

## **ОТЗЫВ**

### **ОФИЦИАЛЬНОГО ОППОНЕНТА**

Нафталя Михаила Нафтольевича на диссертационную работу Третьяка Максима Алексеевича по теме: **«Автоклавная переработка коллективных медно-цинковых концентратов»**, представленную на соискание учёной степени кандидата технических наук по специальности 2.6.2 – Металлургия черных, цветных и редких металлов

### **Цели и задачи диссертационной работы**

Диссертационная работа посвящена изучению особенностей протекания процессов низкотемпературной автоклавной переработки коллективных медно-цинковых концентратов и гидротермальной обработки продуктов автоклавного окислительного выщелачивания в присутствии поверхностно-активных веществ.

### **Актуальность выполненной работы**

Медь и цинк – основные металлы, во многом определяющие развитие современной цивилизации. В частности, уникальные свойства меди – пластичность, способность образовывать сплавы, высокая электропроводность, коррозионная стойкость и теплопроводность – определили возросший спрос на её производство в различных секторах промышленности, особенно – в области электротехники и машиностроения. Согласно прогнозам Международной медной группы (International Copper Study Group, ICSG) и Минэкономразвития РФ, в результате стремительного развития «зелёной» экономики и возобновляемых источников энергии, с увеличением объёмов производства электромобилей, бытовой техники, электроники ожидается, что мировой спрос на медь к 2030 г. вырастет более, чем на 40 % и составит 36,0 млн. тонн. При этом мировая цена меди прогнозируется на уровне 12-14 тыс. USD за тонну.

Мировые тенденции развития металлургии цинка также свидетельствуют о непрерывном увеличении его потребления, расширении сфер использования, повышении цены на цинк и цинкосодержащую продукцию. Одновременно проводятся обширные изыскательские работы, осваиваются новые месторождения цинка, увеличивается доля вторичного сырья. Вместе с тем, в течение последних лет сохраняется нарастающий дефицит цинка, поскольку темпы роста его потребления опережают мощности существующих предприятий.

Обеднение минерального сырья, усложнение характера вкрапленности полезных минералов, повышение твердости руды при одновременном росте стоимости электроэнергии и других ресурсов – основные трудности, с которыми приходится

постоянно сталкиваться горнорудной промышленности при эксплуатации существующих и создании новых фабрик.

За последние двадцать лет в структуре перерабатываемых медно-цинковых, медно-свинцовых, свинцово-цинковых и медно-свинцово-цинковых руд возросла доля труднообогатимых разновидностей, что на стадии обогащения сопровождается существенными потерями цинка (20–40 %), свинца (40–50 %), меди (25–35 %), редких и благородных металлов (до 50 %) и производством низкосортных концентратов и промпродуктов.

Этим неблагоприятным факторам ведущие научно-производственные предприятия, проектные и машиностроительные фирмы противопоставляют усовершенствованные технологии, новейшие разработки в области автоклавной гидрометаллургии, создание автогенных процессов и уникальное оборудование большой единичной мощности.

Кардинальное решение проблем переработки труднообогатимого полиметаллического сырья может быть обеспечено на основе рационального сочетания возможностей обогатительного и металлургического переделов в рамках комбинированных технологий, что предполагает выведение из обогатительного цикла коллективных медно-цинковых концентратов или промпродуктов, концентрирующих в своем составе тонкие сростки минералов, неразделимые флотационными методами.

Поиск новых, нетрадиционных, технологий получения и переработки коллективных медно-цинковых концентратов сегодня как никогда актуален, поскольку запасы российских месторождений легкообогатимых полиметаллических руд практически исчерпаны.

Наиболее перспективными являются комбинированные технологии, основанные на совмещении современных автогенных пиро- и автоклавных гидрометаллургических процессов. В диссертационной работе предложен один из вариантов такой композиции, включающий оригинальный способ переработки коллективных сульфидных концентратов на основе сочетания автоклавного сернокислотного выщелачивания с последующим гидротермальным обогащением, обеспечивающим получение качественного медного концентрата, пригодного для его эффективной пирометаллургической переработки.

Исследованный в диссертации вариант автоклавной обработки коллективных медно-цинковых концентратов — один из наиболее эффективных методов их обогащения и очистки от ряда примесей. При этом, предлагаемый в работе способ комбинированной автоклавно-пирометаллургической переработки коллективных медно-цинковых концентратов, безусловно, следует рассматривать в качестве основы



для создания оптимальной технологической схемы переработки труднообогатимых медно-цинковых руд.

В связи с этим, диссертационная работа Третьяка М.А., посвящённая изучению особенностей протекания процессов низкотемпературной автоклавной переработки коллективных медно-цинковых концентратов и гидротермальной обработки продуктов автоклавного окислительного выщелачивания, несомненно, является актуальной.

### **Обоснованность научных положений, выводов и рекомендаций**

При проведении исследований гидротермального взаимодействия коллективных медно-цинковых концентратов и индивидуальных сульфидных минералов с раствором сульфата меди, анализе материалов и конечных продуктов диссертант использовал аттестованные методы: энергодисперсионной рентгенофлуоресцентной спектрометрии (EDX-7000, Shimadzu) и атомно-абсорбционной спектрометрии (NovAA 330, AnalytikJena) – для анализа химического состава исходного сырья и кеков автоклавного окислительного выщелачивания (АОВ); метод рентгеновской дифрактометрии (XRD-7000, Shimadzu) – для определения фазового состава сырья и конечных продуктов; метод лазерной дифракции (Helos/BR, Sympatec и ST, BetterSize) – для определения размера частиц исследуемого сырья и кеков гидротермальной обработки (ГТО). Кеки ГТО проанализированы с применением сканирующей электронной микроскопии и энерго-дисперсионного анализа (SEM-EDS) (S5123, Tescan Vega). Концентрация  $\text{H}_2\text{SO}_4$  и Fe (II) в растворах АОВ определены методом классической титриметрии. Работа выполнялась с применением методов математического планирования эксперимента, компьютерных программ моделирования и обработки информации. Использование данных методов позволило определить химический и минеральный состав исходного сырья, продуктов и получаемых полупродуктов, а также провести оптимизацию автоклавных процессов переработки коллективных медно-цинковых концентратов и кинетический анализ гидротермального взаимодействия сфалерита и пирита с растворами сульфата меди в системе « $\text{MeS} - \text{CuSO}_4 - \text{H}_2\text{SO}_4$ » с применением модели сжимающегося ядра (SCM).

Результаты, полученные при использовании данных методик, надёжно обоснованы и убедительны. Автором проведён анализ научно-технической литературы, поставлены задачи. Основные положения и результаты диссертации доложены и обсуждены на Международных конференциях, а также опубликованы в рецензируемых научных журналах и изданиях, в том числе, входящих в состав баз цитирования Web of Science и Scopus.

### **Достоверность результатов**

Достоверность полученных результатов сомнений не вызывает, поскольку в работе использованы стандартизированные методы анализа, сертифицированное оборудование, современные средства и методики проведения исследований, достоверные и аттестованные методики выполнения измерений. Результаты исследований подтверждаются согласованностью данных эксперимента и научных выводов, воспроизводимостью результатов лабораторных испытаний.

### **Научная новизна результатов работы**

Автором диссертации впервые установлено, что при совместном окислении  $\text{FeS}_2$  и  $\text{CuFeS}_2$  в условиях низкотемпературного АОВ халькопирит значительно интенсифицирует степень окисления пирита. Показана возможность эффективного использования ПАВ (лигносульфоната натрия – ЛСН) на стадии высокотемпературной ГТО (180-220 °С) сульфидных минералов: сфалерита ( $\text{ZnS}$ ) и пирита ( $\text{FeS}_2$ ) растворами сульфата меди. Проведено кинетическое исследование гидротермального взаимодействия растворов сульфата меди с  $\text{ZnS}$  и  $\text{FeS}_2$  в расширенном диапазоне изменяемых параметров, предложен возможный механизм протекания процесса. Предложен вероятный механизм интенсифицирующего воздействия ЛСН в условиях ГТО на процесс осаждения новообразованных сульфидов меди на поверхности сфалерита и пирита. растворами сульфата меди, который диссертант объяснил адсорбционно-расклинивающим воздействием данного ПАВ. Получены кинетические уравнения для описания процессов взаимодействия сульфидных минералов с растворами сульфата меди в системах « $\text{MeS-CuSO}_4\text{-H}_2\text{SO}_4$ », показано, что исследованные процессы протекают во внутридиффузионном режиме. Предложены оптимальные условия гидрометаллургического обогащения коллективных медно-цинковых концентратов на основе использования комбинации автоклавных процессов «АОВ-ГТО».

### **Научная (теоретическая) и практическая значимость**

Результаты выполненных соискателем исследований имеют высокую научную ценность и практическую значимость для металлургической отрасли промышленности, поскольку разработанный способ, основанный на сочетании сернокислотного АОВ и ГТО, позволяет получать из низкосортных медно-цинковых концентратов качественный медный концентрат, переработка которого в плавильных агрегатах обеспечит высокие технико-экономические показатели.



Диссертантом определены оптимальные условия процессов низкотемпературного АОВ коллективного медно-цинкового концентрата и высокотемпературного ГТО. Это обеспечивает: на стадии АОВ – максимальную степень окисления халькопирита, пирита и сфалерита, а на стадии последующего ГТО – высокую степень концентрирования меди в твёрдом продукте (качественном медном концентрате – 23 % Cu), пригодном для его пирометаллургической переработки, а цинка – в растворе со сквозным извлечением более 99 %.

Показано положительное влияние добавки ЛСН на результаты выщелачивания цинка из сфалерита и железа из пирита на стадии ГТО, а также осаждения меди на сфалерите и пирите.

Практическая ценность полученных результатов очевидна. В результате проведённых исследований разработан способ переработки низкосортного медно-никелевого сырья, основанный на процессах автоклавного разделения меди и цинка. Показана возможность селективного перевода цинка в раствор из коллективных сульфидных медно-цинковых концентратов с концентрированием меди в самостоятельном твёрдом продукте на стадии ГТО. Разработана принципиальная технологическая схема автоклавной переработки медно-цинковых концентратов, с получением обогащенного медного концентрата для переработки в действующих пирометаллургических производствах.

### **Оценка содержания диссертации**

Диссертация Третьяка М.А. изложена на 134 страницах, включает 40 рисунков и 27 таблиц. Состоит из введения, пяти глав, заключения и библиографического списка в составе 109 наименований.

*В первой главе* изложены современные способы переработки сульфидного медьсодержащего сырья. Показано, что истощение богатых месторождений цветных металлов является причиной вовлечения в производственный цикл бедных, трудновскрываемых полиметаллических руд. Упорность таких руд усложняет их переработку, повышая потери ценных компонентов и понижая рентабельность на каждом этапе производства. Отмечено, что в медном производстве всё более широкое применение находят гидрометаллургические технологии.

Переход к чисто гидрометаллургическим технологиям требует разработки высокоэффективных технических решений, способных конкурировать с автогенными пирометаллургическими процессами. Наиболее перспективными являются комбинированные технологии, основанные на совмещении современных пиро- и автоклавных гидрометаллургических процессов. Приведены примеры коммерческого

использования гидрометаллургических технологий, включая: хлоридные, биохимические, атмосферные и автоклавные сульфатные. Рассмотрены известные варианты гидрометаллургических процессов, используемых для обогащения медных концентратов и промпродуктов. Проанализированы их преимущества и недостатки.

Из всего многообразия известных способов в качестве наиболее перспективного варианта диссертант определил технологию химического дообогащения низкосортных коллективных медно-цинковых концентратов путем их автоклавной обработки в сульфатных средах по схеме «АОВ-ГТО». Такая комбинация позволяет селективно извлекать ценные компоненты в полупродукты, пригодные для традиционных схем производства металлов. При этом низкотемпературное АОВ обеспечивает окисление сульфидной серы в элементную форму с переводом её в кеки выщелачивания. Процесс ГТО позволяет не только обогатить продукт обработки по меди, но и дополнительно очистить его от примесей.

Соискатель отметил, что химизм гидротермального взаимодействия сульфидных минералов–примесей с раствором сульфата меди, а также кинетические особенности процессов изучены недостаточно. В современных публикациях также отсутствуют данные о проведении исследований по оптимизации процесса ГТО коллективных медно-цинковых концентратов. Наряду с этим диссертантом поставлена задача изучить физико-химические закономерности процесса ГТО минералов сфалерита и пирита, входящих в состав коллективного медно-цинкового концентрата, с растворами сульфата меди (II) в присутствии ПАВ – лигносульфоната натрия (ЛСН), определить эффективные условия максимального перевода металлов-примесей (Fe и Zn) в раствор и извлечения меди в кек.

*Во второй главе* системно проанализированы общие принципы автоклавного окисления сульфидов. Приведены результаты экспериментов по низкотемпературному АОВ как индивидуальных образцов халькопиритного и пиритного концентратов, так и их смеси. Оценивали влияния ряда параметров на степень разложения  $\text{CuFeS}_2$  и  $\text{FeS}_2$ , в том числе: парциального давления кислорода; продолжительности выщелачивания; концентрации серной кислоты, ионов меди (II) и железа (III) в исходном растворе.

Установлено, что при индивидуальном выщелачивании образцов  $\text{CuFeS}_2$  и  $\text{FeS}_2$  на степень их окисления наибольшее влияние оказывают два параметра: продолжительность процесса и парциальное давление кислорода. При совместном выщелачивании образцов  $\text{FeS}_2$  и  $\text{CuFeS}_2$  ( $[\text{FeS}_2]/[\text{CuFeS}_2] = 2:1$ ) отмечено, что парциальное давление кислорода практически не влияет на окисление халькопирита, но при этом значительно интенсифицирует степень окисления пирита (с 42 до 75 %).



На основании результатов исследований диссертантом построены уравнения множественной регрессии, отражающие зависимость показателей окисления халькопирита и пирита при низкотемпературном АОВ от варьируемых параметров процесса.

Установлено положительное влияние халькопирита на степень окисления пирита при их совместном низкотемпературном АОВ. Подобраны условия для избирательного окисления пирита из коллективного концентрата при следующих параметрах: парциальное давление кислорода 0,75 МПа; исходная концентрация:  $\text{H}_2\text{SO}_4$  – 50 г/дм<sup>3</sup>, меди (II) – 5 г/дм<sup>3</sup>, железа (III) – 10 г/дм<sup>3</sup>; продолжительность – 240 мин. В этих условиях пирит окисляется на 70 %, а халькопирит – на 35 %.

*В третьей главе* оценивали влияние ряда параметров гидротермальной обработки (ГТО) на степень разложения  $\text{ZnS}$ ,  $\text{FeS}_2$  и  $\text{CuFeS}_2$ . Исследование гидротермального взаимодействия минералов сфалерита и пирита с растворами сульфата меди (II) показало значительный положительный эффект от введения лигносульфоната натрия (ЛСН) в процесс ГТО. На показатели ГТО халькопирита введение (0,25-1 г/дм<sup>3</sup>) ЛСН значимого влияния не оказывает.

Диссертантом установлено, что влияние исходной концентрации серной кислоты на степень разложения сфалерита и пирита в процессе ГТО является двояким. С одной стороны, в отсутствие ЛСН увеличение концентрации  $\text{H}_2\text{SO}_4$  снижает степень извлечения железа и цинка в раствор, что обусловлено экранирующим влиянием элементарной серы, образующейся в ходе ГТО. Плёнки элементарной серы смачивают реакционную поверхность частиц  $\text{ZnS}$ ,  $\text{FeS}_2$  и  $\text{CuFeS}_2$ , создавая диффузионный барьер, препятствующий протеканию обменных реакций. Вместе с тем, при добавке ЛСН в процесс ГТО влияние  $\text{H}_2\text{SO}_4$  диаметрально меняется: ЛСН препятствует образованию плёнки элементарной серы на поверхности сульфидов, что обеспечивает доступ ионов меди к реакционной поверхности обрабатываемых частиц и отвод продуктов реакции (железа и цинка) в объём раствора. В этой ситуации увеличение исходной концентрации  $\text{H}_2\text{SO}_4$  значительно улучшает процесс ГТО: интенсифицирует разложение сульфидных минералов и увеличивает степень осаждения меди.

При ГТО сфалерита в присутствии ЛСН лучшие показатели степени извлечения цинка (71 %) и осаждения меди (83 %) достигнуты при  $t = 220$  °С; начальной концентрации:  $\text{H}_2\text{SO}_4 = 30$  г/дм<sup>3</sup>, ЛСН = 0,25 г/дм<sup>3</sup>, меди = 15 г/дм<sup>3</sup>. При ГТО пирита в присутствии ЛСН лучшие показатели степени извлечения железа (33,9 %) и осаждения меди (26,8 %) достигнуты при  $t = 220$  °С; начальной концентрации:  $\text{H}_2\text{SO}_4 = 30$  г/дм<sup>3</sup>, ЛСН = 1 г/дм<sup>3</sup>, меди = 15 г/дм<sup>3</sup>. Ввиду того, что пирита в кеке АОВ значительно



больше, чем сфалерита (26,9 против 1,5 %), диссертантом в дальнейших исследованиях ГТО принято решение использовать оптимальные параметры, характерные для пирита.

**В четвертой главе** работы представлены результаты исследования кинетических закономерностей ГТО сфалерита и пирита растворами сульфата меди (II) в присутствии ЛСН. Для изучения кинетических характеристик процессов применяли модель сжимающегося ядра (SCM). На основании модели SCM соискателем подобраны кинетические уравнения, характеризующие каждую стадию процесса ГТО, рассчитаны кажущиеся энергии активации для первой, второй стадии ГТО сфалерита и ГТО пирита.

Определён характер зависимости скорости реакции разложения  $ZnS$  и  $FeS_2$  от концентрации реагентов ( $H_2SO_4$ ,  $Cu$ ). Показано, что увеличение исходных концентраций реагентов повышает скорость реакции ГТО сопутствующих сульфидных минералов. Определены эмпирические порядки реакций по исходным концентрациям  $H_2SO_4$  и  $Cu$  для первой-второй стадий ГТО сфалерита и ГТО пирита.

Выведены обобщенные уравнения для описания кинетики гидротермальной обработки сфалерита и пирита растворами сульфата меди (II) в присутствии ЛСН.

Установлен режим гидротермальной обработки сульфидных минералов в присутствии лигносульфоната натрия. Для 1-й стадии ГТО сфалерита – кинетический, для второй стадии ГТО сфалерита и ГТО пирита – внутридиффузионный.

На основе применения метода СЭМ-ЭДС доказано положительное влияние ЛСН на кинетику реакций ГТО сульфидных минералов.

Обобщение результатов исследований позволило автору диссертации высказать предположение о механизме взаимодействия пирита с растворами сульфата меди (II) в присутствии ЛСН. Положительная роль ЛСН в процессе ГТО пирита рассмотрена с позиции двойного воздействия на химический процесс: во-первых, ЛСН способствует увеличению реакционной поверхности за счёт диспергирования крупных частиц в результате расклинивающего эффекта; во-вторых, ЛСН очищает поверхность сульфидов от расплавленной плёнки элементной серы и новообразованных сульфидов меди, что в значительной степени устраняет диффузионное торможение процесса, обеспечивая свободный доступ реагентов к реакционной поверхности.

**В пятой главе** диссертантом на основе проведённых исследований предложены контуры технологической схемы гидрометаллургической переработки коллективных медно-цинковых концентратов, состоящей из двух стадий: низкотемпературного АОВ и ГТО в присутствии ПАВ (ЛСН). Полученный твердый продукт может быть использован на медеплавильных предприятиях путём его подшихтовки к исходному сырью в классической пирометаллургической схеме. Предусмотрена очистка растворов



ГТО от Fe и Zn, с их удалением из схемы в виде промпродуктов. Обратный раствор после очистки от Fe и Zn предложено направлять на стадию АОВ.

На основании результатов укрупненно-лабораторных исследований диссертант рассчитал материальный баланс промышленного производства, основанного на низкотемпературном АОВ и ГТО мощностью 500 тыс. т богатого по меди продукта в год. Проработан вариант аппаратного оформления технологической схемы и принципиальная схема цепи аппаратов.

Предложенная технологическая схема гидрометаллургического обогащения халькопиритных концентратов позволяет увеличить более чем в 2 раза содержание меди в конечном продукте по сравнению с исходным коллективным концентратом (с 11,03 до 23,1 %). При этом ~99 % цинка и ~64 % железа при последующей очистке раствора ГТО извлекаются в самостоятельные промпродукты. Способы переработки полученных промпродуктов требуют дальнейшего исследования.

Выполненный соискателем технико-экономический расчёт подтверждает эффективность предложенной технологии гидрометаллургического обогащения коллективных медно-цинковых концентратов. Ожидаемый срок окупаемости – 5 лет.

Также сформулированы предложения по перспективному использованию результатов исследований. В частности, показано, что в дальнейшем планируется детальное изучение механизма воздействия ЛСН на сульфидные минералы на стадии ГТО. Поскольку при гидротермальной обработке халькопиритсодержащих концентратов помимо железа (65-70 %) в раствор переходит более 90 % цинка, никеля и кобальта, предлагаемый способ перспективен для переработки не только медно-цинковых концентратов, но и других полиметаллических промпродуктов обогащения с селективным переводом этих элементов в раствор и их последующим извлечением. Также представляет большой практический интерес изучение возможности применения ПАВ в процессе ГТО для рентабельной переработки отходов медной промышленности и упорного полиметаллического сырья.

### **Публикации, отражающие основное содержание диссертации**

По теме диссертации опубликовано 11 научных работ, 7 из них в рецензируемых научных журналах и изданиях, рекомендованных ВАК и Аттестационным советом УрФУ, из них 6, входящих в состав баз цитирования Web of Science и Scopus. Тезисы диссертационной работы были апробированы на 6 международных научно-технических конференциях.

Диссертация и автореферат оформлены в соответствии с установленными требованиями.

Автореферат и опубликованные статьи полностью отражают основное содержание диссертации.

## ЗАМЕЧАНИЯ И ВОПРОСЫ ПО ДИССЕРТАЦИОННОЙ РАБОТЕ

По диссертационной работе имеются следующие замечания и вопросы.

### I. Замечания

1. В диссертации (разд. 2, 4 и 5) отсутствуют: таблицы 2.3, 2.5 и 4.6; рисунки 5.1 и 5.2. (нумерация начинается с рисунка 5.3). Отсутствует название таблицы 4.7.
2. В уравнениях реакций 1.2, 1.4, 3.4 и 3.10 неверно расставлены стехиометрические коэффициенты. Необходимо уравнивать левую и правую части по всем элементам и соединениям.
3. На стр. 30, подраздел «Mt. Gordon». Предлагается выражение «... тяжело подвержены флотации» заменить на «труднообогащаемые методом флотации...». Здесь же: выражение «суммарно медь извлекали на более, чем 90 %» предлагается заменить на «суммарное извлечение меди превышало 90 %».
4. Стр. 31, абзац 3. Соотношения ( $[\text{Cl}^-/\text{Cu}]$  или  $[\text{Br}^-/\text{Cu}] = 0,08/1$ ). Необходимо написать Cu в указанных соотношениях стандартным шрифтом. Здесь же (ниже) в формуле  $\text{CuSO}_4$  серу нужно написать стандартным шрифтом.
5. Стр. 32, абзац 3. Выражение: «золото доставалось из автоклавного кека...» предлагается заменить на «золото извлекали из автоклавного кека...».
6. Стр. 34. Предпоследний абзац. Предлагается заменить «электролиз меди» на «электроэкстракция меди». В данном контексте это уточнение принципиально.
7. Стр. 43. Предлагается выражение «хорошим окислителем» поменять на «сильным окислителем».
8. Стр. 48. Пункт 2.4. Необходимо указать, при какой температуре проводили эксперименты по низкотемпературному АОВ. Здесь же: название подраздела «**Методология** проведения эксперимента» предлагается заменить на «**Методика** проведения эксперимента». Методология – это стратегия (План-программа эксперимента).
9. Стр. 49-50, подраздел 2.6. Предлагается вынести в раздел «Приложения».
10. Стр. 50, подраздел 2.6, п. 6. Формула (2.10) не характеризует процент окисления пирита, поскольку железо в концентрате и железо в кеке находится не только в составе пирита, но и входит в состав халькопирита. Данная формула позволяет



рассчитать суммарную степень перехода железа в раствор из всех железосодержащих минералов (пирита, халькопирита и др.).

11. Рисунки 2.4 и 2.5 (стр. 54 и 55). Предлагается уточнить названия осей, в т.ч.: ось абсцисс – «Зависимость *степени* окисления халькопирита»; ось ординат – «*Степень* окисления халькопирита».

12. Стр. 56, абзац 1. Здесь и далее по тексту. Множественный коэффициент корреляции обозначается как  $R$ , в то время как  $R^2$  – это коэффициент множественной детерминации.

13. Стр. 62, первое предложение. Предлагается заменить выражение: «Приведено графическое описание...» на «Приведено графическое изображение...».

14. В уравнениях (2.29) и (2.30) отсутствует главный независимый параметр – продолжительность процесса. Если он был фиксированным, следует указать значение этого параметра.

15. Рисунки 3.4-3.7 (стр. 73-77). Не обозначены диаграммы, входящие в состав рисунков. Нужно обозначить диаграммы соответственно символами А, Б, В и Г.

16. Рисунок 5.3 (стр. 105). На схеме не показана подача кислорода в АОВ, а также подача реагентов, используемых в операциях АОВ и ГТО ( $H_2SO_4$ ,  $Fe^{3+}$ ,  $Cu^{2+}$ , ЛСН). Также не показаны продукты, получаемые в процессе очистки раствора ГТО от железа и цинка.

17. Стр. 105, первый абзац. Показано, что сквозное извлечение цинка в раствор составило 99,9 %. Согласно расчёту, извлечение цинка в раствор 99,0 %.

## II. Вопросы

1. В работе, для окислительного автоклавного выщелачивания коллективных медно-цинковых концентратов принят низкотемпературный режим, т.е. процесс протекает при температуре менее 115 °С, а точнее – при 100 °С.

**Вопрос.** Какими технологическими преимуществами обусловлен выбор именно низкотемпературного режима АОВ? Или здесь основную роль сыграл экономический фактор (более низкие капитальные затраты)? На стр. 28 приведены недостатки высокотемпературного АОВ. Представляется, что п. 3 сильно преувеличен: что конкретно подразумевается под «техногенными катастрофами»?

2. Показано (стр. 72, рис. 3.3), что повышенные концентрации ЛСН в пульпе при проведении ГТО ( $> 0,25$  г/дм<sup>3</sup>) отрицательно влияют на показатели выщелачивания цинка и осаждение меди.

**Вопрос.** Каков может быть механизм этого явления?

3. В таблице 4.5 (стр. 87) показано, что кажущаяся энергия активации ( $E_a$ ) разложения пирита при ГТО составляет 33,221 кДж/моль. Столь высокое значение  $E_a$  свидетельствует о том, что процесс разложения пирита протекает в кинетическом режиме (лимитирован скоростью химической реакции). Вместе с тем, в тексте диссертации (стр. 84, 88 и 100) сказано, что режим ГТО пирита – диффузионный.

**Вопрос.** Как можно объяснить такое противоречие?

4. В таблице 5.6 (стр. 104) в кеке ГТО, проведённом при 180 °С, содержание меди в конечном кеке составило всего 2,55 %. В исходном коллективном концентрате содержание меди 5,91 %.

**Вопрос.** Как перераспределилась медь в данном эксперименте и нет ли здесь опечатки?

5. В главе 5 при расчёте габаритов оборудования для проведения операций АОВ, и ГТО определены автоклавы 125 м<sup>3</sup>. При этом указано, что рабочая вместимость автоклава составляет 100 м<sup>3</sup>. В случае защиты внутренней части корпуса автоклава от коррозии может быть использована кирпичная футеровка (вариант автоклавов ГМП НМЗ, Норильск). Но в этом случае рабочая вместимость 125 м<sup>3</sup> автоклава составляет только 65 м<sup>3</sup>.

**Вопрос.** Каким способом будет защищён корпус автоклава от контакта с пульпой?

Следует отметить, что высказанные замечания не снижают высокой научной и практической значимости выполненной работы.

## ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Диссертация *Третьяка Максима Алексеевича* является завершённой научно-квалификационной работой, выполненной на высоком научном уровне и имеющей несомненную практическую ценность.

В работе получены новые научные данные, позволившие решить актуальную и важную в теоретическом и практическом отношениях задачу по созданию основы технологии автоклавного обогащения коллективных медно-цинковых концентратов. Переработка обогащённых концентратов в современных плавильных агрегатах увеличит производство ценной металлопродукции и повысит технико-экономические показатели.

Результаты работы имеют существенное значение для отраслевой науки и различных предприятий промышленного комплекса РФ, в т.ч.: РМК», ОАО «УГМК»,



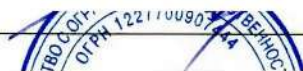
АО «Полиметалл» и др.

Считаю, что диссертационная работа **Третьяка М.А.** отвечает требованиям п. 9 Положения о присуждении учёных степеней в ФГАОУ ВО «Уральский федеральный университет имени первого Президента России Б.Н. Ельцина», предъявляемым к кандидатским диссертациям, а её автор, **Третьяк Максим Алексеевич**, заслуживает присуждения ему учёной степени кандидата технических наук по специальности 2.6.2. – Металлургия чёрных, цветных и редких металлов.

Официальный оппонент,

кандидат технических наук,

Генеральный директор ООО «БАЗИС ПРО»



Нафталъ Михаил Нафтольевич

23.11.2023

115191, г. Москва, пер. Духовской, д. 17, стр. 15, помещ. 12Н/2,  
ком. 12, офис Б-03

E-mail: [qualitetmet@mail.ru](mailto:qualitetmet@mail.ru); [Igorshreder@yandex.ru](mailto:Igorshreder@yandex.ru)

Тел.: +7 (925) 006-96-80

Подпись Нафталъ Михаила Нафтольевича заверяю.

Директор по персоналу ООО «БАЗИС ПРО»

Казин И.А./

