

## **ОТЗЫВ ОФИЦИАЛЬНОГО ОППОНЕНТА**

на диссертационную работу Шахалова Александра Александровича  
«Автоклавная технология переработки некондиционных медных концентратов с использованием гидротермальной обработки», представленной на соискание учёной степени кандидата технических наук по специальности 05.16.02 – Metallургия черных, цветных и редких металлов

### **Актуальность темы исследования**

Вовлечение в переработку труднообогатимого, тонковкрапленного, низкокачественного, полиметаллического и техногенного сырья неизбежно приводит к необходимости применения комплексных технологий, позволяющих выделить основные ценные компоненты сырья и обеспечивать рентабельность переработки. Снижение качества шихты вызывает проблемы технологического характера; в частности, повышается выход отходов производства, возрастает циклическая нагрузка, снижается извлечение меди и производительность, что, в свою очередь, приводит к повышению операционных затрат и себестоимости продукции.

Актуальность исследования обоснована необходимостью проведения работ, направленных на поиск новых или модернизированных технологических решений, учитывающих минеральный состав сырья, географическое расположение месторождения, удалённость от основных промышленных районов, наличие существующих производственных мощностей, доступность квалифицированной рабочей силы, стоимость кислорода, электроэнергии, реагентов. Кроме традиционных пирометаллургических процессов перспективными представляются гидрометаллургические переделы.

### **Структура и анализ работы**

Диссертация состоит из введения, литературного обзора (первая глава) и четырех глав исследовательской части, выводов, списка литературы из 52 отечественных и зарубежных источников. Материалы диссертации изложены на 140 страницах машинописного текста, в том числе рисунков – 52, таблиц – 49.

*Во введении* обоснована актуальность и определена степень разработанности проблемы исследования, идентифицированы объекты и предметы научного поиска, указана цель и установлены задачи работы, дана оценка научной новизны, подтверждена теоретическая и практическая значимость полученных результатов, сформулированы выносимые на защиту положения.

*В первой главе* проанализированы современные способы гидрометаллургической переработки медьсодержащего сырья. Подробно рассмотрены автоклавные технологии в гидрометаллургии меди, приведены примеры применения автоклавно-гидрометаллургических процессов, в частности, процесса автоклавного окислительного выщелачивания, для переработки медных концентратов. Изложены современные представления о механизме автоклавного окисления основных минералов, а именно, халькопирита, пирита, сфалерита. Основное внимание уделено схемам действующих гидрометаллургических производств, кроме того, рассмотрен ряд гидрометаллургических технологий, не имевших промышленной реализации. Подробно рассмотрены способы выделения меди из растворов выщелачивания, получившим широкую коммерческую реализацию на сегодняшний день.

*Во второй главе* работы представлены результаты исследования химического, гранулометрического и минералогического составов концентратов. В качестве сырья для автоклавно-гидрометаллургической переработки были выбраны полиметаллические концентраты Жезкентского горно-обогатительного комбината (ЖГОК) и Балхашской обогатительной фабрики (БОФ). Представлены основные результаты и закономерности, выявленные при проведении исследований операции среднетемпературного автоклавного окислительного выщелачивания, исходя из наличия трех автоклавов, рассчитанных на температуру 170 °С и избыточное давление 1,6 МПа. Исследования фазового состава концентрата показали, что основными минеральными фазами являются – халькопирит и пирит. Нерудная фаза представлена кварцем, калиевыми полевыми шпатами, силикатами и

алюмосиликатами железа и магния. На основании полученных данных по поглощению кислорода обращает на себя внимание два периода, в которых происходит интенсивное окисление сульфидов, и два периода медленного окисления. Важнейшей особенностью протекания процесса окисления полиминерального сырья Балхашской обогатительной фабрики является возможность проведения процесса с селективным окислением медь- и цинксодержащих минералов при минимальном протекании «паразитного» процесса – окисления пирита.

*Третья глава* посвящена исследованию процесса гидротермальной обработки, представлены основные результаты и закономерности, выявленные при проведении исследования процесса гидротермальной обработки медно-цинкового концентрата при температурах до 170 °С. Большое внимание уделено методам повышения извлечения цинка. На основе результатов исследования кинетики процесса, рассмотрены пути повышения извлечения цинка, определены рабочие параметры процесса. Важным параметром процесса можно считать отношение количества меди в растворе к исходному количеству халькопирита, как основного медь-осаждающего сульфида. Осаждение меди протекает достаточно полно при низких ее удельных расходах. Дальнейшее повышение удельного расхода меди сопровождалось повышением остаточной концентрации меди в растворе и снижением извлечения меди, попутно с этим произошло заметное увеличение извлечения цинка в раствор. Выявлена практически линейная зависимость роста конечной кислотности растворов от повышения начальной концентрации меди в растворе. Повышение кислотности раствора обусловлено протеканием реакций образования дигенита и халькозина.

*В четвертой главе* представлены результаты полупромышленных испытаний технологии, проведенных на автоклавной пилотной установке опытного цеха по обогащению руд, предназначенной для проведения полупромышленных испытаний автоклавной обработки различного минерального сырья (руд и концентратов) в непрерывном режиме при

температуре до 250 °С и общем давлении до 4,5 МПа; оснащена современным оборудованием, позволяющим проводить в укрупнённом масштабе ряд гидрометаллургических операций. Проведенные испытания процесса автоклавного окислительного выщелачивания (АОВ) в непрерывном режиме подтвердили ранее выявленные оптимальные параметры окисления концентратов Балхашской обогатительной фабрики с использованием оборотного раствора автоклавного окислительного выщелачивания

**В пятой главе** представлена принципиальная технологическая схема гидрометаллургического обогащения медных концентратов. Переработка сырья предусматривает автоклавное окислительное выщелачивание (АОВ) меди и цинка из бедного (по содержанию меди) сырья с последующим осаждением меди в процессе гидротермальной обработки (ГТО) богатого сырья. Параметры автоклавных операций автоклавного окислительного выщелачивания и гидротермальной обработки одинаковы: температура 170 °С, общее давление 1,4 МПа, парциальное давление кислорода 0,6 МПа. Цинк выделяется из раствора ГТО в виде смешанного карбонат-гидрата, который очищают методом флотации и преобразуют в оксид-гидрат цинка путём термической обработки при 250 °С. Содержание цинка в данном продукте составляет около 50 %.

Железо и сера, которые переходят в раствор на автоклавных операциях, выводятся из технологии в виде хвостов нейтрализации. Водный баланс является замкнутым, не требуется отдельной переработки сточных вод.

Хвосты обогащения кека автоклавного окислительного выщелачивания направляются на цианирование для извлечения серебра, золота и остатков меди, где их выделяют из раствора путем цементации цинковой пылью. Полученный цементат направляется на дальнейшую переработку в драгметалльный цех.

#### **Научная новизна и теоретическая значимость исследования:**

– установлено, что селективное окисление сфалерита и халькопирита достигается с понижением давления кислорода;

– уменьшение выхода элементной серы достигается за счет процесса обмена с сульфатом меди, который стимулируется пониженным давлением кислорода и повышенной концентрацией меди в растворе АОВ;

– определено влияние кислорода на показатели извлечения цинка из медно-цинкового концентрата в процессе гидротермальной обработки;

– получены кинетические характеристики процесса автоклавного окислительного выщелачивания полиметаллических концентратов;

– определены обратные зависимости ключевых показателей процесса гидротермального обогащения из растворов автоклавного выщелачивания (степени извлечения меди и цинка) от величины параметров процесса ГТО.

### **Практическая значимость работы:**

– вовлечение в переработку низкосортных полиметаллических концентратов по разным направлениям технологической схемы для получения кондиционных селективных концентратов, с дополнительным извлечением других ценных компонентов в селективные продукты, в частности, в цинковый и свинцовый концентраты, золотосеребряный цементат, а также снижения выбросов вредных веществ основного пиromеталлургического производства компании;

– определены кинетические характеристики процесса гидротермальной обработки в режиме частичного окисления в первой секции автоклава, позволяющие адекватно моделировать промышленный процесс;

– разработанная технологическая схема может быть реализована на Балхашской промышленной площадке металлургического производства в качестве экономически целесообразной, позволяющей перерабатывать некондиционные полиметаллические концентраты с селективным извлечением попутных ценных компонентов. Рассчитан положительный экономический эффект от внедрения технологии.

**Достоверность полученных результатов, выводов и рекомендаций** основана на использовании стандартных методик исследования, современного оборудования и специализированного программного обеспечения,

подтверждается сходимостью результатов теоретического и экспериментального моделирования, их соответствие известным данным в области теории и практики гидро- и пирометаллургических процессов.

### **Рекомендации по использованию результатов и выводов диссертации**

Научные результаты исследования можно рекомендовать к использованию в качестве учебно-методических материалов при подготовке бакалавров и магистров по направлению «Металлургия цветных металлов».

Изложенные в диссертации теоретические положения и экспериментально обоснованные технологические разработки необходимо использовать при реконструкции существующих или организации новых производств по комплексной переработке бедного забалансового рудного сырья и некондиционных техногенных материалов и продуктов.

### **Замечания и вопросы по диссертационной работе Шахалова А.А.**

1. Какие технологии переработки труднообогатимого, тонковкрапленного, низкокачественного, полиметаллического сырья по своим производственным и экономическим показателям могут быть сопоставимы с автоклавными процессами?

2. Чем обусловлен выбор именно *среднетемпературного* автоклавного окислительного выщелачивания медьсодержащих концентратов, помимо наличия на промплощадке соответствующего оборудования?

3. За счет чего снижение парциального давления кислорода позволяет уменьшить количество образующейся элементной серы и повысить степень вскрытия халькопирита (рис. 3 автореферата)?

4. Учитывая существенное влияние температуры на скорость автоклавного окисления, когда при повышении последней на 10 °С расход кислорода увеличивается на 30–35 %, имело смысл расширить диапазон исследованных температур и за пределы 170 °С для обоснования оптимальных значений режима нагревания (рис. 4 автореферата).

5. Какое число повторяющихся циклов ( $n$ ) использования оборотного кислого раствора (ОКР) является оптимальным для повышения скорости окисления материала (рис. 6 автореферата)?

6. Принимая во внимание особенности процесса гидротермального осаждения (ГТО), для повышения селективности осаждения меди и отделения ее от цинка возможно ли рекомендовать контролировать процесс ГТО до некоторой остаточной концентрации меди в растворе (рис. 9 автореферата)?

7. Чем обосновано измельчение вскрываемых материалов до 85–88 % класса минус 45 мкм?

8. Каковы перспективы возможной модернизации предложенной технологической схемы гидрометаллургического обогащения медных концентратов с целью улучшения её технико-экономических показателей?

### **Заключение**

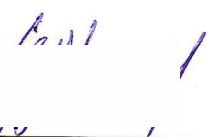
Несмотря на ряд замечаний, имеющих частный, зачастую дискуссионный, характер и не снижающих общую положительную оценку, представленная на рассмотрение диссертация может быть классифицирована как выполненная на высоком научном уровне и обладающая достаточной практической ценностью законченная научно-квалификационная работа. Диссертация соответствует специальности 05.16.02 – Metallургия черных, цветных и редких металлов и отрасли технические науки, по которым она представлена к защите.

Работа оформлена в соответствии с требованиями ГОСТ Р 7.0.11–2011 «Диссертация и автореферат диссертации. Структура и правила оформления», изложена хорошим литературным языком, отличается логичностью заключений, целостностью замысла и завершённостью его реализации. Сделанные выводы и рекомендации достоверны и сомнений не вызывают. Полное представление о содержании работы дают автореферат и девять опубликованных работ: три статьи в изданиях из перечня ВАК и Аттестационного совета УрФУ; шесть статей в сборниках.

Исходя из проведённой оценки актуальности избранной проблемы, степени обоснованности научных положений, выводов и рекомендаций,

сформулированных в диссертации, их достоверности и новизны, научной и практической ценности изложенных материалов следует заключить, что представленная работа отвечает требованиям к диссертациям на соискание учёной степени кандидата наук, определённым п. 9 Положения о присуждении учёных степеней в ФГАОУ ВО «Уральский федеральный университет имени первого Президента России Б.Н. Ельцина», утверждённый приказом ректора от 21 октября 2019 года № 879/03, а её автор, Шахалов Александр Александрович, заслуживает присуждения учёной степени кандидата технических наук по специальности 05.16.02 – Metallургия черных, цветных и редких металлов.

**Официальный оппонент:** доктор технических наук, старший научный сотрудник, главный специалист Исследовательского центра АО «Уралэлектромедь»

 Мальцев  
Геннадий  
Иванович

624091, Россия, Свердловская обл., г. Верхняя Пышма, Успенский проспект, дом 1, АО «Уралэлектромедь»  
Телефон: (34368) 4-26-26; Факс: (34368) 4-60-96; E-mail: [mgi@elem.ru](mailto:mgi@elem.ru)

« 18 » \_\_\_\_\_ 20 21 г.

Подпись Г.И. Мальцева заверяю:

Начальник отдела кадров  
АО «Уралэлектромедь»



 Артыухин А.В.

Я, Мальцев Геннадий Иванович, согласен на автоматизированную обработку персональных данных, приведённых в этом документе,

