

На правах рукописи



СМАЙЛОВ БЕРИК БОЛАТОВИЧ

**РАЗРАБОТКА СПОСОБА ОЦЕНКИ ОБОГАТИМОСТИ
И МОДЕЛИРОВАНИЯ ФЛОТАЦИОННЫХ СХЕМ ПЕРЕРАБОТКИ
ТРУДНООБОГАТИМЫХ СВИНЦОВО-ЦИНКОВЫХ РУД**

Специальность 25.00.13 – «Обогащение полезных ископаемых»

**Автореферат
диссертации на соискание ученой степени
кандидата технических наук**

Москва – 2018

Работа выполнена в Федеральном государственном автономном образовательном учреждении высшего образования «Национальный исследовательский технологический университет «МИСиС» (НИТУ «МИСиС»)

Научный руководитель:

Шехирев Дмитрий Витальевич, кандидат технических наук, старший научный сотрудник, профессор кафедры обогащения и переработки полезных ископаемых и техногенного сырья Горного института НИТУ «МИСиС».

Официальные оппоненты:

Петров Игорь Михайлович, доктор технических наук, генеральный директор ООО «Исследовательская группа «Инфолайн».

Ануфриева Светлана Ивановна, кандидат химических наук, заведующий технологическим отделом ФГБУ «ВИМС».

Ведущая организация:

Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования «Уральский государственный горный университет».

Защита диссертации состоится 12 марта 2018 г. в 14 час. 00 мин на заседании диссертационного совета Д 002.074.01 при Институте проблем комплексного освоения недр им. академика Н.В. Мельникова РАН по адресу: 111020, г. Москва, Крюковский тупик, д. 4; тел./факс 8 (495) 360-89-60.

Отзывы на автореферат в двух экземплярах, заверенные печатью, просим направлять в адрес совета.

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке ИПКОН РАН и на сайте www.ипконран.рф.

Автореферат разослан « ____ » _____ 2018 г.

Ученый секретарь
диссертационного совета,
доктор технических наук



Матвеева Г.Н.

ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

Актуальность работы:

Среди запасов сульфидных руд цветных металлов, в том числе свинцово-цинковых руд, имеется значительная доля труднообогатимых, упорных.

По данным академика В.А. Чантурия, существенная часть еще не разрабатываемых рудных месторождений России, учтенных Государственным балансом, по многим видам полезных ископаемых может перейти в категорию забалансовых. Переработка этих руд с применением традиционных технологий окажется нерентабельной из-за низких технологических показателей. Например, переоценка месторождений с учетом указанного фактора показала, что в категорию забалансовых перейдут 34 % свинцовых руд.

Для разработки новых, в том числе комбинированных, технологий требуются новые способы анализа обогатимости, устанавливающие конкретные, связанные с вещественным составом, причины упорности, трудной обогатимости руд.

Эти способы должны количественно связывать загрязнение концентратов и потери в хвостах с определенными видами минеральных частиц.

В частности, эти способы должны количественно устанавливать, какую роль в низких технологических показателях играет недостаточное раскрытие ценных минералов, а какую – недостаточная селективность разделения минеральных частиц.

Таким образом, актуальность работы обусловлена необходимостью разработки новых способов оценки обогатимости упорных свинцово-цинковых руд, позволяющих, на основании установленной количественной связи особенностей вещественного состава руд с технологическими показателями, научно-обоснованно осуществлять выбор принципиальных технологических схем первичной переработки, определять пути совершенствования режимов и схемных решений.

Для разработки новых способов оценки обогатимости имеется современная аналитическая база, в том числе аппаратные способы так называемой автоматизированной минералогии.

Наиболее широко применяются аппаратно-программные комплексы, основанные на электронной микроскопии с рентгено-флуоресцентным микрозондированием и компьютерном анализе получаемых изображений. Это достаточно близкие по своему функционалу комплексы QEMSCAN и MLA -анализатор раскрытия минералов (США); Mineralogic (Германия); INCAMineral (Великобритания); TИМА (Чехия).

Так, MLA System дает сведения: о минеральном и химическом составе образца; о распределениях по размерам частиц и минеральных зерен; о распределениях минералов по их массовой и поверхностной доле в частицах, об ассоциациях минералов; о теоретических кривых наилучшей взаимосвязи содержания и извлечения любого минерала для множества возможных концентратов этого минерала, которые могут быть получены из изучаемого продукта при данной степени раскрытия.

Главное ограничение способов обработки данных, встроенных в MLA System и другие системы, состоит в том, что они не приспособлены к расчету параметров, сопоставимых по степени детализации учета вещественного состава, характеризующих не продукты по отдельности, а технологическую операцию в целом.

Новые способы оценки обогатимости, на наш взгляд, должны характеризовать результаты технологической операции на основе количественных данных о распределении различных видов минеральных частиц по продуктам обогащения.

Поэтому актуальность работы связана с необходимостью совершенствования способов обработки данных, получаемых средствами автоматизированной минералогии, для использования при оценке результатов технологических операций обогащения руд.

В мировой практике подготовленность частиц к флотационному разделению при заданном реагентном режиме часто характеризуют распределением массы материала и масс его компонентов – элементов, минералов по фракциям, флотирующимся с различной скоростью.

Наиболее полно данный подход развит в трудах О.Н. Тихонова и его школы.

При моделировании схем в рамках данного подхода, на основании кинетики флотации исходного материала, а также его компонентов - элементов или минералов, рассчитывают плотности распределения масс материала и его компонентов по константе скорости флотации (спектры флотируемости). Спектры флотируемости являются характеристикой обогатимости исходного материала при заданном реагентном режиме и служат исходными данными, описывающими его свойства при моделировании схемы.

Таким образом, в классическом варианте нет сведений о том, какие именно виды минеральных частиц отвечают за попадание определенной доли интересующего компонента в ту или иную фракцию флотируемости.

Информация о кинетике флотации и распределении по флотируемости различных видов минеральных частиц даст возможность оценивать и прогнозировать поведение минералов, связанных с различными видами частиц, во флотационных операциях и схемах.

Поэтому актуальным является комбинирование автоматизированной минералогии с изучением кинетики флотации для оценки обогатимости материала и прогноза технологических показателей в схемах циклов флотации с учетом характеристик флотируемости различных видов минеральных частиц.

Работа выполнена на примере тонковкрапленной пробы упорной высокосульфидной свинцово-цинковой руды одного из месторождений бывшего СССР.

Цель работы: разработка способа оценки обогатимости полиметаллических руд и прогноза технологических показателей для различных схем флотации, основанного на данных анализа руд и продуктов с применением средств автоматизированной минералогии и параметрах кинетики флотации

Основные задачи исследований:

- Провести анализ состояния технологий переработки упорных полиметаллических руд, а также современных способов оценки обогатимости руд с привлечением данных технологической минералогии и кинетики флотации.

- Изучить вещественный состав пробы упорной высокосульфидной тонковкрапленной свинцово-цинковой руды, установить, с применением традиционных реагентов, режимы основных операций свинцовой и цинковой флотации, провести в установленном режиме флотационные опыты, в том числе кинетические, изучить полученные продукты с применением методов автоматизированной минералогии.

- Разработать способ оценки предельной, определяемой только раскрытием минералов в результате измельчения, обогатимости полиметаллических руд с учетом возможности получения нескольких конечных продуктов; определить расчетные предельно возможные показатели для изучаемой пробы упорной тонковкрапленной свинцово-цинковой руды для задачи получения свинцового и цинкового концентратов.

- Разработать способ представления руды и продуктов обогащения в виде совокупности сортов частиц, отличающихся друг от друга крупностью частиц и долями поверхности частиц, представленными разными минералами; на основании данных анализа продуктов флотации средствами автоматизированной минералогии, определить принцип разбиения коллектива минеральных частиц на сорта для изучаемой пробы упорной свинцово-цинковой руды.

- Разработать способ оценки результатов обогащения, позволяющий установить сорта частиц, вносящих наибольший вклад в загрязнение концентратов и/или потери ценных минералов; применить его к результатам флотации изучаемой пробы упорной свинцово-цинковой руды.

- Разработать способ оценки поведения различных видов минеральных частиц в процессе флотации, с определением кривых кинетики флотации сортов частиц; установить кинетики флотации сортов частиц, выделенных в составе продуктов флотации изучаемой пробы упорной свинцово-цинковой руды.

- Разработать методику прогноза показателей обогащения свинцово-цинковых руд при использовании различных схемных решений внутри циклов флотации, основанную на использовании в качестве исходных данных спектров флотируемости сортов частиц;

применить ее для выбора схемных решений циклов свинцовой и цинковой флотации изучаемой пробы упорной свинцово-цинковой руды.

- С учетом проведенной оценки обогатимости изучаемой пробы упорной свинцово-цинковой руды и разработанных рекомендаций, предложить и экспериментально проверить схему первичной переработки руды.

Научная новизна работы заключается:

1) в разработке способа оценки предельно возможных показателей обогащения измельченной руды, определяемых только раскрытием минералов, основанный на данных о минералогических характеристиках частиц измельченного исходного материала, предполагающий, что для каждой частицы осуществляется выбор одного из нескольких конечных продуктов, куда следует поместить частицу, в соответствии с ее минеральным составом;

2) в разработке способа оценки результатов обогащения руды, основанного на представлении каждого из продуктов в виде совокупности сортов, отличающихся друг от друга крупностью частиц и долями поверхности частиц, представленными разными минералами, включающий расчет балансов по сортам частиц, и установление сортов, в наибольшей степени ответственных за снижение качества концентратов и/или потери ценных компонентов;

3) в установлении, из экспериментальных данных кинетики флотации пробы свинцово-цинковой руды, с использованием разработанного способа представления продуктов в виде совокупности сортов частиц, кинетики флотации отдельных сортов, в частности, раскрытых частиц галенита, сфалерита и пирита, а также частиц с поверхностью, представленной двумя определенными минералами в заданных диапазонах долей поверхности, в классах крупности -71+45; -45+20; -20+10 и -10 мкм;

Практическое значение работы:

1) Разработана методика прогноза показателей обогащения при использовании различных схемных решений внутри цикла флотации, основанная на анализе продуктов кинетического флотационного опыта средствами автоматизированной минералогии и расчете спектров флотуемости сортов частиц, позволяющая определять для каждого продукта схемы его состав по сортам частиц, а также интегральные минеральный и элементный составы.

2) Предложена комбинированная технология переработки упорной свинцово-цинковой руды, заключающаяся в сочетании открытой прямой селективной флотации с добавлением реагента-депрессора пирита в перечистные операции с получением кондиционного цинкового концентрата и гидрометаллургической переработки свинцово-цинкового промпродукта. Это дало возможность получить 53 % -ный цинковый концентрат при его извлечении 52 %, и извлечь в продуктивный раствор свинца 43,6 % и цинка 22,2 %, суммарное извлечение цинка составило 74,6 %.

Реализация работы: Разработанная методика прогноза показателей обогащения при использовании различных схемных решений внутри цикла флотации принята к использованию ООО «НОРД Инжиниринг» - инжиниринговой компанией, специализирующейся на создании и внедрении технологий переработки сырья в горно-металлургической отрасли.

Методы исследований:

Для решения поставленных задач использовались следующие современные физико-химические и технологические методы:

- Оптическая микроскопия с использованием исследовательского микроскопа промышленного назначения Nikon Eclipse LV 100 с цифровой системой регистрации изображений.

- Гранулометрический анализ продуктов в диапазоне от 10 до 45 мкм с использованием прецизионных аналитических микросит фирмы Fritsch

- Методы автоматизированной минералогии с использованием комплекса MLA System, состоящего из сканирующего электронного микроскопа Quanta 650 и специального программного обеспечения MLA Suite.

- Метод потенциометрии для определения значений рН и Eh в исследуемых водных системах.

- Технологические исследования проведены в лаборатории кафедры обогащения руд МИСиС с использованием современного дробильного, измельчительного, флотационного и вспомогательного, в том числе весового, оборудования.

- Методы математической обработки данных, расчетов, математического моделирования с использованием компьютерных средств Microsoft Access, Microsoft Excel, Delphi 10.1 Berlin Professional.

- Экспресс-анализ элементного состава продуктов рентгено-флюоресцентным методом с использованием аппаратов Excalibur и Elvax.

- Анализ элементного состава продуктов осуществлялся также в специализированных аналитических лабораториях ВИМС, Гиредмета, МИСиС.

Обоснованность и достоверность научных положений и выводов, представленных в работе обеспечивается представительностью исходных данных; использованием современных, в том числе аппаратных наукоемких, средств проведения исследований, основанных на апробированных методиках выполнения измерений; большим объемом лабораторных исследований; воспроизводимостью экспериментов; применением строгих математических методов при обработке результатов, расчетах и моделировании. Подтверждается согласованностью выводов теоретического анализа и данных эксперимента.

Личный вклад автора

Постановка цели и задач, анализ литературных источников, разработка планов экспериментальных исследований, проведение исследований методами автоматизированной минералогии, проведение технологических исследований и выполнение экспресс-анализов, обработка и анализ полученных результатов, разработка экспериментально-расчетных способов оценки обогатимости руды, включая разработку компьютерных средств, подготовка публикаций, апробация материалов на конференциях выполнены автором лично или при его непосредственном участии.

Апробация работы: Основные положения диссертационной работы докладывались и обсуждались на научных семинарах Международной конференции “Ресурсосбережение и охрана окружающей среды при обогащении и переработке минерального сырья” (Плаксинские чтения – 2016), г. Санкт-Петербург, 2016 г., Международных научных симпозиумах «Неделя горняка», г. Москва, Горный институт НИТУ «МИСиС», 2015, 2017, 2018 гг., Конгрессах обогатителей стран СНГ, г. Москва, Центр международной торговли, 2015, 2017 гг.

Публикации: По теме диссертационной работы опубликованы 4 научных работы, в том числе 3 в журналах из перечня ВАК Минобрнауки РФ.

Объем и структура работы

Диссертационная работа состоит из введения, 5 глав, выводов, библиографического списка из 144 наименований, изложена на 182 страницах машинописного текста и содержит 38 таблиц, 79 рисунков.

Исследования были поддержаны:

Работа выполнена при финансовой поддержке Федеральной целевой программы «Исследования и разработки по приоритетным направлениям развития научно-технологического комплекса России на 2014 - 2020 годы», проект RFMEFI57514X0085 «Комбинированная технология комплексной переработки труднообогатимых руд и техногенного сырья цветных и благородных металлов».

Основные защищаемые положения:

1) Способ оценки предельных показателей обогащения, определяемых раскрытием минералов, основанный на данных об индивидуальных минералогических характеристиках частиц измельченной руды, предполагающий, что для каждой частицы расчетно, в соответствии с заданным критерием, осуществляется выбор одного из нескольких конечных продуктов, куда следует поместить частицу, в соответствии с ее минеральным составом.

2) Способ оценки результатов обогащения руды, основанный на представлении исходного питания и каждого из продуктов в виде совокупности сортов, отличающихся друг от друга крупностью частиц и долями поверхности частиц, представленными разными минералами, включающий расчет балансов по сортам частиц и установление сортов, в наибольшей степени ответственных за снижение качества концентратов и/или потери ценных компонентов.

3) Способ оценки поведения различных видов минеральных частиц в процессе флотации, включающий анализ продуктов кинетического флотационного опыта средствами автоматизированной минералогии, определение кривых кинетики флотации сортов частиц и расчет спектров флотируемости сортов частиц.

4) Методика прогноза показателей обогащения свинцово-цинковых руд при использовании различных схемных решений внутри циклов флотации, включающая анализ продуктов кинетического флотационного опыта средствами автоматизированной минералогии и расчет спектров флотируемости сортов частиц, расчет распределения сортов частиц по продуктам схемы, что позволяет определять для каждого продукта его состав по сортам частиц, а также интегральные минеральный и элементный составы.

ОСНОВНОЕ СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ

Анализ современных технологий переработки труднообогатимых сульфидных руд цветных металлов и современных способов оценки обогатимости руд

Усложнение состава, ухудшение технологических свойств руд является общемировой тенденцией. Особенно это характерно для России и стран СНГ, где руды большинства месторождений цветных и благородных металлов, перспективных к переработке, являются труднообогатимыми. Одним из наиболее труднообогатимых видов сырья являются сульфидные свинцово-цинковые руды вследствие тонкой вкрапленности и сложным сростанием минералов, наличием значительной доли сульфидов железа, присутствия минералов в виде нескольких разновидностей, отличающихся поведением в технологических процессах.

Данные исследований, практика переработки труднообогатимых сульфидных руд цветных металлов свидетельствуют об ограниченности возможностей традиционного подхода к их переработке. Мировой тенденцией является все большее участие гидрометаллургических процессов в первичной переработке труднообогатимых сульфидных руд цветных металлов, наряду с обычными обогатительными процессами.

Конкретные причины трудной обогатимости руды связаны с минеральным составом частиц, поступающих на обогащение после рудного измельчения. Поэтому исследование руды на обогатимость должно включать методы технологической минералогии с целью установления взаимосвязи характеристик различных разновидностей (сортов) минеральных частиц с распределением минералов по продуктам обогащения.

Для удовлетворения возросших требований к уровню исследований обогатимости необходимо разрабатывать новые способы оценки обогатимости, базирующиеся на современных средствах аппаратного анализа вещественного состава и компьютерных моделях, позволяющие глубже понять конкретные, связанные с вещественным составом, причины пониженной обогатимости и путем прогноза наметить направления совершенствования технологии.

Прогнозная оценка качества полезных ископаемых, проведенная на стадии геологического изучения месторождения с применением методов технологической

минералогии, в дальнейшем оптимизирует управление технологическими процессами при его освоении.

Технологическая минералогия существенно расширила свои практические возможности с появлением аппаратных методов так называемой автоматизированной минералогии.

Первое зарегистрированное использование термина «автоматизированная минералогия» в технических журналах появилось в конце восьмидесятых - начале девяностых.

Методы автоматизированной минералогии используются при оценке обогатимости руд, для чего имеется современная аппаратная аналитическая база.

Наиболее широко применяются аппаратно-программные комплексы, основанные на электронной микроскопии с рентгено-флюоресцентным микронзондированием и компьютерном анализе получаемых изображений.

Для статистически представительного количества конкретных минеральных частиц изучаемого продукта, данные комплексы накапливают информацию о минеральном составе объема и поверхности частиц, об их крупности и морфологии, создают базу данных сотен тысяч частиц.

Программное обеспечение комплексов автоматизированного минералогического анализа предусматривает расчет широкого ряда характеристик вещественного состава изучаемого продукта и вывод их в виде стандартно предусмотренных форм таблиц и графиков. Но имеется возможность обрабатывать и промежуточную информацию по самостоятельно разрабатываемым алгоритмам. Например, обработкой полученного изображения массы минеральных частиц после грубого помола предсказывается ожидаемая степень раскрытия минералов при более тонком помоле до заданного размера частиц.

Главное ограничение методов обработки данных, встроенных в системы автоматизированной минералогии, состоит в том, что они не приспособлены к расчету параметров, характеризующих не продукты по отдельности, а технологическую операцию в целом.

Оценка обогатимости руд с применением средств автоматизированной минералогии и прогнозирование на этой оценки показателей работы технологических схем переработки руд получило мощный импульс развития с появлением нового направления в области рационального природопользования – геометаллургии. В рамках этого направления фактически объединяются понятия оценки обогатимости руды и моделирования технологии ее переработки.

Один из главных методов геометаллургии – компьютерное моделирование рудных тел месторождения и технологии переработки руды, с учетом ее конкретных характеристик на разных участках залегания. Данные о свойствах сырья и продуктов получают использованием систем анализа изображений оптической микроскопии, а также анализа средствами автоматизированной минералогии.

Единственным свойством, которое может использоваться при моделировании флотационных процессов, является скорость флотации монофаз, которая находится в зависимости не только от собственных свойств минеральных частиц, но и от реагентного режима. Появление методов количественного минералогического анализа дало надежду на то, что в качестве первичных свойств монофаз могут выступать морфологические характеристики частиц – их крупность, минеральный состав поверхности и т.п.

Однако, с появлением автоматизированных методов количественного минералогического анализа оказалось, что морфология частицы не полностью определяют ее флотуемость. Например, одинаковые по морфологии частицы (например, раскрытый галенит) имеет разную скорость флотации в пробах питания, концентрата и хвостов одной и той же операции.

Для частиц с одной и той же морфологией характерно наличие распределения по флотуемости. Таким образом, подход к моделированию схем на основе формального распределения материала по флотуемости, рассчитываемого на основе кинетического опыта в лабораторной флотомашине, еще не исчерпал себя.

Объекты и методы исследования.

Разработка способов оценки обогатимости проводилась на примере упорной тонковкрапленной сульфидной свинцово-цинковой руды с высоким содержанием пирита.

В пробе руде около 1 % свинца, около 5 % цинка, 23 % сульфидной серы.

Исследуемая труднообогатимая свинцово-цинковая руда проста по минеральному составу. Основные минералы - галенит, сфалерит, пирит и несulfидные минералы, с преобладанием карбонатов. Но руда имеет тонкую и сложную вкрапленность. Особенно сложны взаимопрорастания сульфидов друг с другом.

При степени измельчения исходной руды до 89.4 % класса минус 45 мкм, доля свободных зерен галенита 52 %, сфалерита 70 %, пирита 85 %. Для галенита и для сфалерита преобладают ассоциации с пиритом.

При изучении руды и продуктов ее обогащения применялся оптический микроскопический анализ, экспресс-анализ РФА, а также комплекс автоматизированной минералогии MLA System.

Продукты обогащения перед анализом с использованием MLA подвергались мокрому рассеиву на прецизионных микроситах по классам +45; -45+20; -20+10 и -10 мкм. Весь материал мельче 71 мкм. Приготовление брикетов для анализа на MLA осуществлялось отдельно по классам крупности.

Подбор режима операций основной свинцовой и цинковой флотации, определение кинетики флотации руды

На данной пробе сульфидной свинцово-цинковой руды с высоким содержанием пирита были проведены исследования по подбору степени измельчения питания и реагентных режимов основных операций свинцовой и цинковой флотации с получением черновых концентратов.

В исследованиях применялись только традиционные реагенты, применяемые при обогащении свинцово-цинковых руд. В итоге установлен следующий режим.

Крупность измельченного продукта – 89.4 % класса – 45 мкм.

В измельчение подавались сернистый натрий с малым расходом, сода до pH 10 и единственный специфический реагент – депрессор пирита на основе модифицированной карбоксиметилцеллюлозы АЕРО 7261А. В свинцовую флотацию подавались для депрессии сфалерита сернистый натрий с цинковым купоросом, собиратель – бутиловый аэрофлот. В цинковую флотацию подавались для депрессии пирита известь, для активации сфалерита медный купорос, собиратель – бутиловый ксантогенат, вспениватель – МИБК. Баланс минералов по конечным продуктам приведен в таблице 1.

Таблица 1 – Баланс минералов по конечным продуктам прямой селективной флотации свинцово-цинковой руды.

Продукт	γ, %	Минерал													
		Галенит		Пирит		Сфалерит		Алюмосил.		Карбонаты		Барит		Кварц	
		β, %	ε, %	β, %	ε, %	β, %	ε, %	β, %	ε, %	β, %	ε, %	β, %	ε, %	β, %	ε, %
Pb черновой к-т	27,2	3,3	86,4	69,0	48,2	8,2	28,5	3,7	12,0	11,8	9,4	0,9	9,6	2,2	10,6
Zn черновой к-т	24,1	0,4	8,8	44,2	27,4	22,3	68,6	6,8	19,4	19,5	13,8	1,4	13,5	4,1	17,2
Хвосты	48,7	0,1	4,8	19,5	24,4	0,5	2,8	11,9	68,6	53,6	76,8	3,9	76,9	8,5	72,1
Исходная руда	100	1,0	100	38,9	100	7,8	100	8,4	100	34,0	100	2,4	100	5,7	100

По данным таблицы видно, что при проведении данных флотационных экспериментов не удалось достигнуть высокой степени обогащения для черновых концентратов. В свинцовом концентрате, при низком содержании галенита, наблюдаются заметные потери сфалерита и высокое содержание пирита. Цинковый концентрат также загрязнен пиритом. При этом следует отметить, что потери ценных минералов с отвальными хвостами низкие.

На установленных режимах свинцовой и цинковой флотации был проведен кинетический опыт, в котором в ходе свинцовой и цинковой флотации снималось по 7 порций пенного продукта.

На рисунке 1 приведены экспериментальные кинетики флотации, рассчитанные по общему содержанию минералов в продуктах. Содержание минералов определено обычными средствами MLA.

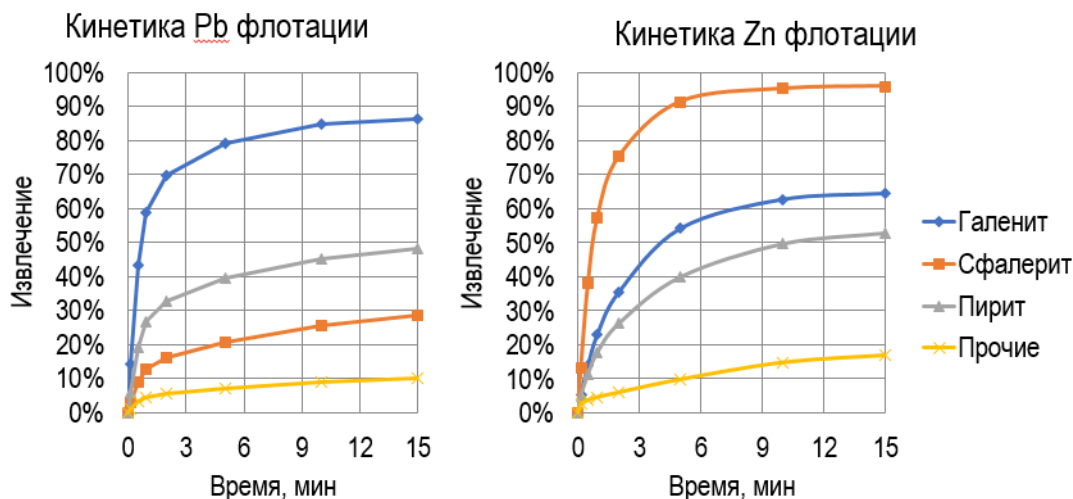


Рисунок 1 - Кинетика флотации минералов в операциях основной свинцовой флотации (от руды) и основной цинковой флотации (от камерного продукта свинцовой флотации)

Галенит и сфалерит имеют удовлетворительное извлечение и высокую скорость флотации в своих циклах. Но при этом, несмотря на принимаемые меры по депрессии, пирит показывает не только весьма заметное извлечение в черновые свинцовый и цинковый концентраты, но и высокую скорость флотации, особенно в свинцовом цикле. Высокая скорость флотации в свинцовом цикле характерна также для части сфалерита.

Способ оценки предельных показателей обогащения, определяемых раскрытием минералов, основанный на данных об индивидуальных минералогических характеристиках частиц измельченной руды, предполагающий, что для каждой частицы расчетно, в соответствии с заданным критерием, осуществляется выбор одного из нескольких конечных продуктов, куда следует поместить частицу, в соответствии с ее минеральным составом.

На графиках рисунка 2 нанесены рассчитанные для изучаемой пробы встроенным обеспечением MLA так называемые теоретические кривые предельной взаимосвязи извлечения и содержания. Показаны кривые для галенита (Г-MLA) и сфалерита (С-MLA).

Каждая из этих кривых характеризует множество максимально возможных технологических показателей при накоплении свинцового (или цинкового) концентрата частицами, содержащими галенит (или сфалерит), последовательно, от частиц, с большей массой галенита (или сфалерита) к частицам, с меньшей массой ценных минералов.

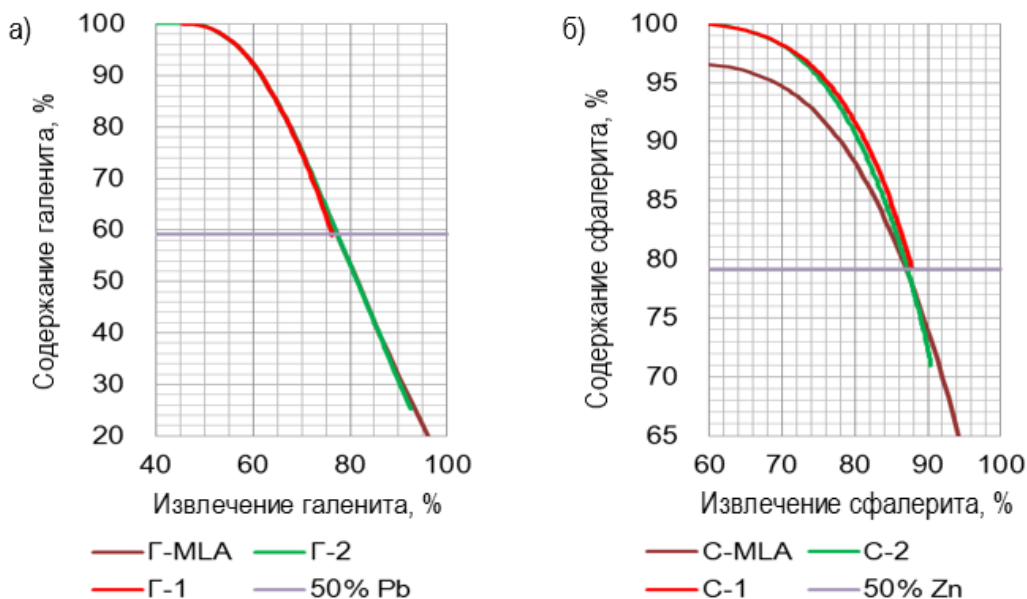
Максимально возможные показатели – в том смысле, что лимитированы только сростками, только раскрытием галенита (или сфалерита) и соответственно, содержанием галенита (или сфалерита) в частицах.

Кривые подобного типа важны для того, чтобы убедиться, достижимо ли в принципе требуемое качество концентрата при достаточном извлечении, или это недостижимо из-за сростков, даже при идеально эффективной операции разделения частиц. В последнем случае требуется более тонкое измельчение.

Необходимость разработки способа, обозначенного в защищаемом положении связана с ограничением встроенного способа MLA.

Встроенный способ не может дать оценку теоретически предельно возможных показателей, если из руды выделяют несколько концентратов разных минералов. Например,

если предполагается выделение свинцового и цинкового концентрата, то сростки, содержащие и свинец и цинк, будут учтены при расчете обеих кривых - и для свинца, и для цинка. То есть будет двойной счет, с заранее неизвестной, зависящей от количества и состава сростков, ошибкой.



Галенит в свинцовом концентрате (а); сфалерит в цинковом (б);

Кривые на графиках рассчитаны: по встроенному алгоритму MLA (Г-MLA, С-MLA); по критерию соотношения массовых долей в частицах (Г-1, С-1); по критерию максимального прироста извлечения (Г-2, С-2).

Рисунок 2 – Теоретические кривые предельных технологических показателей, определяемых раскрытием минералов, для расчетных концентратов

Дополнительно к стандартному, встроенному в систему MLA, для обеспечения наших расчетов исходными данными, было разработано программное средство, преобразующее внутреннюю информацию MLA об исследованном образце в **рабочую базу данных частиц образца**.

Для каждой частицы в базе данных образца указывается ее выход относительно суммы всех частиц базы данных образца, массовые доли в ней минералов и элементов, доли ее поверхности, представленные каждым минералом, а также расчетная средняя плотность и ряд геометрических характеристик частицы.

Предлагаемый способ расчета теоретических кривых предельных показателей, лимитируемых только раскрытием минералов, основан на минералогических характеристиках частиц.

Задается список виртуальных продуктов, получаемых из исходного материала, с указанием, какие минералы для какого продукта являются целевыми. Для каждого продукта будет заполняться своя база данных частиц.

В случае параллельного заполнения баз данных виртуальных продуктов, для каждой частицы из базы данных исходного материала рассчитывают значение критерия (критериев). По нему выбирают виртуальный продукт, в который оптимально поместить частицу.

В случае последовательного выделения виртуальных продуктов, для каждой частицы из базы данных исходного материала тоже рассчитывают значение критерия (критериев). Если значение удовлетворительно, то частицу заносят в базу данных виртуального продукта, если нет – возвращают в базу данных исходного. Помещение частиц в базу данных следующего виртуального продукта – из частиц, оставшихся в базе данных исходного материала после заполнения базы данных предыдущего продукта.

Для предложенной схемы обработки данных в работе предложены следующие критерии:

Критерий 1. Отношение массовых долей примесных минералов в частице к массовой доле целевого минерала данного продукта. Частица направляется в очередной виртуальный продукт, если все эти соотношения меньше заданных для этого продукта предельно допустимых (для последовательного выделения продуктов).

Критерий 2. Прирост извлечения целевого минерала в виртуальном продукте. Частица направляется в тот виртуальный продукт, в котором при ее помещении будет обеспечен наибольший прирост целевого минерала данного продукта (для параллельного выделения продуктов).

На основе полученной базы данных частиц изучаемой пробы рассчитаны теоретические кривые предельных показателей, лимитирующихся только раскрытием минералов, для случая выделения нескольких виртуальных продуктов, в частности, расчетных галенитового и сфалеритового концентратов.

Кривые, рассчитанные по критерию 1, устанавливающему максимально допустимые в частицах соотношения массовых долей примесных минералов к целевому (рисунок 2, кривые Г-1, С-1), рассчитаны в предположении последовательного выделения сначала галенитового, а затем сфалеритового, расчетных концентратов.

Соотношения массовых долей подбирались, индивидуально для каждого виртуального концентрата, такими, чтобы обеспечить достижение содержания его целевого элемента (свинца, цинка) в этом концентрате на уровне 50 %. Набор частиц в каждый концентрат останавливался по достижению соответствующего содержания целевого минерала, чтобы не снижать далее его содержание в данном концентрате, а также не снижать последующее извлечение других минералов в свои концентраты.

Для кривых, рассчитанных по критерию 2 максимального извлечения целевых минералов в свои виртуальные концентраты (рисунок 2, кривые Г-2, С-2), нижний предел содержания целевого минерала в одноименный концентрат и соответствующее извлечение получались автоматически сами, когда заканчивались частицы исходного материала. Чем меньше содержание минерала в исходной руде, тем до больших извлечений и меньших содержаний в соответствующем концентрате доходит кривая. Это происходит потому, что для минерала с малым содержанием в руде, может обеспечиваться прирост его извлечения в собственный концентрат, даже за счет бедного сростка, больший, чем прирост извлечения преобладающего в этом сростке примесного минерала в свой концентрат, если этого примесного минерала в руде много.

Видно, что кривые, рассчитанные по обоим критериям, хорошо совпадают для минералов с относительно невысоким содержанием – для галенита и сфалерита. Для пирита, содержание которого в исходном составляет около 40 %, кривая по критерию 2 (максимальных извлечений) предсказывает меньшее извлечение при равных содержаниях, чем кривая по критерию 1 соотношения массовых долей в частицах.

Кривая, рассчитанная встроенным алгоритмом MLA для галенита, тоже хорошо совпадает с предыдущими. Но кривая для сфалерита в области относительно высоких содержаний идет ниже, из-за «прихваченных» двойным счетом сростков с галенитом и пиритом.

Таким образом, несмотря на тонкую вкрапленность и неполное раскрытие ценных минералов, теоретически имеется возможность получения концентратов свинцового с содержанием свинца 50 % при извлечении 76 %, и цинкового с содержанием цинка 50 % при извлечении 88 %.

Можно считать установленным, что недостаточно полное раскрытие галенита и сфалерита не может являться главной причиной неудовлетворительных технологических показателей обогащения изучаемой пробы свинцово-цинковой руды.

Способ оценки результатов обогащения руды, основанный на представлении исходного питания и каждого из продуктов в виде совокупности сортов, отличающихся друг от друга крупностью частиц и долями поверхности частиц, представленными разными минералами, включающий расчет балансов по сортам частиц и установление сортов, в наибольшей степени ответственных за снижение качества концентратов и/или потери ценных компонентов.

Разработанный способ применен на примере результатов флотационного обогащения изучаемой пробы по схеме прямой селективной флотации из операций основной свинцовой и основной цинковой флотации с получением черновых свинцового и цинкового концентратов.

Предлагаемый способ основан на представлении исходного материала как совокупности сортов частиц, различающихся крупностью и минералогическими характеристиками частиц. В данном случае в качестве минералогической характеристики используется минеральный состав поверхности частиц.

Представление материала как совокупности сортов частиц, позволяет использовать данные о минеральном составе частиц, получаемые с помощью системы автоматизированной минералогии (MLA) не только для характеристики отдельных продуктов, но и для количественной характеристики результативности работы обогатительной операции (схемы обогащения).

Для этого требуется, чтобы все продукты операции (схемы) были представлены как различные совокупности одних и тех же сортов частиц.

Перечень сортов частиц сортов определялся следующим образом.

Выделялись четыре класса крупности, в микронах: +45; -45 +20; -20 +10; -10.

Рассматривались четыре рудных минерала, и группа породных минералов (как один): Галенит, Пирит, Сфалерит, Несульфидные. Массовые доли всех имеющихся в любой частице данных минералов составляют в сумме 100 %.

Способ обогащения – флотация. Поэтому в каждом классе крупности выделялись минеральные сорта частиц на основании долей поверхности частицы, представленных данными минералами: «Мономинеральные», поверхность частицы представлена только одним минералом; «Двойные», поверхность частицы представлена двумя минералами при трех соотношениях долей поверхности. Сростки представлены во всех сочетаниях минералов; «Тройные», поверхность частицы представлена тремя минералами. Во всех сочетаниях минералов; «Четверные», поверхность частицы представлена всеми четырьмя минералами.

Таким образом, каждый из 4 классов крупности разбивается на 27 минеральных сортов.

Сорт частиц определяется классом крупности и минеральным сортом.

С учетом того, что выделяется четыре класса крупности, в каждом – по 27 минеральных сортов, всего – 108 сортов частиц.

Представление продуктов операции как совокупности сортов частиц осуществлялось следующим порядком.

Проводился флотационный опыт. Все продукты высушивались и взвешивались.

От каждого продукта отбиралась проба и подвергалась рассеву, в том числе на микроситах, с получением вышеуказанных классов крупности. Полученные классы крупности продуктов высушивались и взвешивались.

От каждого класса крупности каждого продукта отбиралась проба, из которой приготавливался брикет образца для автоматизированной минералогии с использованием MLA.

Все образцы подвергались исследованию на MLA.

Таблица 2 – Минеральные сорта частиц (в каждом классе крупности). Указаны доли поверхности частиц, занятые соответствующими минералами

Индекс	Характеристика поверхности	Индекс	Характеристика поверхности
	Мономинеральная поверхность		Пирита и сфалерита (ПС)
Г	галенит 100%	ПС13	пирит менее 30 %, и сфалерит
П	пирит 100%	ПС22	пирит от 30 %, до 70 %, и сфалерит
С	сфалерит 100%	ПС31	пирит более 70 %, и сфалерит
Н	несульфидные 100%		Пирита и несульфидных (ПН)
	Сростки двойные по поверхности	ПН13	пирит менее 30 %, и несульфидные
	Галенита и пирита (ГП)	ПН22	пирит от 30 %, до 70 %, и несульф.
ГП13	галенит менее 30 %, и пирит	ПН31	пирит более 70 %, и несульфидные
ГП22	галенит от 30 %, до 70 %, и пирит		Сфалерита и несульфидных (СН)
ГП31	галенит более 70 %, и пирит	СН13	сфалерит менее 30 %, и несульф.
	Галенита и сфалерита (ГС)	СН22	сфалерит от 30 %, до 70 %, несульф.
ГС13	галенит менее 30 %, и сфалерит	СН31	сфалерит более 70 %, и несульфидн.
ГС22	галенит от 30 %, до 70 %, и сфалерит		Тройные и четверные сростки
ГС31	галенит более 70 %, и сфалерит	ПСН	пирит, сфалерит, несульфидные
	Галенита и несульфидных (ГН)	ГСН	галенит, сфалерит, несульфидные
ГН13	галенит менее 30 %, и несульфидные	ГПН	галенит, пирит, несульфидные
ГН22	галенит от 30 %, до 70 %, и несульф.	ГПС	галенит, пирит, несульфидные
ГН31	галенит более 70 %, и несульфидные	ГПСН	галенит, пирит, сфалерит, несульф.

Целью последующих расчетов являлось: для каждого из продуктов операции обогащения определить значения масс минералов, связанных с каждым из 108 сортов частиц.

Внутренняя информация MLA для каждого образца преобразовывалась, с помощью упомянутого выше разработанного программного средства, в отдельную рабочую базу данных частиц, относящуюся к определенному классу крупности определенного продукта флотации.

Разработан алгоритм и соответствующее программное средство, позволяющие распределять и группировать по минеральным сортам все частицы из базы данных класса крупности продукта. Алгоритм предполагает следующие действия.

По одной перебираются все частицы из базы данных класса крупности продукта.

Для очередной частицы, в зависимости от значений долей поверхности частицы, занятых разными минералами, в соответствии с принятыми правилами различения минеральных сортов, осуществляется выбор минерального сорта, к которому должна принадлежать частица.

Далее для выбранного сорта производится, по всем минералам, приращение их масс, относящихся к данному сорту, на массу минералов, содержащихся в очередной частице (1), равную произведению массы продукта на выход класса крупности от продукта, на выход частицы от образца (рассчитан по данным MLA и приведен в базе данных) на массовую долю минерала в частице (приведена в базе данных)

$$m_{ijln} = M_i \gamma_{ij} \varphi_{ijl} \beta_{ijln} \quad (1)$$

где m_{ijln} - масса минерала в частице; M_i - масса продукта; γ_{ij} - выход класса крупности от продукта; φ_{ijl} - выход частицы от образца (рассчитан по данным MLA и приведен в базе данных); β_{ijln} - массовая доля минерала в частице (приведена в базе данных); i – номер продукта; j – номер класса крупности; l – номер частицы; n – номер минерала.

Всего масса минерала в сорте:

$$m_{ijkn}^{\text{сорт}} = \sum_{l \in \text{мин.сорту } k} m_{ijln} \quad (2)$$

где $m_{ijkn}^{\text{сорт}}$ - масса минерала в сорте; k – номер минерального сорта; остальные обозначения те же. Суммирование – только по тем частицам, которые отнесены к данному сорту.

Масса минерала в сорте исходного питания операции обогащения определяется как сумма масс минерала в этом сорте по всем продуктам операции. Масса сорта в продукте определяется как сумма масс всех минералов, связанных с этим сортом в данном продукте. Для каждого продукта массовая доля минерала в сорте определяется как отношение массы минерала, связанного с этим сортом в продукте к массе сорта в продукте. Возможно, что какие-то сорта частиц в продуктах могут отсутствовать (их массы равны нулю).

В связи с предлагающимся в работе подходом к оценке результатов обогащения, ранее не использовавшимся, предлагается следующая терминология.

Оценка результатов обогащения с учетом различных видов минеральных частиц возможна на основании балансовых расчетов по сортам частиц.

При расчетах использовались следующие показатели.

Индивидуальный выход сорта частиц – отношение массы частиц данного сорта в продукте к массе этого частиц сорта в исходном питании.

Индивидуальное извлечение минерала, связанного с сортом – отношение массы минерала, связанного с частицами данного сорта в продукте, к массе минерала, связанного с частицами данного сорта в исходном питании.

Выход сорта – отношение массы данного сорта в продукте к массе исходного питания в целом.

Извлечение минерала, связанного с сортом – отношение массы минерала, связанного с данным сортом в продукте, к массе минерала в исходном питании в целом.

Выход-распределение сорта – отношение массы данного сорта в продукте к массе данного продукта в целом.

Извлечение-распределение минерала, связанного с сортом – отношение массы минерала, связанного с данным сортом в продукте, к массе минерала в данном продукте в целом.

Термины «частный выход», «частное извлечение» не использованы для того, чтобы отличать балансы по руде от балансов по питанию отдельной операции.

Для оценки вклада различных видов минеральных частиц в снижении показателей обогащения по определенному продукту предлагается использовать извлечение-распределение каждого из минералов, присутствие которых в продукте нежелательно.

Для исследуемого продукта проводится сортировка сортов, начиная от сорта, для которого значение извлечения-распределения нежелательного минерала максимально, по убыванию извлечения-распределения.

Таким образом выявляются определенные сорта, в наибольшей мере ответственные за присутствие в продукте нежелательного минерала.

Так как основной ценный компонент изучаемой пробы – цинк, здесь в таблице 3 приведено загрязнение черного цинкового концентрата пиритом.

Наибольший вклад в загрязнение (52,8 % от общего количества пирита в продукте) вносят **частицы, имеющие мономинеральную пиритную поверхность, особенно частицы менее 10 мкм.**

С раскрытыми частицами пирита классов -10 мкм и -20 +10 мкм в черновой цинковый концентрат извлекается наибольшее количество пирита от содержащегося в руде – соответственно 16,1 и 7,9 %, что является относительно высоким извлечением для подавляемого компонента. Остальные виды минеральных частиц приносят в концентрат не более 3-4 % извлечения пирита из руды.

Таблица 3 – Сорта частиц в черновом цинковом концентрате, вносящие наибольшее загрязнение пиритом черного цинкового концентрата

Класс крупности, мкм	Минеральный сорт	Извлечение-распределение пирита в черновом Zn к-те, %	Индивидуальное извлечение пирита с сортом в черновой Zn к-т, %	Извлечение пирита от питания Zn флотации в черновой Zn к-т, %
-10	П	30.50	46.36	16.13
-20+10	П	14.96	55.68	7.91
-45+20	П	7.33	48.15	3.88
-45+20	ПСН	6.97	78.03	3.68
-45+20	ПС31	5.66	83.93	2.99
+45	ПСН	4.36	51.56	2.31
-10	ПС31	2.93	98.41	1.55
-20+10	ПС31	2.67	95.71	1.41
-45+20	ПН31	2.25	42.24	1.19

Индивидуальные извлечения пирита с этими сортами находится на уровне 45-55 %. Это означает, что пирит из этих сортов задепрессирован, но недостаточно, и следует при разработке схемы усилить депрессирующее воздействие.

Следующий по значимости вклад (17 % от общего количества пирита в продукте) вносят крупные частицы – тройные поверхностные сростки пирита, сфалерита и несulfидных минералов и двойные сростки пирита и сфалерита с преобладанием пиритной поверхности. Но извлечение пирита из руды с этими сортами невелико – от 2.3 до 3.7 % от всего пирита в руде.

Индивидуальные извлечения пирита с этими сортами для класса -20+10 мкм высокое – 78-83 %. Это значит, что депрессия таких частиц затруднительна. Можно утверждать, что повышенная флотуемость связана с присутствием в сростках сфалерита, хотя его доля на поверхности, например, в двойных сростках уступает пириту. Доизмельчение может привести к некоторому улучшению селекции, за счет снижения извлечения пирита. Но так как извлечение пирита с этими сортами от руды невелико, абсолютный эффект будет незначителен.

Таким образом, причиной, обуславливающей трудную обогатимость изучаемой пробы свинцово-цинковой руды по ее главному ценному компоненту – цинку, является в основном наличие частиц с мономинеральной пиритной поверхностью (особенно в классе -10 мкм), извлекающихся в черновой цинковый концентрат в среднем на 50 %, во вторую очередь – наличие частиц, поверхность которых представлена в основном пиритом, а также сфалеритом и/или несulfидными минералами, имеющих высокое (80-95 %) извлечение в черновой цинковый концентрат. Необходима жесткая депрессия пирита в последующих операциях.

Способ оценки поведения различных видов минеральных частиц в процессе флотации, включающий анализ продуктов кинетического флотационного опыта средствами автоматизированной минералогии, определение кривых кинетики флотации сортов частиц и расчет спектров флотуемости сортов частиц.

На рисунках 3 и 4 приведены экспериментальные кинетики флотации отдельных сортов минеральных частиц. Это – результат обработки всех продуктов кинетического опыта по разработанному способу, с выделением классов крупности и внутри них – минеральных сортов.

Использование разработанной методики дает новую возможность – наблюдать за поведением в операции обогащения частиц с заданным минеральным составом поверхности по классам крупности.

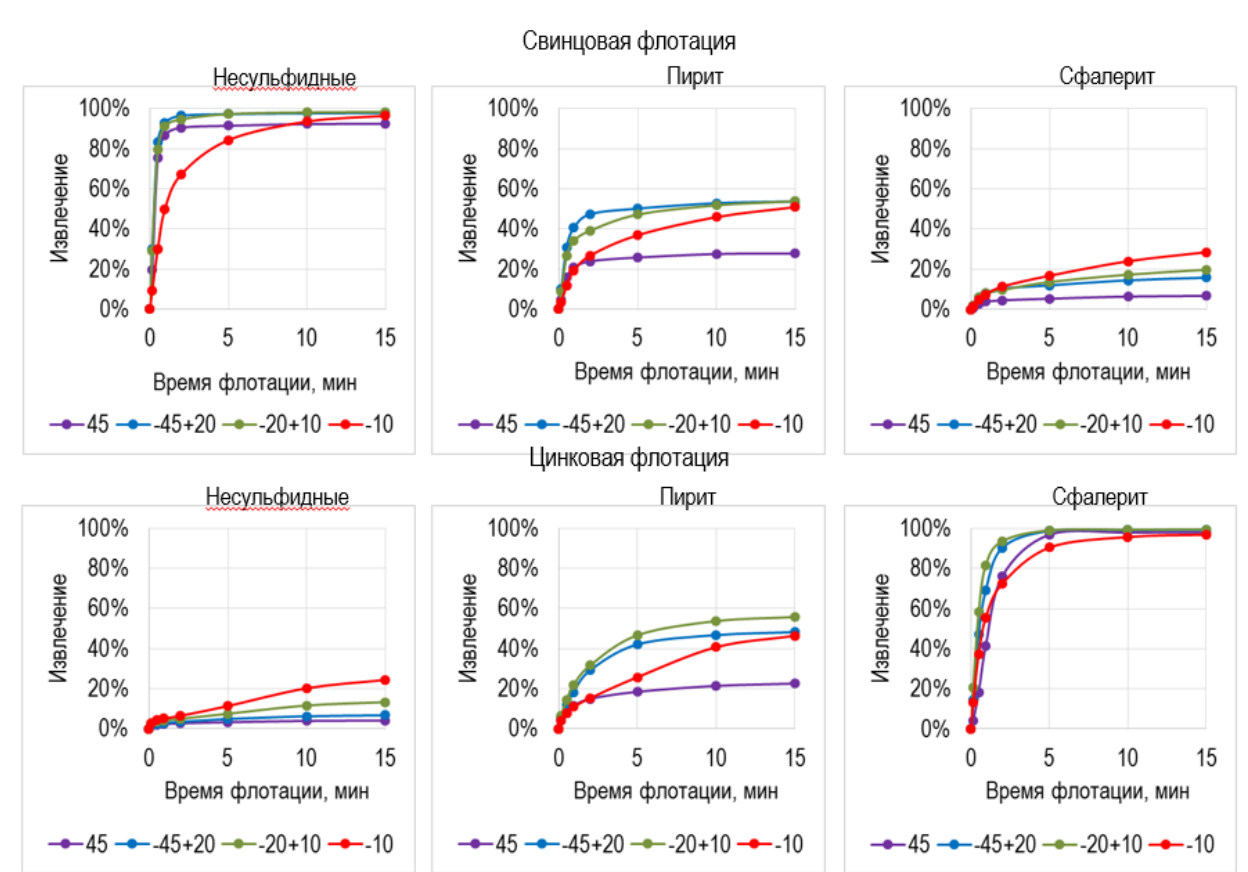


Рисунок 3 – Кинетика флотации частиц с мономинеральной поверхностью

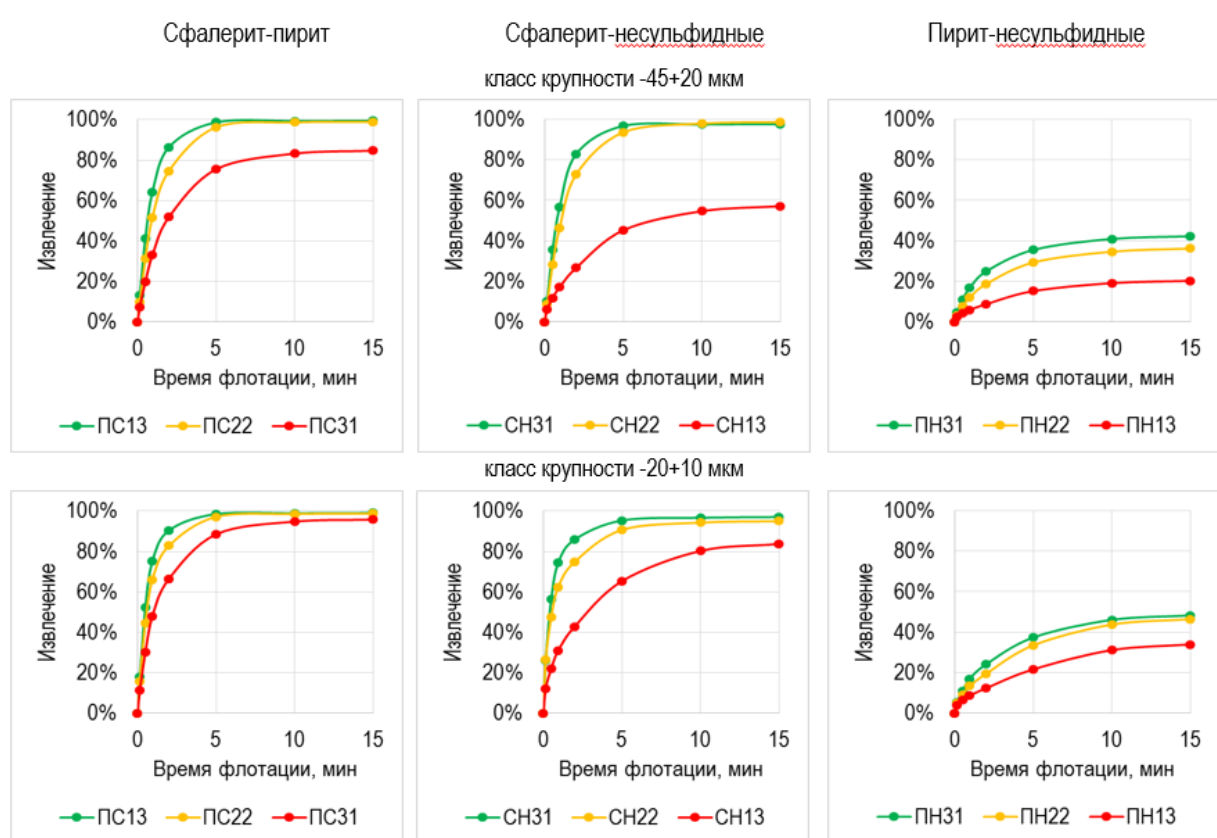


Рисунок 4 – Кинетика флотации частиц с двойной минеральной поверхностью в цинковой флотации

Важно, что кинетика отдельных сортов частиц проявляется в ходе обычной флотации всей руды. На рисунке 3 приведены кинетики флотации частиц с мономинеральной поверхностью всех рассматриваемых четырех классов крупности.

Свинцовая флотация. Раскрытый галенит всех классов крупности имеет большое извлечение при очень высокой скорости флотации классов более 10 мкм. Класс -10 мкм имеет несколько меньшую, но тоже вполне достаточную скорость флотации.

Раскрытый пирит больше всего извлекается из классов -45 мкм, извлечение более 40 %, при этом скорость флотации у классов -45+20 мкм и -20+10 мкм, скорость флотации класса -10 мкм несколько меньше. Извлечение пирита из класса +45 мкм тоже происходит с высокой скоростью, но извлечение достигается меньшее – до 20 %.

Извлечение сфалерита заметно меньше, чем пирита. Сфалерит извлекается тем больше, чем меньше крупность его раскрытых частиц.

Цинковая флотация. Раскрытый сфалерит извлекается очень полно. При этом все классы крупности демонстрируют высокую скорость флотации, наибольшую – классы -20+10 мкм и -45+20 мкм, наименьшую, но все равно достаточно высокую – класс -10 мкм.

Флотация пирита имеет очень схожие закономерности с его кинетикой в свинцовой флотации, но достигаемое извлечение несколько выше – до 50 % у класса -20+10 мкм. Но при этом наблюдается несколько меньшая скорость, чем в свинцовой флотации.

Флотация несulfидных минералов очень похожа на флотацию сфалерита в свинцовой флотации. Небольшое извлечение, при этом оно закономерно увеличивается при уменьшении крупности частиц.

На рисунке 4 приведены кинетики флотации частиц с двойной минеральной поверхностью, для классов крупности -45+10 мкм и -20+10 мкм, в цинковой флотации.

Рассматриваются сорта– поверхностные сростки сфалерита и пирита, сфалерита и несulfидных минералов, пирита и несulfидных минералов. Каждая пара минералов представлена сростками трех типов: первым минералом представлено более 70 % поверхности (зеленые кривые), от 30 до 70 % (желтые), менее 30 % (красные).

В цинковой флотации наибольшую флотируемость показывает сфалерит, меньшую – пирит, наиболее слабую – несulfидные минералы, как это видно на рисунке 3.

На рисунке 4 показана очевидная закономерность проявляющаяся в том, что чем больше доля поверхности, занятая более флотируемым минералом, тем больше и извлечение, и скорость флотации. Однако при выполнении работы в литературе не было найдено прямого экспериментального подтверждения на реальных минеральных частицах в ходе обычной флотации всей руды.

Установлено, что при долях поверхности, представленных более флотируемым минералом, выше 70 % и от 30 до 70 %, кривые кинетики близки, а при доле поверхности менее 30 % происходит достаточно заметное снижение и извлечения и скорости флотации.

Во всех случаях флотируемость минеральных сортов в классе -20+10 мкм выше, чем в классе -45+20 мкм. При этом она близка к флотируемости раскрытых соответствующих более флотируемых минералов. Разница во флотируемости относительно богатых и бедных (менее 30 % поверхности более флотируемого минерала) сростков в классе -20+10 мкм заметно меньше, чем в более крупном классе -45+20 мкм.

Таким образом, с использованием возможностей систем автоматизированной минералогии (MLA) по получению первичной информации, разработанные экспериментально-расчетный способы позволяют оценить обогатимость полиметаллической руды флотацией с количественной характеристикой связи показателей работы операции (схемы) с конкретными минеральными видами частиц и обеспечивают новый уровень детальности исследования флотации.

Методика прогноза показателей обогащения свинцово-цинковых руд при использовании различных схемных решений внутри циклов флотации, включающая анализ продуктов кинетического флотационного опыта средствами автоматизированной минералогии и расчет спектров флотиремости сортов частиц, расчет распределения сортов частиц по продуктам схемы, что позволяет определять для каждого продукта его состав по сортам частиц, а также интегральные минеральный и элементный составы.

В работе предложено развитие подхода О.Н. Тихонова к моделированию цикла флотации, заключающегося в экспериментальном определении кинетики флотации, расчета по ней распределения исходного материала и его компонентов по константе скорости флотации (спектра флотиремости), и расчета показателей схемы на основании спектра флотиремости, конфигурации схемы и сепарационных характеристик операций.

В ряде случаев абстрактность данного подхода, отсутствие связи флотиремости отдельной фракции спектра с конкретными видами минеральных частиц, является его ограничением.

В частности, информация о составе фракции флотиремости из различных видов минеральных частиц может быть полезной для оптимизации схемы или совершенствования реагентного режима с целенаправленным воздействием на отдельные виды минеральных частиц, чтобы перераспределить разделяемые минералы в разные фракции флотиремости.

Сущность предложенной методики, развивающей подход О.Н. Тихонова, можно представить в виде следующего обобщенного алгоритма.

Экспериментально-расчетным путем, как показано выше, определяются кинетики флотации для всех сортов частиц для каждого реагентного режима, то есть для каждого цикла схемы флотации.

По данным кинетик флотации сортов частиц рассчитываются спектры флотиремости сортов. При этом содержания минералов в сорте, рассчитанные для питания, далее считаются неизменными в ходе флотации сорта.

Извлечения каждого отдельного сорта в промежуточные и конечные продукты схемы цикла флотации определяются так же, как принято в подходе О.Н. Тихонова, но интегральные показатели по продуктам рассчитываются как суммарные по всем сортам частиц.

Данные расчеты реализуются с помощью специально разработанного программного средства.

Таким образом, наряду с прогнозом обычных показателей схемы по минералам и элементам, связанным с минералами, для каждого продукта прогнозируется его состав по сортам частиц – классам крупности и минеральным сортам.

В качестве иллюстрации методики на рисунке 5 приведены спектры флотиремости для сортов частиц, вносящих наибольший вклад в загрязнение черного цинкового концентрата пиритом, о которых шла речь выше (таблица 3).

Первые три сорта – частицы с мономинеральной пиритной поверхностью. Индивидуальные извлечения этих сортов – 45-55 %. По спектрам их флотиремости видно, что эти сорта имеют резко неоднородный по флотиремости состав. Они состоят приблизительно наполовину из практически нефлотиремого минерала (синее) и наполовину из среднефлотиремого (желто-коричневое) и быстрофлотиремого (пурпурное и красное) материала. Скорость флотации среднефлотиремой фракции 0,1 обратной минуты. Это значит, что для извлечения этой фракции на 63 % в пенный продукт требуется 10 минут.

Следовательно, трудная обогатимость руды по цинку связана практически полностью с высоко флотоактивной частью раскрытого пирита. Для хотя бы частичного предотвращения его флотации потребуются дополнительная депрессия в перемешивающих.

Высокой скоростью флотации либо полностью, либо также наполовину обладают и сорстки, загрязняющие пиритом черновой цинковый концентрат.

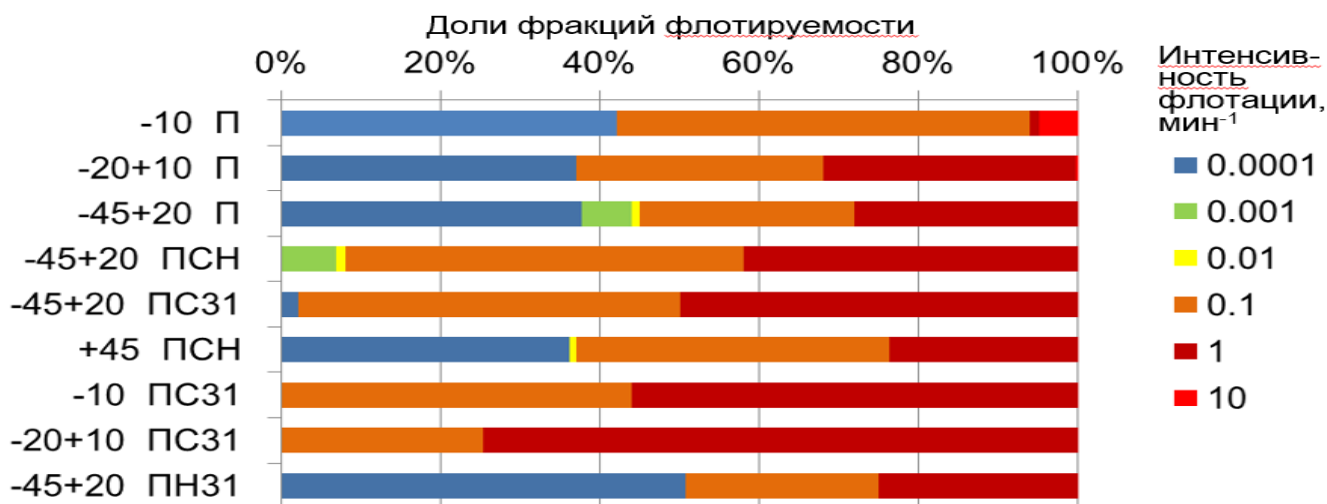


Рисунок 5 – Спектры флотуемости сортов частиц, вносящих наибольший вклад в загрязнение пиритом черного цинкового концентрата

Иллюстрацией предложенной в работе методики прогноза показателей обогащения может служить прогнозное моделирование технологических показателей при различных конфигурациях схем циклов свинцовой и цинковой флотации. Для моделирования была принята схема, отвечающая современной тенденции проводить операции основных флотаций в открытом цикле с целью стабилизации их режима (рисунок 6).

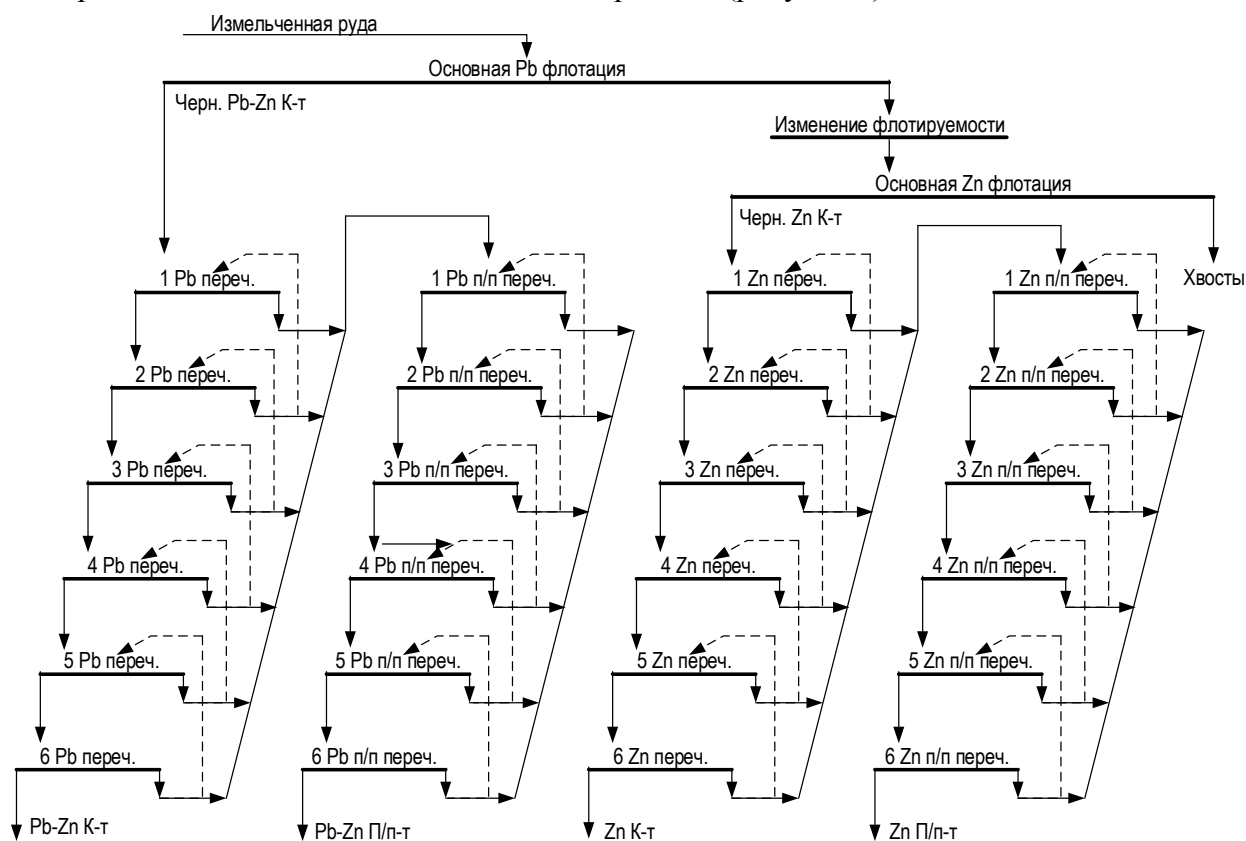


Рисунок 6 – Варианты схемы при прогнозном расчете показателей флотации

Доводка черновых концентратов осуществляется последовательными перечистками. Рассчитывались схемы, содержащие от одной до шести перечисток в каждом цикле.

Рассматривалось два варианта – с присоединением камерных продуктов всех перечисток, начиная со второй, к камерному продукту первой перечистки, либо с возвратом камерных продуктов в голову предыдущей перечистки.

Камерный продукт первой перечистки направлялся в последовательность промпродуктовых перечисток. Рассчитывались варианты схем от одной до шести

промпродуктовых перечисток (их количество было одинаковым с количеством главных перечисток), также с объединением камерных продуктов и с возвратом камерных продуктов в предыдущую операцию.

Такая схема была выбрана как следствие наличия сортов частиц с бысрофлотируемым пиритом. Это обстоятельство особенно существенно для цинкового цикла, так как цинк – основной ценный компонент. Ставилась задача вывести в кондиционный продукт хотя бы часть сфалерита.

Результаты прогнозных расчетов показали практическую невозможность получения кондиционного свинцового концентрата из изученной пробы руды.

Как для свинцового, так и для цинкового циклов, замкнутая схема не приводит к повышению качества концентратов. Результаты моделирования для цинкового концентрата приведены на рисунке 7.

Для цинкового цикла при применении разомкнутой схемы заметно, что каждая перечистка приносит некоторое повышение качества концентрата, т.е. перечищаемость удовлетворительная.

Однако следует отметить, что реагентный режим, примененный в циклах свинцовой и цинковой флотации, недостаточно эффективен. Поэтому моделирование не показывает требуемого качества цинкового концентрата. Главной причиной, как было показано в предыдущем разделе, явилось наличие сортов частиц с флотоактивным раскрытым пиритом, что требует более жесткой депрессии пирита. Кроме того, как было показано, некоторую отрицательную роль играют сростки пирита, прежде всего со сфалеритом.

Это делает целесообразным доизмельчение черновых концентратов. Учитывая полученные данные о высокой флотируемости тонких фракций, можно не опасаться потерь с ними ценных минералов.

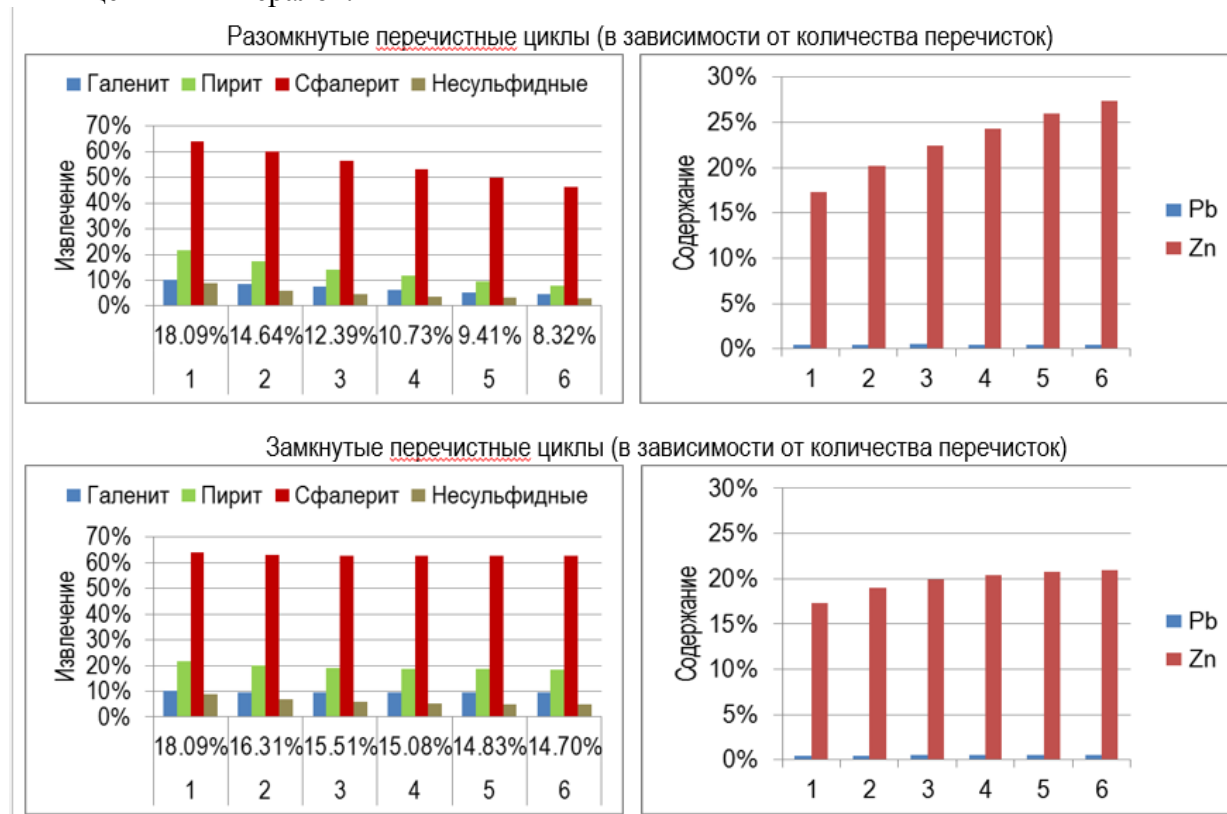


Рисунок 7 – Результаты моделирования показателей для концентрата цинкового цикла

На основании результатов прогнозных модельных расчетов для переработки данной свинцово-цинковой руды была предложена схема комбинированной технологии (рисунок 8).

Во флотационной части технологии предполагается получать кондиционный цинковый концентрат при неполном извлечении в него цинка.

Общее извлечение металлов – и свинца, и оставшейся части цинка обеспечивается тем, что объединенный промпродукт флотационной части направляется на гидрометаллургический передел по технологии окислительного выщелачивания с получением в итоге электролизного цинка и карбоната свинца.

Руда после дробления и измельчения

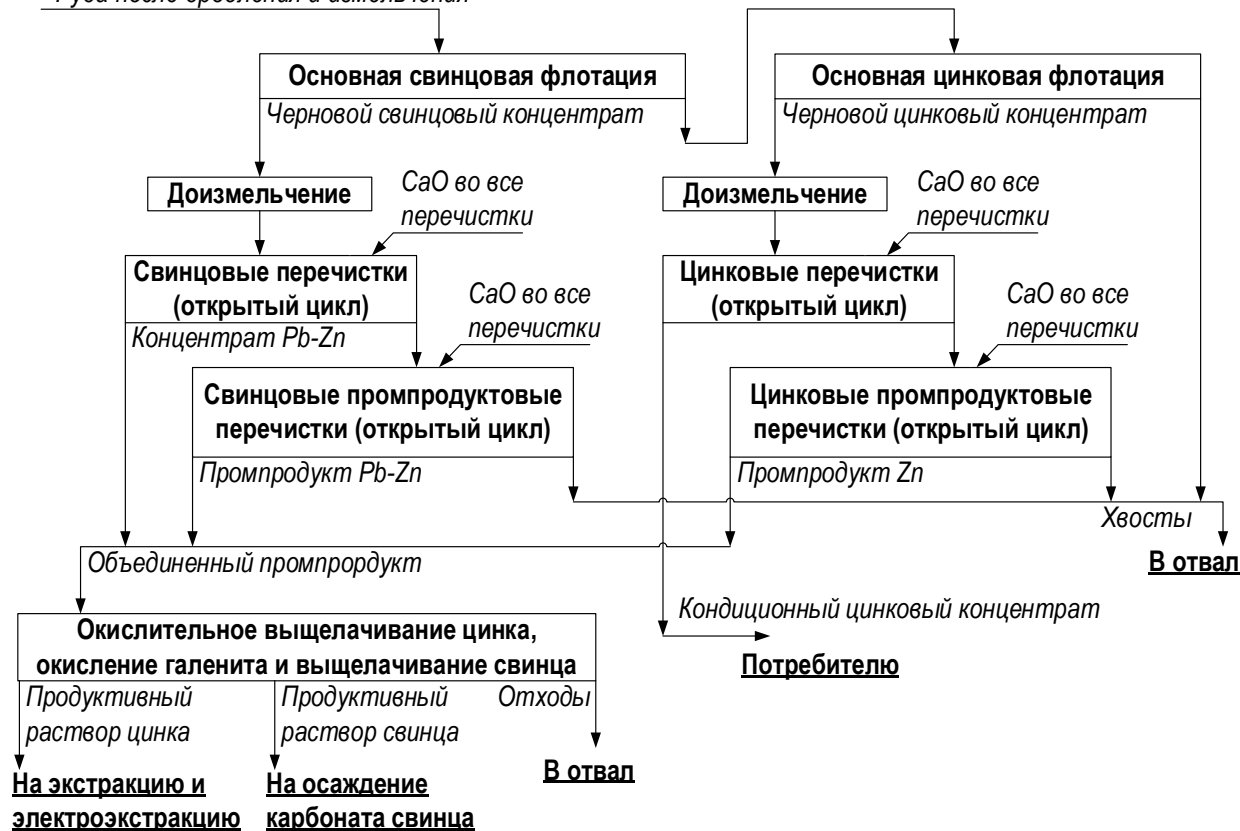


Рисунок 8 – Предлагаемая комбинированная технология переработки упорной свинцово-цинковой руды с высоким содержанием флотактивного пирита

Существующая практика организации перечистных операций при флотации свинцово-цинковых руд не предполагает дополнительной подачи значительных расходов депрессоров. Но, исходя установленных выше причин загрязнения цинкового концентрата пиритом, а также моделирования схем с перечистками, в работе проведены схемные опыты с доизмельчением черновых свинцового и цинкового концентратов с известью, и с подачей извести во все перечистки, при этом в цинковые перечистки – до 2 кг/т руды, в свинцовые – до 0,5 кг/т руды.

Таблица 4 – Баланс металлов для комбинированной технологии

Продукт	Выход, %	Содержание, %		Извлечение, %	
		Pb	Zn	Pb	Zn
Концентрат Pb-Zn	3.90	11.21	6.61	39.77	4.34
Промпродукт Pb-Zn	2.16	1.78	36.14	3.49	13.16
Промпродукт Zn	1.04	3.56	41.25	3.37	7.24
Общий промпродукт	7.10	7.22	20.67	46.63	24.74
Концентрат Zn	5.83	1.52	53.31	8.04	52.36
Хвосты общие	87.07	0.57	1.57	45.33	22.90
Руда	100.00	1.10	5.94	100.00	100.00
Извлечение при выщелачивании в раствор из общего промпродукта				93.6	89.7
Извлечение при выщелачивании в раствор от руды				43.6	22.2
Общее извлечение металлов				43.6	74.6

Это позволило существенно снизить выход свинцово-цинкового промпродукта, а также получить кондиционный цинковый концентрат с содержанием цинка 53 % и извлечением 52 %. Общий баланс опыта приведен в таблице 4.

При проведении гидрометаллургических исследований выщелачивания свинцово-цинкового промпродукта режимы были приняты по литературным данным.

Окислительное выщелачивание сфалерита с одновременным окислением галенита, последующий перевод свинца в раствор хлоридом натрия показали извлечение в раствор свинца 93% и цинка 89 %. Суммарное извлечение металлов при комбинированной технологии ожидается для свинца 43 %, цинка – 74 %.

Выводы:

1. Разработан способ расчета предельных показателей обогащения, определяемых раскрытием минералов, основанный на данных о минералогических характеристиках частиц измельченного исходного материала, предполагающий, что для каждой частицы расчетно осуществляется выбор одного из нескольких конечных продуктов, куда следует поместить частицу, в соответствии с ее минеральным составом.

2. Установлено, что недостаточно полное раскрытие галенита и сфалерита не может являться главной причиной неудовлетворительных технологических показателей обогащения изучаемой пробы свинцово-цинковой руды. Несмотря на тонкую вкрапленность и неполное раскрытие ценных минералов, теоретически имеется возможность получения концентратов свинцового с содержанием свинца 50 % при извлечении 76 %, и цинкового с содержанием цинка 50 % при извлечении 88 %.

3. Представление материала как совокупности сортов частиц, позволяет использовать данные о минеральном составе частиц, получаемые с помощью системы автоматизированной минералогии (MLA) не только для характеристики отдельных продуктов, но и для количественной характеристики показателей работы обогатительной операции (схемы обогащения).

4. Разработан способ оценки результатов обогащения руды, основанный на представлении каждого из продуктов в виде совокупности сортов, отличающихся друг от друга крупностью частиц и долями поверхности частиц, представленными разными минералами, включающий расчет балансов по сортам частиц и установление сортов, в наибольшей степени ответственных за снижение качества концентратов и/или потери ценных компонентов.

5. Установлено, что наибольший вклад в загрязнение черновых концентратов вносят частицы, имеющие мономинеральную пиритную поверхность, особенно частицы менее 10 мкм. В цинковый черновой концентрат они приносят 52,8 % от общего количества пирита в концентрате, при этом индивидуальное извлечение указанных сортов от операции цинковой флотации среднее (45-55 %).

6. Разработан способ оценки поведения различных видов минеральных частиц в процессе флотации, включающий анализ продуктов кинетического флотационного опыта средствами автоматизированной минералогии, определение кривых кинетики флотации сортов частиц, и расчет спектров флотиремости сортов.

7. Из экспериментальных данных кинетики флотации пробы свинцово-цинковой руды, с использованием разработанного способа представления продуктов кинетики флотации в виде совокупности сортов частиц, установлены кинетики флотации отдельных сортов при флотации всего материала пробы. В частности, прямым методом установлены: высокая скорость флотации раскрытых галенита, сфалерита и пирита в классах крупности менее 10 мкм; закономерное снижение скорости флотации двойных сростков при увеличении доли поверхности, занятой менее флотиремым минералом, особенно более 70 % поверхности, а также наибольшая скорость флотации минеральных сортов класса -20+10 мкм по сравнению с теми же минеральными сортами других классов крупности.

8. Разработанные экспериментально-расчетные способы, с использованием возможностей систем автоматизированной минералогии (MLA) по получению первичной информации, позволяют оценить обогатимость полиметаллической руды флотацией с

количественной характеристикой связи показателей работы операции (схемы) с конкретными минеральными видами частиц и обеспечивают новый уровень детальности исследования флотации.

9. Разработана методика прогноза показателей обогащения при использовании различных схемных решений внутри циклов флотации, являющаяся развитием подхода О.Н. Тихонова с учетом спектров флотируемости сортов, что позволяет определять для каждого продукта его состав по сортам частиц, а также интегральные минеральный и элементный составы.

10. Предложена комбинированная технология переработки упорной свинцово-цинковой руды, заключающаяся в сочетании открытой прямой селективной флотации с добавлением реагента-депрессора пирита в перечистные операции с получение кондиционного цинкового концентрата и гидрометаллургической переработки свинцово-цинкового промпродукта. Это дало возможность получить 53 % -ный цинковый концентрат при его извлечении 52 %, и извлечь в продуктивный раствор свинца 43,6 % и цинка 22,2 %, суммарное извлечение цинка составило 74,6 %.

Заключение

В диссертационной работе на основании результатов, полученных с использованием комплекса современных методов исследования, автором решена актуальная научная задача разработки нового способа оценки обогатимости полиметаллических руд, основанного на данных системы автоматизированной минералогии, позволяющего установить виды минеральных частиц, в наибольшей степени ответственные за загрязнение концентратов и/или потери ценных компонентов, получить детальную информацию о кинетике флотации различных видов минеральных частиц при флотации руды.

Автором решена практическая задача разработки методики прогноза технологических показателей для различных схемных решений циклов флотации, детально учитывающей вещественный состав руды. С применением разработанных способов оценки обогатимости и методики прогноза показателей автором предложена комбинированная схема первичной переработки упорной тонковкрапленной высокосульфидной свинцово-цинковой руды и экспериментально подтверждена возможность ее реализации.

Основные положения диссертации опубликованы в следующих работах:

Научные статьи в изданиях, рекомендованных ВАК РФ:

1) Шехирев Д.В., Смайлов Б.Б. Кинетика извлечения частиц различного минерального состава в ходе флотации свинцово-цинковой руды // Обогащение руд. – 2016. - № 2. - С. 20-26.

2) Раскрытие галенита и сфалерита в процессе измельчения свинцово-цинковой руды / А. Б. Смайлова, Б. Б. Смайлов, А. М. Думов, Д. Мураитов // Обогащение руд. – 2016. - № 6. - С. 25-31.

3) Оценка обогатимости флотационным методом на основе анализа распределения по фракциям флотируемости / Д.В. Шехирев Б. Б. Смайлов, Д. Мураитов А. М. Думов // Обогащение руд. – 2017. - № 4. - С. 28-35.

Материалы международных, всероссийских и региональных конференций

1) Комбинированная технологии обогащения сульфидных труднообогатимых руд цветных металлов / Д.В. Шехирев, Б.Б. Смайлов, А.Б. Смайлова, В.И. Журавлев // «Ресурсосбережение и охрана окружающей среды при обогащении и переработке минерального сырья» (Плаксинские чтения – 2016) / Науч. ред. акад. РАН В.А. Чантурия; сост. к.т.н. доц. Т.В. Чекушина. – Москва: АО «Издательский дом «Руда и Металлы», 2016. – 659 с. – (Материалы международной конференции). - С. 236-239.