическая технология нашла применение практически во всех операциях технологической цепочки обогащения минерального сырья.

Детальное изучение электрохимических и сорбционных процессов в условиях пульпо- и водоподготовки, предварительной обработки растворов реагентов позволило вскрыть механизм активации и депрес-

сии минералов, изучить кинетику и продукты электрохимических реакций, определяющих последующее флотационное поведение сульфидов, магнитные свойства слабомагнитных железных минералов, и на его основе разработать научные принципы выбора параметров отработки, конструкции промышленных аппаратов и определить новые направления использования электрохимических воздействий в процессах обогащения и гидрометаллургии. Электрохимические воздействия на различные компоненты пульпы, ионный состав промышленных вод позволяють за счет повышения контрастности свойств минералов интенсифицировать все процессы обогащения – от измельчения руд до обезвоживания концентратов [16].

1.3. Разрядноимпульсные методы в обогащении и гидрометаллургии

Анализ обширного количества отечественных и зарубежных публикаций, начиная с 1955 г., когда инженер Л.А. Юткин впервые предпринял попытку объяснить технологические особенности подводного электрического взрыва, назвав последний электро-гидравлическим эффектом (эффектом Юткина), показывает, что в области электрического взрыва нет установившейся терминологии. Основная причина этого лежит в принципиально разном подходе к комплексу явлений, сопровождающих импульсный разряд в жидкости.

Если В.Н.Чачин и К.Н. Богоявленский [41] собственно метод называют «импульсным», а способ обработки «электрогидравлическим», то Г.А. Гулый технологию называет «электрогидравлической» [42]. Г.Б. Муравин, А.В. Бурштейн, М.Л. Левзинская, Л.И. Масс [43] вводят понятие «электрогидро-динамический способ», Ю.П. Емец [44] подводный электрический взрыв называет «сильноточным разрядом в жидкости», а В.А.Ушаков [45] технологии на такой основе – «электроимпульсными», в то время как Л.Я. Попилов [46] технологии на основе электрического взрыва в воде называет «электрофизическими», равно как и В.П. Смоленцев [47]. В.С. Голдаев [48] собственно процесс определяет как «импульсный разряд в жидкости», а В.А. Бурцев с соавторами [49] – «электроимпульсный способ». Группа исследователей ПКБ Электрогидравлики [50] комплекс явлений, сопровождающих электрический разряд в воде, объединяют понятием «высокоэнергетический разряд». В литературе присутствует [48] понятие «высоковольтный электроимпульсный разряд», что вносит еще больше путаницы в терминологию.

В связи с этим терминология в данной области знаний нуждается в уточнении.

Исходным признаком технологий, основанных на энергетическом воздействии на объект обработки, с одной стороны, является весьма кратковременный (до 150 мкс) характер единичного воздействия, т.е. импульсное воздействие, одним из источников которого является электрический разряд в технологической среде в режиме короткого замыкания. С другой стороны, как отмечает А.Л. Лифшиц [51], характерной особенностью электротехнологических процессов и установок является то, что энергия электрического тока непрерывно или импульсно подводится непосредственно к технологическому объекту, минуя промежуточные преобразования в другие виды энергии. В самом объекте (его рабочей зоне) электрическая энергия преобразуется в механическую, тепловую или химическую виды энергии, обуславливающие порознь или совместно реализацию заданного технологического процесса, т.е. зона преобразования энергии является нагрузкой – приемником энергии.

Непрерывные электротехнологические установки (электрометаллургические, электролитического рафинирования, электролиза, нагрева, плавления и др.) отличаются от импульсных (электроэрозионных, лазерных, электроннолучевых, магнитно-импульсных, электрогидравлических) только режимом воздействия на объект обработки, при этом импульсные установки имеют, как правило, ряд технологических преимуществ, обусловленных временными характеристиками ввода энергии.

Таким образом, по совокупности признаков методы, основанные на импульсном вводе энергии в технологическую среду или в объект обработки при электрическом разряде, следует называть разрядноимпульсными. Разрядноимпульсными технологиями предложил называть такие методы и П.П. Малюшевский [52], однако, на наш взгляд, стремление автора этой работы отделить таким названием рассматриваемые технологии от электроимпульсных ввиду «электротермического воздействия в последних на объект обработки» не совсем корректно. Электроимпульсные методы, безусловно, являются разновидностью разрядноимпульсных, т.к. у них одинаковый инструмент воздействия на вещество – электрический разряд.

Разрядноимпульсные методы могут выступать в качестве самостоятельных (а в ряде случаев и единственно возможных) технологий либо являться частью классических технологий (схем, методов), создавая в совокупности с ними комбинацию.

На рис. 1.1 представлена классификация разрядноимпульсных методов обработки. Согласно данной классификации, все разрядноимпульсные методы делятся на две группы – контактные и бесконтактные.

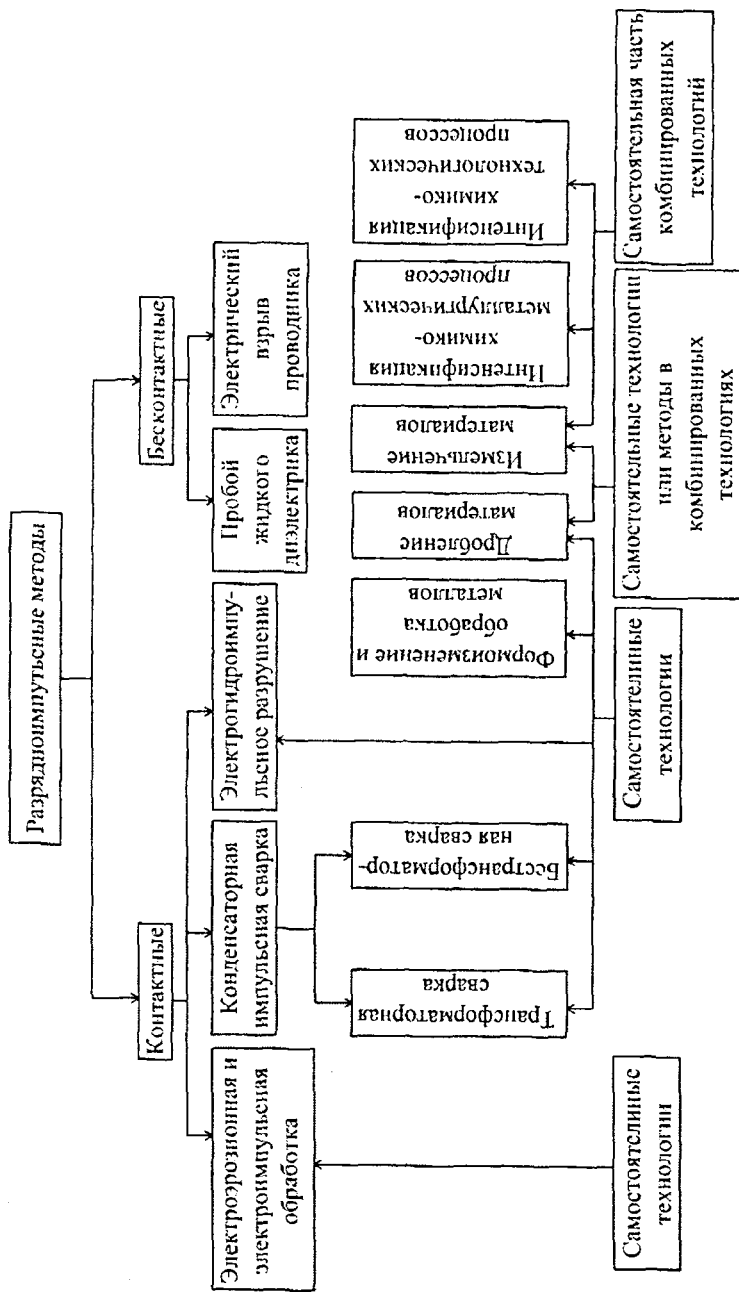


Рис. 1.1. Классификация импульсных методов

В контактных методах один или оба электрода являются технологическим объектом. В первом случае межэлектродное пространство заполнено жидким диэлектриком, осуществляющим захват и эвакуацию частиц, образующихся при разрушении одного из электродов. Примером таких методов в виде самостоятельных технологий, широко применяющихся в промышленности, является обработка материалов в размер – электроэрозионная обработка. Особенность таких технологий – высокая электропроводность материала разрушаемого электрода.

Бесконтактные разрядноимпульсные методы предусматривают наличие электродной системы, независимой от технологического объекта, в связи с чем электропроводность последнего играет пассивную роль, хотя и может влиять на физико-химию протекающих процессов.

В бесконтактных методах принципиально возможны два случая развития электрического разряда. В первом случае начальная стадия разряда формируется в процессе образования парожидкостного канала разряда при пробое жидкого диэлектрика. При этом расстояние между электродами является одним из наиболее важных параметров. Во втором случае межэлектродный промежуток замкнут электрическим проводником, характеристики которого обеспечивают мгновенное испарение при протекании по нему тока разряда, и ввод энергии в технологическую среду осуществляется через образовавшийся между электродами канал со свойствами, весьма близкими к свойствам низкотемпературной плазмы. Частным случаем применения бесконтактных методов является метод, при котором межэлектродный промежуток замыкается твердым диэлектриком при наличии в рабочей камере жидкой фазы. Последнее способствует электрическому пробое диэлектрика с развитием канала разряда от анода к катоду, что приводит диэлектрик в сложное напряженное состояние и вызывает взрывную фрагментацию твердого.

Следует отметить, что в реальных условиях технологическая среда лишь условно может быть названа жидким диэлектриком, поскольку она всегда обладает некоторой электропроводимостью.

При прочих равных условиях гидродинамические характеристики электрического взрыва проводника более высокие, чем при пробое жидкости или твердого диэлектрика, причем изменением геометрической формы проводника можно существенно изменять начальные условия формирования фронта волны.

Вследствие большой разновидности электровзрывных установок (в отечественной промышленности используется более 1 000 установок различного назначения), отличающихся прежде всего энергетическими параметрами и исполнением рабочего органа, возникает необходимость

классификации установок по энергии единичного импульса. П.П. Малушевский предлагает [52] рассматривать три области энергий в импульсе: область малых энергий (1–1 000 Дж); область средних энергий (1–100 кДж); область высоких энергий (более 100 кДж). Такое деление является условным, поскольку импульсные разряды любой мощности относятся к высокоэнергетическим методам, однако оно дает возможность оценить место оптимальной области энергии воздействия с целью последующего аппаратного обеспечения конкретной технологии. Таким образом, из числа высокоэнергетических методов воздействия на обрабатываемые материалы можно выделить разрядноимпульсные методы, которые могут выступать как самостоятельные технологии, так и в комбинации с другими методами.

На выбор параметров и характеристик генератора импульсов основное влияние оказывают особенности нагрузки (приемника энергии), обладающей свойствами, отличающимися от свойств классических линейных и нелинейных приемников энергии. Условия осуществления разрядноимпульсной обработки определяются некоторыми общими физическими условиями, тесно связанными с эффектами, зависящими как от источника импульсов, так и от технологического объекта, причем общие условия должны быть необходимыми и достаточными.

Первое условие – обеспечение концентрации процесса во времени. Под такой концентрацией следует понимать управление продолжительностью энергетического воздействия на технологический объект. Необходимость такого управления определяется технологическими требованиями (оптимальным режимом разноимпульсной обработки в целях измельчения, селективного раскрытия минералов, модифицирования поверхности, интенсификации физико-химических процессов) и техническими (стойкостью электродов, необходимостью ввода в технологический объект продуктов эрозии электродов из определенных материалов, активно участвующих в химических реакциях).

Кроме того, импульсное управление процессом во времени является необходимым, т.к. сам процесс обладает эффектом торможения (см. гл. 3), уменьшая который можно достичь перехода вещества технологического объекта в новое состояние, характеризующееся новыми свойствами объекта.

Второе условие – локализация процесса в заданном объеме технологического объекта. Это условие определяет плотность мощности и концентрацию энергии в объеме приемника энергии, т.е. интенсивность энергетического воздействия. Локализация процесса обеспечивается наличием канала разряда с заданными линейными характеристиками и последовательной сменяемостью единичного объема технологического объекта.

Третье условие – повторяемость или избирательность процесса. Повторяемость заключается в возможности получения для каждого единичного объема технологического объекта идентичных параметров импульсных воздействий; избирательность предусматривает управление разрядноимпульсными процессами в зависимости от исходных свойств технологического объекта и ожидаемых качественно-количественных результатов обработки.

Физические процессы разрядноимпульсной обработки, происходящие в ограниченной рабочей зоне, имеют общий источник энергии – канал разряда, который, как уже отмечалось, является высококонцентрированным преобразователем электрической энергии в другие виды энергий. Схема взаимосвязей основных физических процессов разрядноимпульсной обработки и влияние этих процессов на выходные показатели при переработке минерального сырья приведена на рис. 1.2.

Типичным процессом инициирования разряда является пробой межэлектродного промежутка в жидкости под действием электрического напряжения, возникающего на электродах при подключении к ним заряженного конденсатора (рис. 1.3). Процессы в канале разряда и в электродных системах различной геометрии всесторонне изучены, причем научный приоритет в данной области разрядноимпульсных технологий принадлежит исследователям ПКБ Электрогидравлики (г. Николаев).

Общее описание процессов в канале разряда ограничим исследованиями, приведенными в работе [53]. Согласно этим исследованиям, при разряде изменение тока и напряжения в разрядном промежутке протекает в три стадии (рис. 1.4). На стадии I напряжение достигает максимума и в разрядном промежутке появляется ток. На стадии формирования разряда (стадия II) характерны некоторый рост тока и начало спада напряжения, при этом завершается образование высокопроводящего канала электрического разряда. В канал разряда за время 10–100 мкс вводится энергия, накопленная батареей конденсаторов, и происходит разогрев вещества канала до температуры $(20-40) \cdot 10^3$ °C, а давление поднимается до $(3-10) \cdot 10^2$ МПа. В результате этого давления канал расширяется, формируя фронт ударной волны (стадия III).

Процессы, происходящие в электродной системе, включают термохимические процессы, обусловленные практически мгновенным разогревом вещества в межэлектродном промежутке, и эрозию электродов.

Последний процесс, с одной стороны, в общепринятых технологиях является нежелательным, так как приводит к загрязнению технологической среды продуктами эрозии, снижая тем самым диэлектрические свойства среды и ухудшая условия последующих разрядов, и снижает стойкость электродной системы.