

Федеральное государственное автономное образовательное учреждение
высшего образования «Национальный исследовательский технологический
университет «МИСиС» (НИТУ «МИСИС»)

Жаргалсайхан Эрдэнэзул

ОПТИМИЗАЦИЯ ТЕХНОЛОГИИ ОБОГАЩЕНИЯ МЕДНО-
МОЛИБДЕНОВЫХ РУД НА ОСНОВЕ КОМПЛЕКСНОЙ СИСТЕМЫ
ТЕХНОЛОГИЧЕСКИХ И ЭКОНОМИЧЕСКИХ КРИТЕРИЕВ

Специальность 25.00.13 «Обогащение полезных ископаемых»

Шифр специальности:

25.00.13 Обогащение полезных ископаемых

Автореферат

на соискание ученой степени

кандидата технических наук

Научный руководитель – профессор, докт. техн. наук, Морозов В.В.

Москва - 2019

ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

Актуальность работы. Технологические режимы обогащения медно-молибденовых руд требуют непрерывного совершенствования, что обусловлено усложнением их минерального состава и ухудшением обогатимости. Важным условием достижения высокой эффективности флотационного обогащения является разработка и применение научно обоснованных способов оптимизации и систем автоматизированного управления технологическими процессами, использующих оперативный анализ параметров процессов и выбор технологических режимов с использованием надежных критериев эффективности.

Перспективным подходом при решении задачи повышения эффективности процессов измельчения и флотации с использованием способов оптимизации и систем автоматического регулирования использование данных о концентрации собирателя в водной фазе пульпы, измеряемой с использованием современных средств аналитического контроля и использование данных об экономической эффективности обогащения при варьировании параметров технологического процесса. Расширение номенклатуры контролируемых технологических параметров и применение совокупности технологических и экономических критериев оптимизации позволяет реагировать на изменение вещественного и минерального состава руды, ее обогатимости с учетом значимости отдельных технологических факторов в общем повышении эффективности обогатительного производства.

Научной основой решения задачи оптимизация технологии обогащения медно-молибденовых руд на основе комплексной системы технологических и экономических критериев являются методы модель-ориентированной оптимизации обогатительных процессов, значительный вклад в развитие которых внесли ученые России и Монголии: О.Н. Тихонов, Г.Н. Машевский, В.З. Козин, В.М. Авдохин, В.В. Морозов, З. Ганбаатар, Л. Дэлгэрбат и другие.

Целью работы является оптимизация технологии обогащения медно-молибденовых руд на основе применения комплексной системы технологических и экономических критериев, обеспечивающей повышение извлечения ценных компонентов и сокращение расхода реагентов.

Для достижения цели поставлены следующие задачи:

- выбор и обоснование критериев эффективности технологических процессов обогащения, учитывающих технологические и экономические параметры;
- совершенствование методики исследования обогатимости руд с применением критериальной оценки эффективности процессов измельчения и флотации;
- разработка алгоритмов автоматического регулирования процессов измельчения и флотации на основе опережающего анализа сортности руды с применением экономико-технологических критериев эффективности.

Идея работы заключается в выборе и использовании для оптимизации

процессов измельчения и флотации медно-молибденовых руд совокупности технологических и экономических параметров, обеспечивающих выбор наиболее эффективных технологических режимов за счет более точного определения сортности руды и учета влияния на показатели обогащения состава руд и качества концентратов.

Научная новизна работы заключается в следующем.

1. Усовершенствованы и разработаны новые экономико-ориентированные критерии оптимизации, включающие: для коллективного цикла - стоимость приведенных с учетом качества руды потерь меди и молибдена в хвосты и затраты на извлечение пирита из коллективного концентрата; для селективного цикла - приведенные с учетом качества коллективного концентрата потери меди и молибдена в разноименные концентраты и потери от снижения качества молибденового концентрата,

2. Разработана новая спектральная методика измерения концентрации неионогенного собирателя AeroMX 5140 в жидкой фазе пульпы коллективной медно-молибденовой флотации, включающие экстракцию и УФ-спектральный анализ аллилового эфира амилксантогеновой кислоты, обеспечивающая определение оптимальных параметров процессов измельчения и флотации.

3. Усовершенствованы методики определения оптимального значения рН среды и расходов реагентов при коллективной и селективной флотации медно-молибденовых руд с использованием градиентного метода Бокса–Уилсона на основе полного факторного эксперимента.

4. Обосновано использование в качестве параметра при оценке сортности руд в алгоритме автоматизированного управления процессами измельчения и флотации величины поглотительной способности руды по отношению к собирателю, рассчитываемой по измеренной остаточной концентрации собирателя в жидкой фазе пульпы.

Практическое значение работы заключается в разработке:

- методики определения оптимальной крупности измельчения медно-молибденовой руды;
- методики оценки обогатимости и оптимизации реагентных режимов флотационного обогащения с использованием градиентного метода;
- алгоритма управления процессами измельчения и флотации на основе опережающей оценки сортности перерабатываемых руд.

Разработанные методики и алгоритм оптимизации процессов измельчения и флотации прошли опытно-промышленную проверку и рекомендована к промышленному освоению на обогатительной фабрике ГОКа «Эрдэнэт» с ожидаемым экономическим эффектом от повышения извлечения металлов и сокращения расходов реагентов 145 тыс. долларов США в год.

На защиту выносятся.

1. Критерии экономико-технологической оптимизации процессов

измельчения и флотации, учитывающие как приведенную с учетом содержаний в руде и концентратах стоимость теряемых ценных компонентов, так и потери, связанные со снижением качества получаемых концентратов, обеспечивающие выбор наилучших условий обогащения медно-молибденовых руд.

2. Разработка и применение методики измерения остаточной концентрации неионогенного собирателя в водной фазе пульпы для определения оптимальных параметров процессов измельчения и флотации.

3. Способы выбора и оптимизации режимов измельчения, коллективной и селективной флотации с использованием системы технологических и экономических критериев эффективности.

4. Система и алгоритм управления процессами измельчения и флотации с использованием системы технологических и экономических критериев эффективности, обеспечивающая повышение извлечения ценных компонентов при обогащении медно-молибденовых руд.

Апробация работы. Основное содержание работы и отдельные ее положения докладывались и обсуждались на 8 научных конференциях и форумах, в т.ч.: на XXIII международной научно-технической конференции XVI Уральской горнопромышленной декады, Екатеринбург, 2018 г.; научных семинарах в рамках "Недели горняка", МГГУ, Москва, 2017-2019 гг.; конгрессах обогатителей стран СНГ, МИСиС, Москва, 2017, 2019 гг.; международной конференции «Научные основы и практика переработки руд и техногенного сырья, Екатеринбург, 2019 г.; международной научно-производственной конференции СП "Эрдэнэт", Эрдэнэт, Монголия, 2018 г.; международной конференции по охране окружающей среды и обогащению полезных ископаемых, Острава, Чехия, 2018 г.; международной конференции по обогащению полезных ископаемых переработке вторичных ресурсов, Белград, Сербия, 2019 г.

Методы исследований. В работе использованы методы спектрального анализа состава водной фазы пульпы, лабораторные, полупромышленные и промышленные методы исследования процессов измельчения и флотации медно-молибденовых руд с анализом вещественного и минерального состава руды, расхода и концентрации флотореагентов. Используются математические методы моделирования и оптимизации процессов обогащения, статистического и регрессионного анализа результатов.

Публикации. Основные положения диссертации опубликованы в 10 работах, из них 3 статьи – в рецензируемых журналах, рекомендованных ВАК, 7 тезисов в материалах российских и зарубежных научных конференций.

Обоснованность и достоверность научных положений и выводов подтверждаются, точностью и надежностью методики измерения концентрации собирателя, удовлетворительной воспроизводимостью зависимостей выходных и входных параметров процессов измельчения и флотации, достижением максимальной эффективности процесса обогащения в интервале выбранных с использованием

разработанных методик и критериев оптимизации параметров, а также положительными результатами укрупненных и полупромышленных испытаний.

Личный вклад автора состоит в обобщении и анализе научных информационных источников по теме диссертации; разработке спектральной методики анализа концентрации собирателя, обосновании критериев оптимизации, проведении исследований влияния состава жидкой фазы пульпы, крупности измельчения и расходов реагентов на показатели флотации, проведении технологических исследований и промышленной апробации разработанных методик оптимизации процессов измельчения и флотации, обработке и анализе результатов исследований, формулировании выводов и заключения работы.

Структура и объем диссертации. Диссертация состоит из введения, шести разделов, заключения и выводов, списка литературы из 133 наименований и содержит 133 страницы машинописного текста, 34 рисунков, 15 таблиц, одно приложение.

ОСНОВНОЕ СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ

Во введении к работе дана ее общая характеристика, доказана актуальность работы, сформулированы научная и практическая значимость исследования, научные положения. Охарактеризована обоснованность и достоверность научных положений и выводов и личный вклад автора в выполнение работы.

В первой главе рассмотрено современное состояние технологии, определены причины снижения технико-экономических показателей и обоснованы пути повышения эффективности флотационного обогащения медно-молибденовых руд. Показано, что причиной снижения показателей обогащения является применение несовершенных методик выбора оптимальных условий процессов измельчения и флотации, ориентированных на принцип ведения технологических процессов в интервалах разрешенных значений технологических параметров (в заданных интервалах массовых долей и извлечений ценных компонентов в продукты технологической схемы). Анализ применяемых решений показал, что для повышения эффективности обогащения необходимо оптимизировать процессы измельчения и флотации с использованием системы технологических и экономических критериев.

Для выбора объективных экономико-ориентированных критериев эффективности технологических процессов целесообразно использовать данные о качестве руды и концентратов, стоимости металлов, а также других данных, на основании которых может быть рассчитаны показатели процессов.

Проведенным исследованием технических решений на обогатительных фабриках показано, что важным параметром процесса флотации является концентрация собирателя в водной фазе пульпы, отражающая поглотительную способность руды. Однако, для измерения концентрации в водной фазе неионогенного собирателя таких методик не разработано. Это определило задачей настоящей работы разработку методики определения концентрации неионогенного собирателя.

Во второй главе с учетом выбранного методологического подхода при решении поставленной задачи рассмотрены и выбраны рациональные методы исследования и моделирования процессов измельчения и флотации, включая методы определения минерального, химического, гранулометрического и визиометрического анализа руд и концентратов, методы анализа ионно-молекулярного состава жидкой фазы пульпы, включая спектральный анализ концентрации неионогенного собирателя AeroMX 5140, методы технологических исследований процессов измельчения и флотации, методы математического планирования, моделирования и обработки результатов экспериментов с использованием метода факторного анализа.

В третьей главе выбраны и разработаны критерии экономико-технологической оптимизации процессов измельчения и флотации.

В качестве базового критерия эффективности процессов измельчения и коллективной флотации был рассмотрен экономико-технологический критерий оптимизации, разработанный З. Ганбаатаром и В. Морозовым, представляющий собой выраженные в стоимостной форме потери ценных компонентов и потери от снижения качества концентратов:

$$Q_t = \varepsilon^*_{Cu} C_{Cu} \alpha_{Cu} + \varepsilon^*_{Mo} C_{Mo} \alpha_{Mo} + \varepsilon_{Py} C_{Py} \alpha_{Py}; \quad (1)$$

где: ε^* ; ε , C ; α - потери, извлечение, цена и содержание в руде меди (C_{Cu}), молибдена (C_{Mo}). пирита (C_{Py}).

Для решения задачи более точного определения оптимальных условий процесса флотации предложено изменить принцип определения цены пирита C_{Py} , входящего в критерий, отражающего, по сути, затраты на повышение качества медно-молибденового концентрата. При таком подходе переменная C_{Py} рассчитывается как стоимость реагентов и энергии в операциях доводки коллективного концентрата (с содержанием меди 17-19%) до медно-молибденового концентрата (с содержанием меди 22-24%). Для определения значений C_{Py} были использованы данные о расходах на энергию и реагенты при повышении качества коллективного концентрата в цикле доводки (при снижении на 1% массовой доли пиритного железа).

Проведенными нами исследованиями подтверждена эффективность данного критерия для процесса коллективной флотации. Анализ кривых 1-3 на рисунке 1, показывает, что отдельные зависимости извлечений металлов от pH среды не позволяют определить область эффективного течения процесса.

Поставленная задача поиска оптимальных параметров процессов измельчения и флотации решается с использованием нового экономико-технологического критерия приведенных потерь Q_t , зависимость которого от pH среды имеет выраженный минимум (рисунок 1, кривая 4).

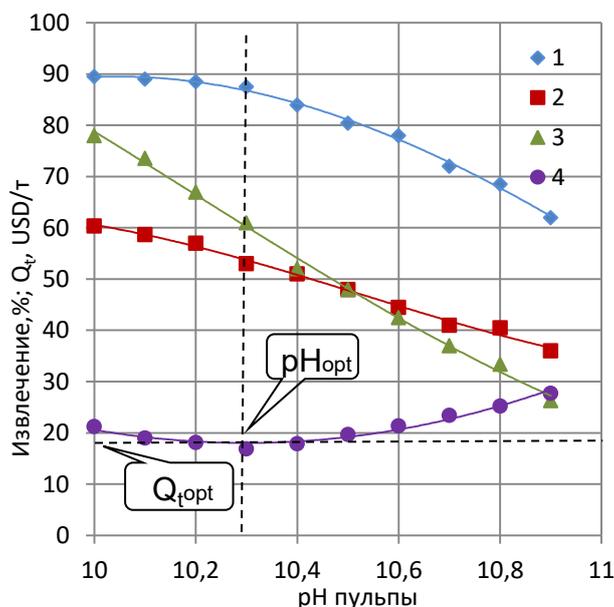


Рисунок 1 - Зависимости извлечения меди (1), молибдена (2), пиритного железа (3) в медно-молибденовый концентрат и критерия приведенных потерь (4) от pH среды в коллективной медно-молибденовой флотации

В качестве критерия эффективности процесса молибденовой флотации предложено использовать критерий приведенных потерь Q_t , выраженный в виде стоимости теряемых металлов и потерь вследствие снижения качества молибденового концентрата:

$$Q_t = \varepsilon_{Mo}^* C_{Mo} \alpha_{Mo} + \varepsilon_{Cu}^* C_{Cu} \alpha_{Cu} + (\beta_{Cu} - 1) C_{\beta}, \quad (2)$$

где: ε , ε^* , C ; извлечение, потери, цена металла в концентрате; α - содержание в медно-молибденовом концентрате меди (C_{Cu}), молибдена (C_{Mo}), β_{Cu} - содержание меди в молибденовом концентрате, C_{β} – потери стоимости молибденового концентрата при превышении массовой доли меди над контрактной (1%).

Анализ кривых 1-3 на рисунке 2, показывает, что отдельные зависимости извлечений металлов от pH среды не позволяют определить область эффективного течения процесса. Обоснованность и возможность применения разработанного критерия эффективности для процесса молибденовой флотации подтверждается отчетливо проявляющимся минимумом зависимости Q_t от расхода сернистого натрия в процессе флотации молибденита, представленной на рисунке 2 (кривая 4).

Разработанные экономико-ориентированные критерии обеспечивают точное и надежное определение области оптимального ведения процессов измельчения и флотации путем выбора базовых параметров процессов – крупности измельчения и расходов флотационных реагентов.

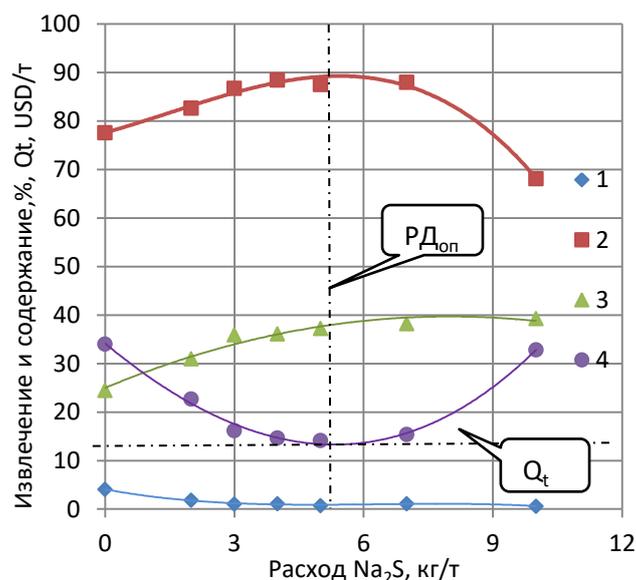


Рисунок 2 - Зависимости извлечения меди (умноженное на 10) (1), молибдена (2), содержания молибдена в молибденовом концентрате (3) и критерия приведенных потерь (4) от расхода сернистого натрия в операции десорбции собирателя и молибденовой флотации

В третьей главе описана методика измерения остаточной концентрации неионогенного собирателя в медно-молибденовой флотации и результаты ее применения при выборе оптимальной крупности измельчения руды.

С целью использования концентрации неионогенных собирателей в качестве технологического параметра флотации была разработана методика измерения остаточной концентрации аллилового эфира амилксантогеновой кислоты в жидкой фазе флотационной пульпы, представляющего собой основу собирателя AeroMX-5140, эффективно применяемого при флотации медно-молибденовых руд.

При исследованиях использовался спектрофотометр ПЭ-5400 УФ и применялась дифференциальная методика, предполагающая вычитание из спектра анализируемого раствора спектра контрольной пробы и расчет концентрации по разности поглощений УФ-излучения при фиксированных длинах волн.

Как видно из УФ-спектров, представленных на рисунке 3, спектрально-активная фракция собирателя AeroMX-5140 характеризуется тремя отчетливо выраженными пиками поглощения: при 220, 255 и 273 нм, которые отвечают электронным переходам эфиров алкилксантогеновых кислот.

Анализ результатов измерений концентраций показал, что использование н-гексана в качестве экстрагента при соотношении экстрагент – аликвота раствора от 1:10 до 1:1 обеспечивает переход собирателя из водной фазы на 93-96%, при этом не происходит извлечения других органических соединений, в частности спиртов, составляющих основу используемого вспенивателя – метилизобутилкарбинола.

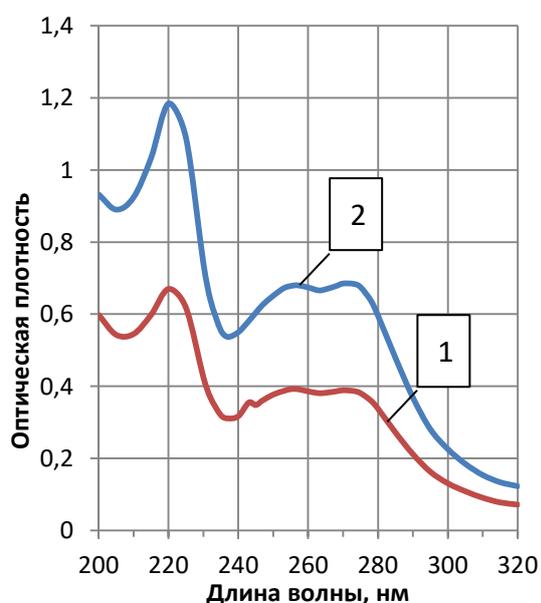


Рисунок 3 - Спектры собирателя AeroMX-5140 в гексане: 1 – 5 мг/л; 2 – 10 мг/л

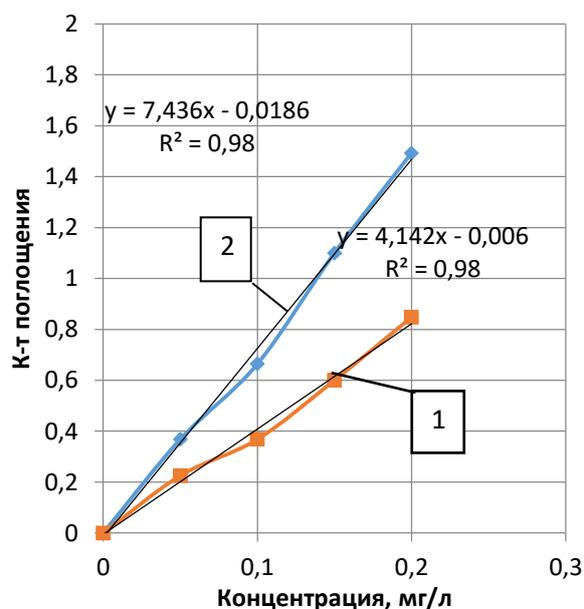


Рисунок 4 - Калибровочный график AeroMX-5140 в гексане при длине волны: 1 - 220 нм, 2 - 273 нм

Анализ калибровочных графиков для перешедшего в экстрагент собирателя показывает, что в интервале концентраций от 0 до 1,5 мг/л наблюдается прямолинейная зависимость оптической плотности от концентрации (рисунок 4). Интервал достоверного измерения остаточной концентрации собирателя составляет от 0,2 до 1,5 мг/л погрешностью измерений не более 2,5 – 7,5%. За счет варьирования соотношения экстрагент – аликвота достоверно определяемый интервал концентраций собирателя в пробе водной фазы составляет от 0,1 до 15 мг/л.

Разработанная методика показала стабильные результаты в интервале температур 10-25⁰С, интервале рН от 8,5 до 11,0, что позволило рекомендовать ее для измерения остаточной концентрации собирателя в операции коллективной флотации при обогащении медно-молибденовых руд.

С использованием разработанной методики анализа концентрации собирателя были проведены опыты по флотации медно-молибденовых руд в условиях варьирования крупности измельчения, рН среды и расхода собирателя. Схема опыта включала двухстадийное измельчение пробы руды до крупности 45–75% класса -65 мкм, коллективную флотацию. В качестве вспенивателя использовался метилизобутилкарбинол (МИБК), в качестве собирателя – реагент AeroMX-5140, в качестве регулятора рН среды – каустическая сода. В отобранной из жидкой фазы пульпы пробе водной фазы измерялось значение рН и концентрации собирателя.

Из зависимости, представленной на рисунке 5а, видно, что с увеличением тонины помола измеряемая остаточная концентрация собирателя уменьшается. Это обусловлено увеличением поверхности твердой фазы при измельчении. При постоянном расходе собирателя повышение степени измельчения руды

сопровождается снижением плотности адсорбции собирателя на минералах и ведет к снижению их извлечения.

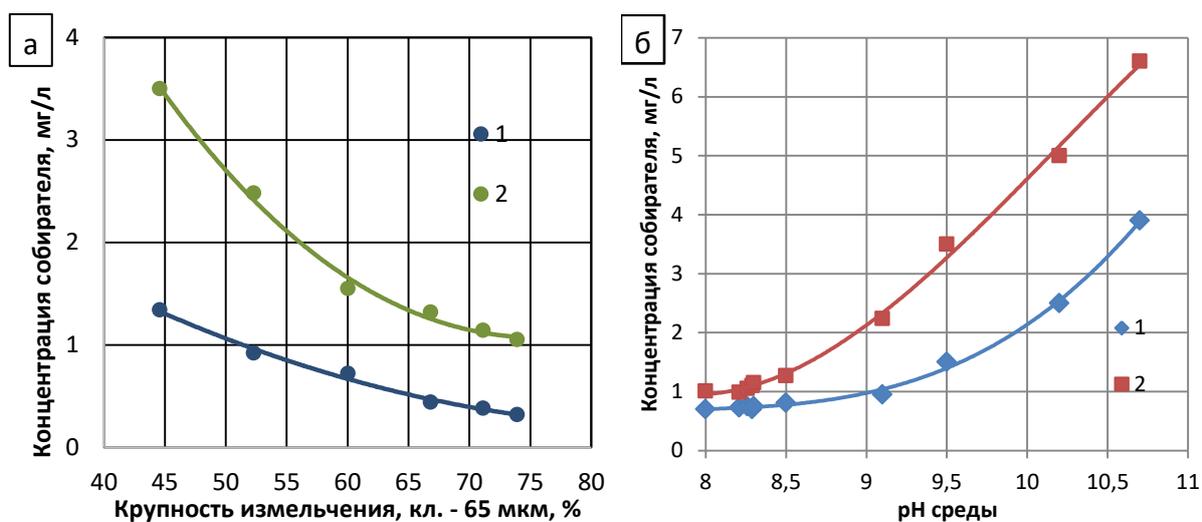


Рисунок 5 - Зависимость остаточной концентрации собирателя в водной фазе пульпы от крупности измельчения (а) и рН среды (б); 1 – при расходе собирателя 10 г/т; 3 – при расходе собирателя 15 г/т

Остаточная концентрация компонента собирателя AeroMX-5140 - аллилового эфира арилксантогеновой кислоты характеризуется возрастанием при увеличении рН водной фазы пульпы (рисунок 5б). Увеличение концентрации собирателя при повышении рН может быть обусловлена его вытеснением гидроксильными ионами или ускорением окисления и гидрофилизацией поверхности минералов.

Анализ зависимостей извлечения металлов от расхода и концентрации собирателя при постоянной крупности измельчения и рН показывают, что существенное увеличение извлечения меди имеет место при росте остаточной концентрации собирателя от 0,25 до 0,5 мг/, а молибдена и пиритного железа – при концентрации от 0,25 до 1 мг/л (рисунок 6). Согласно полученным экспериментальным данным целесообразно поддерживать условия, при которых не происходит снижение концентрации собирателя ниже порогового значения 0,2-0,25 мг/л (при рН = 10.1 – 10,3).

Тесная связь флотирuemости минералов с концентрацией собирателя ($R^2 = 0,87-0,95$) обосновывает возможность и целесообразность использования величины концентрации собирателя в водной фазе пульпы в качестве параметра флотационного процесса.

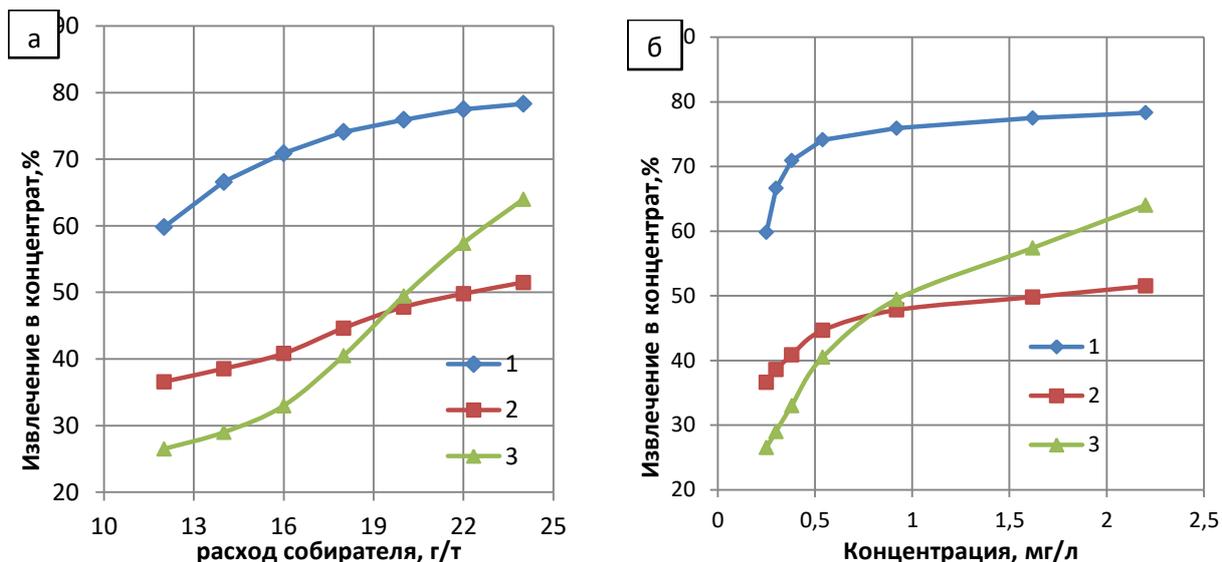


Рисунок 6 - Зависимости извлечения меди (1), молибдена (2) и пиритного железа (3) от расхода (а) и концентрации (б) собирателя в водной фазе пульпы (рН = 10,3)

Остаточная концентрация собирателя в водной фазе пульпы была использована для расчета поглотительной способности твердой фазы пульпы (ПС), рассчитываемой как частное от деления количества поглощенного собирателя (Δq) на массу твердого (Q) по уравнению:

$$ПС = \Delta q / Q$$

Анализ результатов взаимодействия собирателя с породообразующими минералами показал, что серицит обладает наибольшей поглотительной способностью (4,1-4,42 мг/кг), а порфиновые минералы - грансиениты и грандиориты – наименьшей (0,41 – 0,45 мг/кг). Полученные результаты объясняют причины повышенного расхода собирателя при флотации серитизированных руд и обосновывают возможность использования критерия поглотительной способности руд к собирателю в качестве дополнительного параметра при оценке их сортности.

В главе 5 представлены результаты оптимизации процессов измельчения, коллективной медно-молибденовой и молибденовой флотации.

Установленные связи флотиремости минералов с остаточной концентрацией неионогенного собирателя были использованы при выборе крупности измельчения. Для учета влияния на показатели флотации снижения концентрации собирателя были получены трехпараметрическая регрессионная модель извлечения (ε) от выхода класса -65 мкм в измельченном продукте (β_{-65}) и концентрации собирателя AeroMX 5140 (C_{AMX}) $\varepsilon = f(\beta_{-65}; C_{AMX})$. При проведении регрессионного анализа для узкого интервала варьирования параметров выбрана линейная форма зависимости. Полученные зависимости имеют вид:

$$\varepsilon_{Cu} = 30,3 + 0,51 * \beta_{-65} + 6,8 * C_{AMX}, \quad (3)$$

$$\varepsilon_{Mo} = 14,5 + 0,45 * \beta_{-65} + 5,1 * C_{AMX}, \quad (4)$$

$$\varepsilon_{Py} = 22,3 + 0,50 * \beta_{-65} + 9,5 * C_{AMX}. \quad (5)$$

Согласно полученным зависимостям снижение извлечения меди ($\Delta\varepsilon_{Cu}$), молибдена ($\Delta\varepsilon_{Mo}$), и пирита ($\Delta\varepsilon_{Py}$), вследствие уменьшения концентрации собирателя (ΔC_{AMX}) может быть рассчитано по уравнениям:

$$\Delta\varepsilon_{Cu} = 6,8 \Delta C_{AMX}, \quad (6)$$

$$\Delta\varepsilon_{Mo} = 5,1 \Delta C_{AMX}; \quad (7)$$

$$\Delta\varepsilon_{Py} = 9,5 \Delta C_{AMX}. \quad (8)$$

Уравнения 6-8 были использованы для выбора оптимальных параметров процессов измельчения путем корректировки зависимости извлечений металлов от крупности измельчения для условий постоянства остаточной концентрации собирателя. Пример расчета скорректированной зависимости приведен на рисунке 7. Анализ данных на рисунке 8 показывает, что при крупности измельчения руды 62,5% кл. -65 мкм достигаются наименьшие значения критерия приведенных потерь ценных компонентов в процессе коллективной флотации.

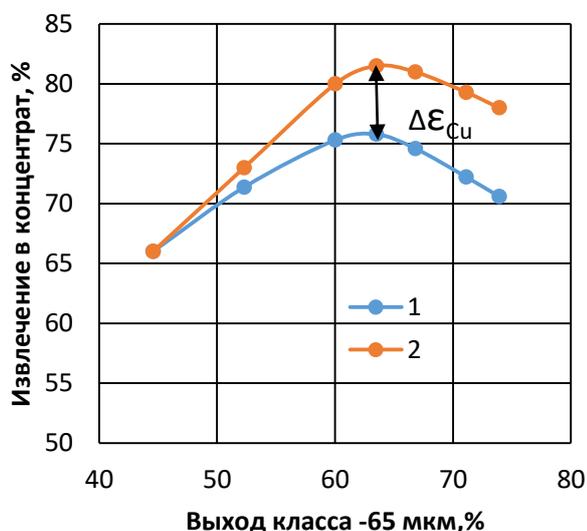


Рисунок 7 - Зависимости извлечения меди от крупности измельчения руды:

- 1 - полученные результаты;
- 2 – скорректированные с учетом снижения остаточной концентрации собирателя

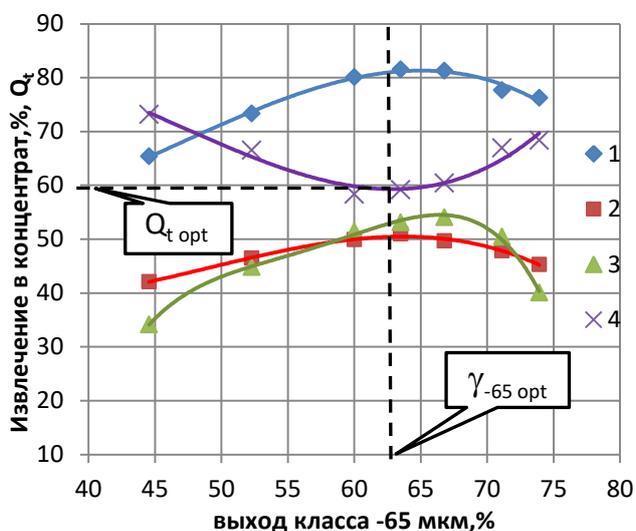


Рисунок 8 - Зависимости скорректированных значений извлечений меди (1) молибдена (2), пиритного железа (3) и критерия приведенных потерь $Q_t \times 5$ (4) от крупности измельчения руды

Учет поправки извлечений металлов был использован в методике определения оптимальной крупности измельчения в исследовательской лаборатории ГОКа Эрдэнэт. Усовершенствованная методика позволила более точно определить

оптимальную крупность руды (62,5% кл. -65 мкм), что позволило повысить извлечение меди и молибдена на 0,7 – 1,2%.

Для повышения эффективности коллективной и селективной флотации применяют градиентный метод выбора оптимального реагентного режима с использованием факторного эксперимента. В представленной в таблице 1 матрице полного факторного эксперимента (ПФЭ) по оптимизации реагентного режима коллективной медно-молибденовой флотации производилось варьирование трех факторов: расхода собирателя Аэромикс 5140 (РА), расхода вспенивателя (РВ) и рН среды (рН). Базовый уровень переменных (РА = 17 г/т, РВ = 9 г/т; рН = 10,3) соответствовал опыту технолога для данного процесса.

Таблица 1 - Результаты факторного эксперимента по оптимизации реагентного режима основной коллективной медно-молибденовой флотации (1-й шаг)

№	РА	РВ	рН	$\beta_{Cu},\%$	$\beta_{Mo},\%$	$\beta_{Fe},\%$	$\varepsilon_{Cu},\%$	$\varepsilon_{Mo},\%$	$\varepsilon_{Fe},\%$	Q_t
1	15	7	10,0	13,35	0,24	9,36	90,37	46,93	29,26	5,40
2	15	7	10,6	14,08	0,29	9,91	90,91	54,65	28,93	4,29
3	15	11	10,6	13,37	0,31	9,16	84,27	56,45	26,11	6,52
4	15	11	10,0	12,83	0,23	10,11	82,78	42,87	32,41	7,31
5	19	11	10,6	13,10	0,29	9,51	88,74	56,75	29,13	5,04
6	19	11	10,0	12,41	0,26	9,45	90,69	54,89	30,57	4,41
7	19	7	10,0	13,09	0,24	9,83	92,64	48,86	29,54	3,73
8	19	7	10,6	12,36	0,25	9,01	80,70	46,59	26,60	7,84
Среднее				13,07	0,26	9,54	87,64	51,00	29,07	5,57

Измеряемыми параметрами являлись содержание β и извлечение ε меди, молибдена и железа в коллективном концентрате. По перечисленным показателям с учетом содержаний металлов в руде и данных экономического плана рассчитывался критерий оптимизации Q_t .

С использованием расчетных уравнений ПФЭ были получены регрессионные уравнения первого порядка, описывающие изменение показателей процесса при изменении расходов реагентов и рН в выбранных интервалах варьирования:

$$\beta_{Cu} = 13,07 + -0,33 RA - 0,15 RB + 0,15 pH \quad (9)$$

$$\varepsilon_{Cu} = 87,64 + 0,55 RA - 1,02 RB - 1,48 pH \quad (10)$$

$$\varepsilon_{Mo} = 51,0 + 0,77 RA + 1,74 RB + 2,61 pH \quad (11)$$

$$Q_t = 5,56 - 0,86 RA + 0,24 RB + 0,36 pH \quad (12)$$

В рассматриваемой многопараметрической системе выбор решения по изменению расходов реагентов и рН среды для построения матрицы ПФЭ на втором шаге возможен только при использовании комплексного критерия оптимизации Q_t , поскольку использование частных параметров – извлечений и содержаний металлов

не приводит в однозначному выбору. С использованием уравнения 12 (по знаку и величине коэффициентов при РА, РВ и рН) рассчитываются базовые расходы следующего шага, которые составили: РА = 17,32 г/т; ВК = 8,9 г/т; рН = 10,28.

На втором шаге ПФЭ с использованием полученных результатов опытов были уточнены значения рекомендуемые расходы реагентов и рН: РА = 17,32 г/т; ВК = 8,85 г/т; рН = 10,27.

В выбранном реагентном режиме были поставлены замкнутые опыты, моделирующие в полной мере цикл коллективной медно-молибденовой флотации. Полученные результаты показали, что использование функции приведенных потерь в алгоритме оптимизации по градиентному методу Бокса – Уилсона обеспечивает быстрое нахождение области оптимальных расходов реагентов, которые обеспечивают получение высоких технологических показателей. Так, сумма приведенных потерь в коллективной флотации при обогащении 1 т руды снижается с 5,77 до 4,83 USD/т.

Аналогичным образом использование технолого-экономического критерия позволяет достичь выбора эффективного режима молибденовой флотации. В представленной в таблице 2 матрице ПФЭ операции молибденовой флотации, производилось варьирование трех факторов: расхода сернистого натрия (РС), расхода керосина (РК) и вспенивателя (РВ). Базовый уровень переменных: РС = 6 кг/т, РК = 340 г/т; РВ = 45 г/т.

Таблица 2 - Результаты факторного эксперимента по оптимизации реагентного режима основной операции разделения медно-молибденового концентрата (1-й шаг)

№	РС, кг/т	РК, г/т	РВ, г/т	$\alpha_{Cu}, \%$	$\alpha_{Mo}, \%$	$\beta_{Cu}, \%$	$\beta_{Mo}, \%$	$\epsilon^*_{cu}, \%$	$\epsilon_{mo}, \%$	Q_t
1	7	400	50	23,67	0,24	4,34	33,81	0,89	68,75	36,50
2	7	400	40	23,67	0,24	3,73	35,39	0,77	71,96	32,29
3	7	280	50	23,67	0,24	3,01	36,75	0,61	73,50	29,47
4	7	280	40	23,67	0,24	4,88	33,24	1,07	72,02	34,46
5	5	280	40	23,67	0,24	3,01	37,25	0,70	85,05	18,52
6	5	280	50	23,67	0,24	3,48	36,41	0,80	82,53	21,82
7	5	400	40	23,67	0,24	4,7	33,26	1,17	81,49	25,26
8	5	400	50	23,67	0,24	3,58	35,81	0,88	87,14	17,68
Среднее						3,84	35,24	0,86	77,80	27,00

Измеряемыми параметрами являлись: содержание (α) меди и молибдена в коллективном концентрате; содержание (β); меди и молибдена в молибденовом концентрате, молибдена в молибденовом к-те; потери (ϵ^*) меди в молибденовом концентрате; извлечение (ϵ) молибдена в молибденовый концентрат. По

перечисленным показателям с учетом качества руды и экономических данных рассчитывался критерий оптимизации Q_t .

С использованием расчетных уравнений ПФЭ были получены регрессионные уравнения первого порядка, описывающие изменение показателей процесса при изменении расходов реагентов в выбранных интервалах варьирования:

$$\beta_{Mo} = 35,24 - 0,44 PC - 0,67 PK + 0,46 PB \quad (7)$$

$$\varepsilon_{Cu}^* = 0,86 - 0,03 PC + 0,07 PK - 0,06 PB \quad (8)$$

$$\varepsilon_{Mo} = 77,8 - 6,25 PC - 0,47 PK + 0,17 PB \quad (9)$$

$$Q_t = 27,0 + 6,18 PC + 0,93 PK - 0,63 PB \quad (10)$$

Как и в предыдущем случае, однозначные решения по изменению базовых расходов реагентов на втором шаге ПФЭ могут быть приняты только при использовании критерия приведенных потерь Q_t . Рассчитанные базовые расходы второго шага ПФЭ составили: $PC = 5,38$ г/т; $PK = 335,4$ г/т; $PB = 44,68$ г/т. На втором шаге ПФЭ были улучшены все показатели: извлечение молибдена возросло на 6,6%, потери меди сократились на 0,12%, массовая доля молибдена возросла на 2,26%.

Базовые расходы третьего шага составили: $PC = 5,23$ г/т; $PK = 337,8$ г/т; $PB = 44,54$ г/т. На третьем шаге ПФЭ удалось улучшить все показатели: извлечение молибдена возросло на 1,71%, потери меди сократились на 0,01%, массовая доля молибдена возросла на 1,46%. С использованием регрессионного уравнения для критерия приведенных потерь была проведена дальнейшая корректировка базовых расходов реагентов, которые составили: $PC = 5,21$ г/т; $PK = 338,7$ г/т; $PB = 44,52$ г/т.

Полученные показатели замкнутых опытов показали, что выбранный режим позволяет получить молибденовый концентрат высокого качества (50,43% Mo) с высоким извлечением молибдена (95,96%).

Таким образом, использование в алгоритме оптимизации градиентным методом в качестве критерия оптимизации функции экономико-технологического критерия приведенных потерь обеспечивает быстрое нахождение области оптимальных расходов реагентов и получение высоких технологических показателей. Полученные результаты послужили основанием для принятия разработанной методики в перечень программно-методического обеспечения лабораторных исследований на обогатительной фабрике ГОКа «Эрдэнэт».

В главе 6 представлены результаты разработки и испытаний алгоритма определения оптимальных параметров при автоматизированном управлении реагентным режимом коллективной флотации.

Разработанный алгоритм управления процессами измельчения и флотации, представленный на рисунке 9, предполагает реализацию приемов оценки сортности перерабатываемых руд и экономико-технологической оптимизации.

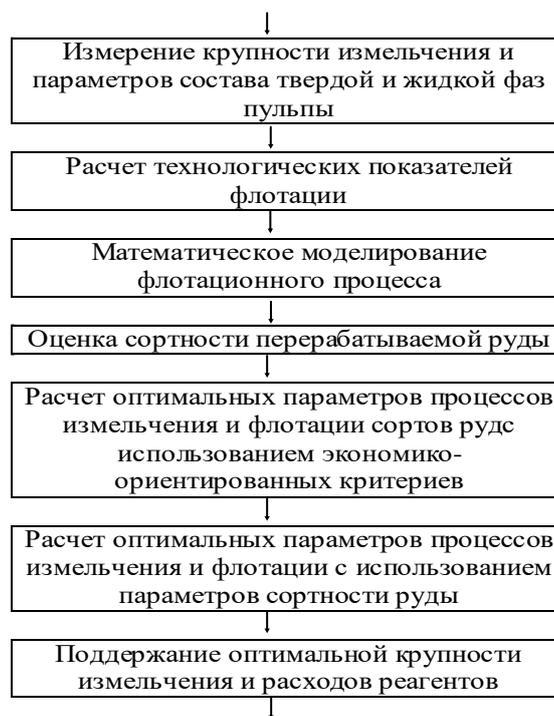


Рисунок 9 - Алгоритм управления процессом флотации на основе оценки сортности руд с использованием экономико-технологических критериев эффективности

Согласно разработанному алгоритму по параметрам минерального и вещественного состава руд, а также поглотительной способности твердой фазы пульпы по отношению к собирателю определяется сортность руды, и с учетом сортности перерабатываемых руд, рассчитываются оптимальная крупность измельчения, рН пульпы и расходы реагентов. Оценка сортности руды, поступающей на переработку проводилось по 8 параметрам: содержаниям металлов и минералов в руде, соотношений минералов и минеральных групп и поглотительной способности пульпы по отношению к собирателю

Для обоснования целесообразности использования в качестве дополнительного параметра сортности руды величины поглотительной способности пульпы по отношению к собирателю был проведен расчет остаточной дисперсии исходного массива данных относительно результирующей функции при определении сортности входящей руды. Результаты расчетов показали, что использование данного параметра (поглотительной способности пульпы) повышает коэффициент детерминированности с 0,71-0,77 до 0,76-0,82 и снижает относительную дисперсию при определении зависимостей долей отдельных сортов с 0,26-0,28 до 0,21-0,23 (таблица 3).

Повышение точности оценки позволяет сделать заключение о увеличении точности определения сортности перерабатываемой руды при использовании данных о поглотительной способности твердой фазы пульпы по отношению к собирателю.

Расчет оптимальных параметров процессов измельчения и флотации с использованием параметров сортности руды проводился с использованием разработанных технолого-экономических критериев оптимизации.

Таблица 4 – Статистические характеристики зависимостей долей отдельных сортов в общей перерабатываемой руде

Тип руды	Показатель детерминированности R^2		Остаточная дисперсия	
	без учета поглотительной способности пульпы	с учетом поглотительной способности пульпы	без учета поглотительной способности пульпы	с учетом поглотительной способности пульпы
МПР	0,77	0,81	0,26	0,22
СВСП	0,74	0,78	0,28	0,23
БПР	0,71	0,76	0,26	0,21
СОР	0,75	0,79	0,27	0,22
ССР	0,77	0,82	0,26	0,21

При расчете значений критерия оптимизации были применены следующие данные: стоимость меди и молибдена в концентратах – соответственно 6500 и 28000 долларов США за 1 т., стоимость доизвлечения пиритного железа из коллективного концентрата – 330 долларов США за 1 т.

Представленные на рисунке 10 зависимости критерия оптимизации Q_t от крупности измельчения различных типов руд показывают возможность нахождения наилучших условий процесса, которые соответствуют координате минимума. Анализ зависимостей показывает, что наилучшие параметры технологического процесса для различных типов руд неодинаковы. Так, для массивных первичных руд минимум функции приведенных потерь наблюдается при крупности измельчения 67,5% класса -74 мкм, а для вторичных сульфидизированных руд – при крупности 64,5% класса -74 мкм.

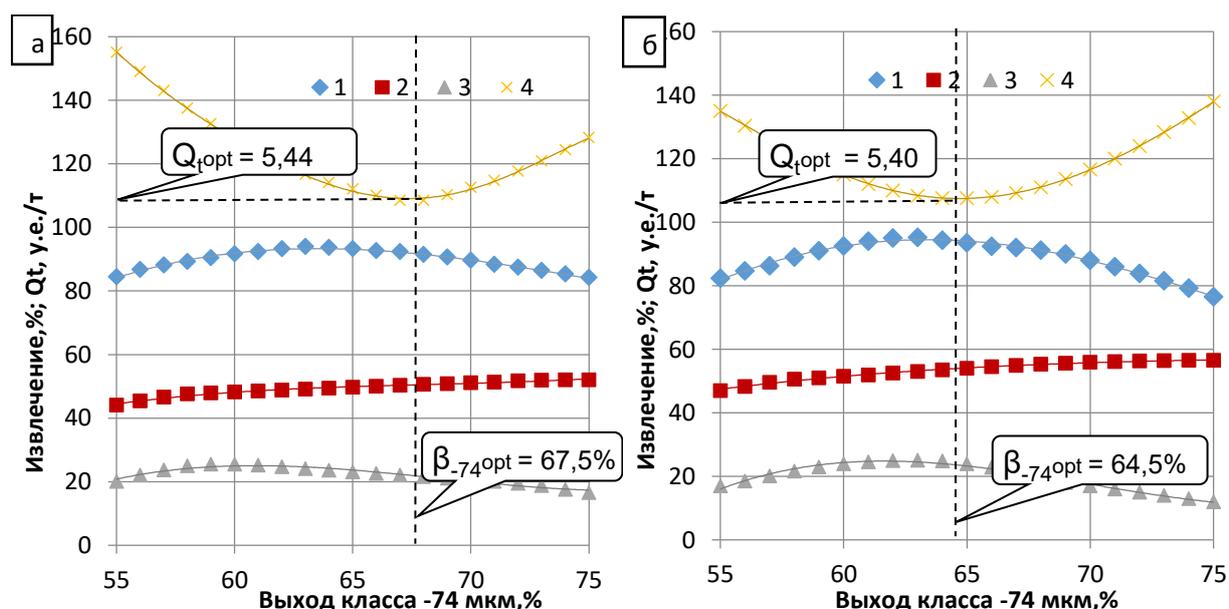


Рисунок 10 - Зависимость извлечений меди (1), молибдена (2) и пиритного железа (3) в концентрат и критерия оптимизации Q_t (4) от крупности измельчения для массивных первичных руд (а) и смешанных вторичных сульфидизированных руд (б)

Представленные на рисунке 11 зависимости критерия оптимизации в коллективной медно-молибденовой флотации различных типов руд позволяют определить оптимальное значение рН среды. Наилучшие параметры технологического процесса для различных типов руд неодинаковы. Так, для массивных первичных руд минимум функции приведенных потерь наблюдается при рН = 10,36, а для смешанных вторичных сульфидизированных руд – при рН = 10,55.

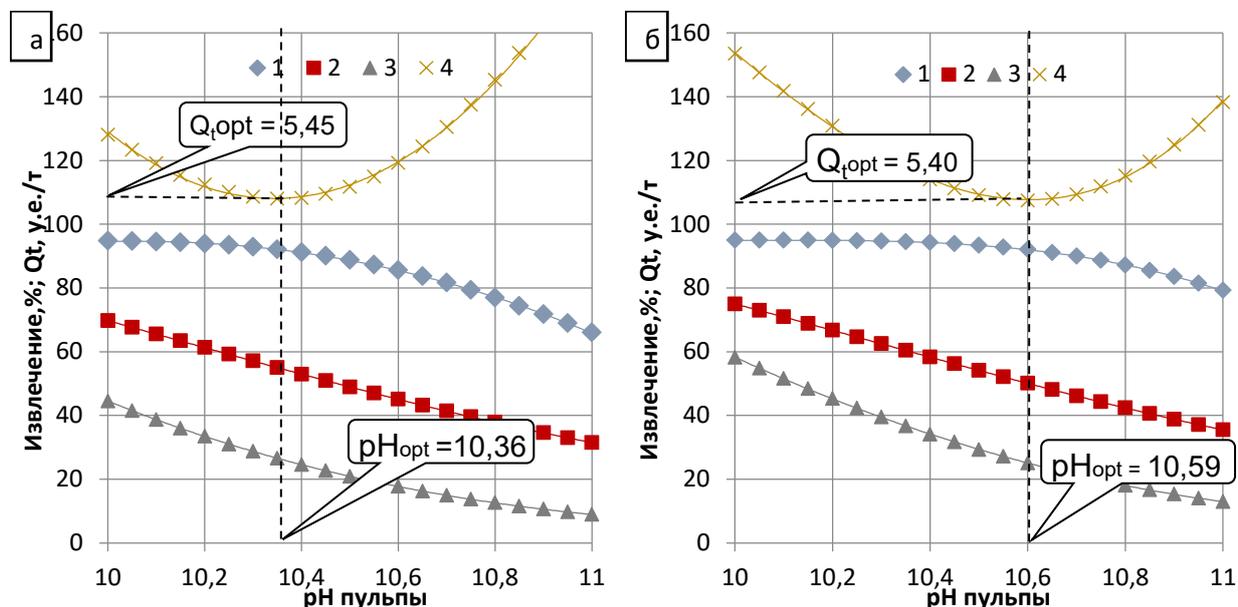


Рисунок 11 - Зависимость извлечений меди (1), молибдена (2) и пиритного железа (3) в коллективный концентрат и критерия оптимизации Q_i (4) от рН в коллективной флотации для массивных первичных руд (а) и смешанных вторичных сульфидизированных руд (б)

Оптимальные параметры процессов измельчения и флотации, представленные в таблице 3, были использованы в качестве базовых при расчете значений установочных функций – задатчиков в системе автоматического регулирования процессов измельчения и флотации.

Таблица 3 - Целевые функции в системах управления процессами измельчения и классификации

№	Параметры процесса	Типы руд				
		МПР	СВСП	БПР	СОР	ССР
1	Крупность измельчения – выход класса – 74 мкм, %	67,5	64,5	67,0	66,0	66,0
2	рН пульпы в основной флотации	10,36	10,59	10,50	10,31	10,55
3	Расход собирателя AeroMX 51-40, г/т	10,0	12,0	10,0	13,0	17,5
4	Расход вспенивателя, г/т	13,0	16,0	13,0	16,0	19,0

Типы руд: МПР - массивные первичные руды; СВСП - смешанные вторичные сульфидизированные руды; БПР – бедные пиритизированные руды; СОР- смешанные окисленные руды; ССР - смешанные серитизированные руды.

Разработанный алгоритм был проверен в действующей АСУТП обогатительной фабрики. Схема системы автоматизированного управления реагентным режимом коллективной флотации, приведенная на рисунке 12, обеспечивает регулирование расходов реагентов с учетом вещественного состава и сортности руды и показателей обогащения.

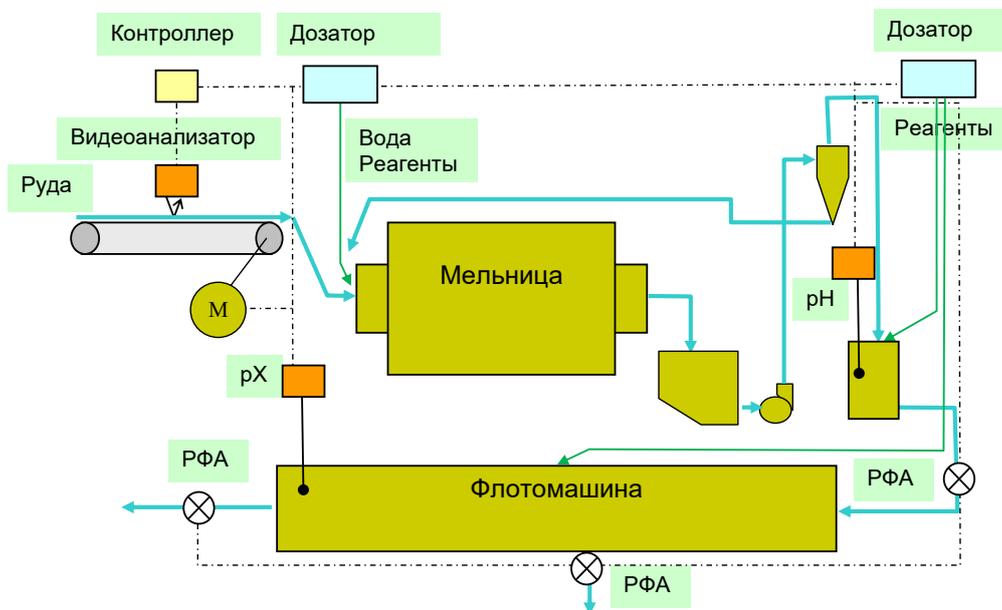


Рисунок 12 - Схема системы автоматического регулирования процессов измельчения и коллективной флотации. Средства измерений: рН – датчик рН среды; РФА – датчик вещественного состава; рХ – датчик концентрации собирателя

Система автоматизированного управления включала анализатор минерального состава руды, датчики вещественного состава измельченной руды и продуктов обогащения (рентгенофлуоресцентные анализаторы, РФА), ионометрические датчики рН среды и спектральный датчик концентрации собирателя.

Результаты испытаний разработанного алгоритма управления показали, что его применение позволяет повысить эффективность обогащения медно-молибденовых руд (таблица 5).

Таблица 5 - Результаты испытаний алгоритма управления реагентным режимом коллективной медно-молибденовой флотации

Режим управления	Расход, г/т		рН	β_{Cu} , %	β_{Mo} , %	β_{Fe} , %	ε_{Cu} , %	ε_{Mo} , %	ε_{Fe} , %	Q_t , USD/т
	собирателя	вспенивателя								
Базовый	15,1	7,3	10,15	13,65	0,24	10,45	90,37	32,03	29,26	5,34
Разработанный	15,3	7,3	10,36	14,22	0,26	9,12	90,41	34,65	24,93	5,25

Оценка экономического эффекта от использования разработанного алгоритма и системы управления производилась на основе рассчитанного снижения приведенных потерь ценных компонентов, составившая 9 центов на 1 т руды. В пересчете на производительность секции и с учетом увеличения затрат на реагенты расчетный экономический эффект составит 145 тыс. долларов США.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В результате проведенных исследований решена задача оптимизации технологии обогащения медно-молибденовых руд на основе комплексной системы технологических и экономических критериев, обеспечившая повышение извлечения ценных компонентов и сокращение расходов флотационных реагентов.

Основные выводы по работе.

1. Обоснованы и разработаны комплексные критерии оптимизации, учитывающие влияние технологических и экономических факторов на конечную эффективность процессов измельчения и флотации, учитывающие элементный и минеральный состав руды, флотируемость ценных компонентов, цены металлов, отражающие влияние на эффективность обогащения селективности флотации и качества получаемых концентратов.

2. Разработана спектральная методика измерения концентрации аллилового эфира аминксантогеновой кислоты в водной фазе пульпы. С использованием разработанной спектральной методики установлены зависимости остаточной концентрации неионогенного собирателя AeroMX-5140 от его расхода, крупности измельченной руды и рН водной фазы пульпы в коллективной медно-молибденовой флотации, обосновывающие возможность использования концентрации неионогенного собирателя в качестве информационного параметра при оптимизации флотационного процесса.

3. Разработана методика определения оптимальной крупности измельчения медно-молибденовой руды, использующая регрессионную модель, связывающую снижение извлечения меди, молибдена, пирита в операции коллективной флотации с уменьшением концентрации собирателя в водной фазе пульпы и учитывающая изменение концентрации собирателя при повышении степени измельченности руды. Разработанная методика применена для расчета оптимальной крупности измельчения медно-молибденовой руды на обогатительной фабрике ГОКа «Эрдэнэт».

4. Разработана усовершенствованная методика градиентной оптимизации реагентных режимов флотационного обогащения медно-молибденовых руд с использованием полного факторного эксперимента, использующая однокритериальный алгоритм и экономико-технологические критерии эффективности, обеспечивающие наиболее точное определение области оптимальных технологических режимов. Разработанная методика использована в программно-методическом обеспечении лабораторных исследований на обогатительной фабрике

ГОКа «Эрдэнэт».

5. Разработан алгоритм управления процессами измельчения и флотации на основе опережающей оценки сортности перерабатываемых руд, предусматривающий применение в качестве критерия при определении сортности типовых руд величины поглотительной способности по отношению к собирателю и использование технологического-экономического критериев для определения оптимальных параметров технологических процессов.

Основные результаты диссертационной работы представлены в публикациях:

Публикации в изданиях из списка ВАК

1. Эрдэнэзуул Жаргалсайхан, Морозов В.В. Оптимизация реагентных режимов флотации медно-молибденовых руд с применением экономико-ориентированных критериев // Горный информационно-аналитический бюллетень (научно-технический журнал). -2019. - №3. - С.210-220.

2. Морозов В. В., Пестряк И. В., Эрдэнэзуул Ж. Влияние концентрации неионогенного собирателя — аллилового эфира амылксантогеновой кислоты на флотацию медно-молибденовых руд // Цветные металлы. - 2018. - №11. –С.14-20.

3. Эрдэнэзуул Ж., Морозов В.В. Оптимизация крупности измельчения медно-молибденовых руд с использованием модель-ориентированных критериев // Горный информационно-аналитический бюллетень (научно-технический журнал). - 2018. -№ 8. -С. 176-183.

Другие публикации.

4. Эрдэнэзуул Жаргалсайхан, Тумэн-Аюуш Батмунх, Морозов В.В. Совершенствование реагентного режима молибденовой флотации с применением критерия оптимизации – функции приведенных потерь // труды XXIV Международной научно-технической конференции «Научные основы и практика переработки руд и техногенного сырья», Екатеринбург, 2019. – С. 31-34.

5. Эрдэнэзуул Жаргалсайхан, Тумэн-Аюуш Батмунх, Морозов В.В. Оптимизация обогащения медно-молибденовых руд с использованием комплексной системы технологических и экономических критериев // Труды Конгресса обогатителей стран СНГ 2019, МИСиС, 2019. –С.107-110.

6. Эрдэнэзуул Ж., Морозов В.В. Исследование влияния крупности измельчения на концентрацию собирателя и флотацию медно-молибденовых руд // материалы XXIII международной научно-технической конференции «Научные основы и практика переработки руд и техногенного сырья», проводимой в рамках XVI Уральской горнопромышленной декады, 2018. - С. 451-455.

7. Erdenezul Jargalsaikhan¹, Khurelchuluun Ishgen. Process optimization of grinding and flotation of copper-molybdenum ores with the use of model-based criteria // Proceedings of 22nd International Conference on Environment and Mineral Processing, Ostrava, Czech republic, 2018. -Pp. 165-170.

8. Морозов В.В., Эрдэнэзуул Жаргалсайхан. Оптимизация процессов измельчения и флотации с применением модель-ориентированных критериев // Труды

международной конференции «Современные проблемы комплексной переработки труднообогатимых руд и техногенного сырья» (Плаксинские чтения), Красноярск, 2017. – С. 244-247.

9. Морозов В.В., Эрдэнэзуул Жаргалсайхан. Оптимизация процесса флотации с применением экономических критериев // Труды XI Конгресса обогатителей стран СНГ, Москва, МИСиС, 2017. –С.161-164.

10. Erdenezul Jargalsaikhan, Morozov V. Optimization of flotation grinding processes using model-based criteria // Proceedings of XIII International Mineral Processing and Recycling Conference, Belgrade, Serbia, 2019. - Pp.197-202.