

## ОТЗЫВ ОФИЦИАЛЬНОГО ОППОНЕНТА

Тимофеева Константина Леонидовича, доктора технических наук на диссертационную работу Головкина Дмитрия Игоревича по теме: «Гидрометаллургическая переработка золотосодержащих концентратов двойной упорности», представленную на соискание учёной степени кандидата технических наук по специальности 2.6.2. Metallургия черных, цветных и редких металлов

### Актуальность работы

В последние годы научно-исследовательские организации, инжиниринговые и производственные компании все большее внимание уделяют проблеме извлечения драгоценных металлов из полиметаллических, труднообогатимых руд, в том числе из руд двойной упорности. Прежде всего это связано с истощением запасов традиционных легко перерабатываемых руд, а также с открытием новых золоторудных месторождений, состоящих в основном из мультикомпонентного сырья. Растущий спрос на золото как на стратегический ресурс, используемый в ювелирной промышленности, электронике и т.д., обуславливает необходимость разработки более эффективных и экологически безопасных способов и технологий его извлечения.

Упорными рудами и концентратами считаются те, которые плохо поддаются переработке традиционными методами цианистого выщелачивания вследствие низкого извлечения золота. Следовательно, необходима предварительная обработка такого типа сырья. Предварительная обработка, как правило, заключается во вскрытии сульфидной матрицы минерала с целью высвобождения золота, ассоциированного с минералами-носителями. В мировой золотоизвлекательной промышленности наиболее распространенными технологиями, применяемыми для вскрытия сульфидных концентратов, являются окислительный обжиг, бактериальное окисление и автоклавное выщелачивание. В меньшем масштабе применяют процессы сверхтонкого измельчения. Однако достаточно высокое содержание мышьяка

в исследуемом концентрате, а также сорбционно-активного углисто-го вещества ограничивают применение этих технологий.

В диссертации Головкина Д. И. предложен способ, предусматривающий азотнокислотное выщелачивание золотосульфидного концентрата в присутствии ПАВ (лигносульфоната), эффективность которого, как показано в работе, заключается в повышении степени извлечения золота при последующем цианировании, которая достигает 90 %.

В связи с этим считаю, что выбранное диссертантом направление исследования является **актуальным** как с научной, так и с практической точек зрения.

### **Структура и оценка работы**

Диссертация Головкина Д. И. изложена на 165 страницах, включает 45 рисунков и 34 таблиц. Состоит из введения, 5 глав, заключения, списка литературы из 129 наименований и 2 приложений.

**Во введении** обоснована актуальность и приведена цель диссертационной работы, указана научная новизна, представлены практическая и теоретическая значимость результатов исследований, сформулированы выносимые на защиту положения.

**В первой главе** дана оценка современного состояния золотодобывающего комплекса с указанием основных золотодобывающих регионов России. Представлена характеристика руд и концентратов двойной упорности, описана классификация золота по крупности, рассмотрены основные формы органического углерода в соответствии со степенью графитизации.

Изложены наиболее распространенные технологии переработки упорного золотосодержащего сырья, выделены основные достоинства и недостатки. Также приведены способы с применением ПАВ и реагентов-депрессоров. Автором сделан вывод, что подбор ПАВ и реагента-депрессора, а также их расход осуществляется экспериментальным путем, и зависит от

структуры углистого вещества и его ассоциации с минералами. Показана перспективность азотнокислотных технологий.

**Во второй главе** подробно показан состав упорного золотосульфидного флотационного концентрата месторождения Маломыр. По результатам сканирующей электронной микроскопии (SEM-EDS) установлено, что золото находится в тонко вкрапленном состоянии и ассоциировано с сульфидными минералами. Проведенными тестовыми экспериментами по цианированию исходного концентрата и ИК-спектроскопией подтверждена сорбционная активность органического углистого вещества по отношению к растворенному золоту. Определены оптимальные параметры азотнокислотного выщелачивания изучаемого сырья с целью высвобождения золота из сульфидной матрицы минералов. Максимальная степень извлечения золота цианированием (CIL) составила 76,2 % при практически полном разрушении кристаллической решетки пирита и арсенопирита. Автор делает вывод, что недостаточное извлечение золота является следствием сорбции его на углистом веществе.

В заключительной части главы приведены результаты исследования кинетических закономерностей азотнокислотного растворения пирита и арсенопирита. Для определения режима реакций и расчёта кинетических характеристик применяли модель сжимающегося ядра (МСЯ). На основании модели МСЯ диссертантом подобраны кинетические уравнения, рассчитаны кажущиеся энергии активации и эмпирические порядки по концентрации азотной кислоты. Выведены обобщенные кинетические уравнения для азотнокислотного растворения пирита и арсенопирита. По результатам кинетических и аналитических исследований установлено, что лимитирующей стадией процесса азотнокислотного растворения пирита и арсенопирита является диффузия реагентов через слой образуемых твердых продуктов реакций, преимущественно элементарной серы.

**Третья глава** посвящена лабораторным исследованиям азотнокислотного выщелачивания флотационного концентрата

месторождения Маломир в присутствии ПАВ. Рассмотрены ожидаемые поверхностные эффекты ПАВ в процессе атмосферного азотнокислотного выщелачивания, способствующие повышению извлечения целевых компонентов, включая золото. Обоснован выбор ПАВ и дана характеристика техническому лигносульфонату (ЛС).

Рассмотрено поведение ЛС в средах, моделирующих процессы азотнокислотного выщелачивания. Показано, что ЛС снижает поверхностное натяжение на границе ж-г в широком диапазоне его концентраций от 0,1 до 50 г/дм<sup>3</sup>. Повышение температуры от 20 до 70 °С, введение в раствор азотной кислоты ЛС усиливает их гидрофобные и, как следствие, поверхностные свойства, что подтверждается большей депрессией поверхностного натяжения. Установлено, что ЛС адсорбируется на поверхности концентрата и способствует процессам диспергирования.

Эффективность использования ЛС на стадии процесса атмосферного азотнокислотного выщелачивания упорного золотосульфидного концентрата месторождения Маломир подтверждена циклом лабораторных исследований и позволяет при сопоставимых условиях увеличить степень извлечения золота на 22 % (с 68 до 90 %).

**В четвертой главе** представлены результаты исследований кинетических закономерностей азотнокислотного выщелачивания пирита и арсенопирита с добавлением ЛС. Установлено, что при повышении концентрации ЛС (более 0,25 г/дм<sup>3</sup>) снижается степень растворения минералов. Определен характер зависимости скорости реакции растворения FeS<sub>2</sub> и FeAsS от концентрации HNO<sub>3</sub> и температуры. На основании модели МСЯ рассчитаны кажущиеся энергии активации и эмпирические порядки по концентрации азотной кислоты, выведены обобщенные кинетические уравнения для азотнокислотного растворения пирита и арсенопирита в присутствии ЛС, сделан вывод об изменении механизма процесса на основании снижения энергии активации процесса.

**В пятой главе** приведены результаты укрупненно-лабораторных испытаний по переработке флотоконцентрата месторождения Маломыр, предложена принципиальная технологическая схема. Проработан вариант аппаратного оформления технологической схемы и принципиальной схемы цепи аппаратов. Выполнены расчеты постадийного материального баланса и технико-экономических показателей при переработке 100 тыс. т концентрата месторождения Маломыр в год.

### **Научная новизна диссертационной работы**

Автором диссертации показана возможность эффективного использования ПАВ (лигносульфоната натрия – ЛС) на стадии атмосферного азотнокислотного выщелачивания упорного золотосульфидного концентрата, позволяющего значительно интенсифицировать процесс вскрытия сульфидных золотоносных минералов с последующим извлечением золота на приемлемом уровне. Установлены кинетические закономерности растворения пирита и арсенопирита в азотнокислых средах с добавлением ЛС. Показано, что добавка ЛС позволяет изменить механизм процесса, что проявляется в снижении энергии активации и увеличении эмпирических порядков по концентрации азотной кислоты.

### **Теоретическая и практическая значимость**

Автором установлены оптимальные параметры азотнокислотного выщелачивания концентрата месторождения Маломыр, обеспечивающие максимальное вскрытие сульфидной матрицы минералов с целью высвобождения золота. Показано положительное влияние добавки лигносульфоната на стадии азотнокислотного выщелачивания с последующим извлечением золота на уровне 90 %. В результате предложена принципиальная технологическая схема переработки упорного золотосульфидного концентрата месторождения Маломыр, включающая в себя вскрытие сульфидных золотоносных минералов азотной кислотой с добавлением лигносульфоната, что обеспечивает высокое извлечение золота традиционными методами.

## **Достоверность результатов**

Достоверность полученных соискателем научных результатов подтверждена применением современных сертифицированных методик исследования и аттестованных методов анализа. Степень обоснования выводов не вызывает сомнения, т.к. подтверждена публикациями в научных журналах и апробирована на конференциях различного уровня. По теме диссертации опубликовано 13 работ, из них 4 статьи в рецензируемых научных журналах, определенных ВАК РФ и Аттестационным советом УрФУ, входящих в международные базы цитирования Scopus и Web of Science (WoS); 1 патент Российской Федерации на изобретение.

**Несмотря на общую положительную характеристику диссертационной работы, при ее рассмотрении возникли вопросы и замечания:**

1. Заключение о влиянии хлоридов на наблюдавшийся при азотнокислом выщелачивании переход золота в раствор ничем не подтверждено – не выполнен как анализ исходного сырья, так и растворов сернокислотной отмывки;

2. Кроме того, если подобное имеет место, тогда предложенный в технологической схеме (рис. 14 автореферата) возврат промывных вод будет способствовать накоплению хлорид-ионов и последующему переходу золота в раствор азотнокислого выщелачивания, что приведет к его потерям;

3. Исследования по определению влияния параметров на адсорбцию лигносульфоната на концентрате выполнены в растворах с содержанием азотной кислоты до 5 г/дм<sup>3</sup>. При это показано практически полное отсутствие адсорбции в кислой области – при pH=1 (рис. 3.7 диссертации). В реальных же растворах концентрация азотной кислоты 5 моль/дм<sup>3</sup>, что должно полностью исключать адсорбцию лигносульфоната на поверхности концентрата и, как следствие, его положительное влияние на извлечение золота в соответствии с полученными автором закономерностями;

4. Для всех кинетических зависимостей азотнокислого выщелачивания концентрата расчет энергии активации выполнен по трем точкам, что снижает достоверность полученных результатов;

5. Какая степень регенерации азотной кислоты предусматривается автором в работе?

6. Чем объясняется проведение процесса цианирования кека азотнокислого выщелачивания в двух реакторах периодического действия, а не по зарекомендовавшей себя схеме противоточного пачукового выщелачивания, в т.ч. применяемого на перерабатывающем маломырские концентраты Покровском автоклавном комплексе?

7. В разработанной технологии товарным продуктом является раствор золота, тогда как расчет выручки выполнен по реализации аффинированного металла;

8. Где автор предполагает реализовать представленную технологию и каким образом предлагается вести переработку получаемых промпродуктов до товарного металла?

## **ЗАКЛЮЧЕНИЕ**

В целом перечисленные выше замечания и вопросы не снижают научной и практической ценности проведенных исследований и не влияют на общую положительную оценку работы.

Диссертация Головкина Дмитрия Игоревича «Гидрометаллургическая переработка золотосодержащих концентратов двойной упорности» является завершенной научно-квалифицированной работой, выполнена на высоком научном уровне, обладает практической ценностью, соответствует Паспорту научной специальности 2.6.2. Metallургия черных, цветных и редких металлов.

Результаты работы имеют существенное значение как с научной точки зрения, так и для практической реализации на различных золотодобывающих

предприятий и могут повлиять на дополнительно вовлечение в переработку сырья двойной упорности.

Автореферат диссертации полностью соответствует тексту диссертационной работы отражает её основное содержание, имеет логически грамотное построение и последовательность изложения результатов исследования.

Считаю, что диссертационная работа Головкина Дмитрия Игоревича соответствует требованиям п. 9-14 Положения о присуждении ученых степеней в ФГАОУ ВО «Уральский федеральный университет имени первого Президента России Б.Н. Ельцина», предъявляемым к кандидатским диссертациям, а её автор Головкин Дмитрий Игоревич – заслуживает присуждения ему ученой степени кандидата технических наук по специальности 2.6.2. Metallургия черных, цветных и редких металлов.

Официальный оппонент:

Начальник технического отдела инженерно-производственного управления АО «Уралэлектромедь», доктор технических наук



Тимофеев  
Константин  
Леонидович

28.10.2024

Акционерное общество «Уралэлектромедь»  
624091, г. Верхняя Пышма, Успенский проспект, д. 1  
E-mail: k.timofeev@uralcopper.com  
Тел.: 8 (34368) 4-71-87

Подпись Тимофеева К.Л. заверяю:

Начальник отдела кадров АО «Уралэлектромедь» Кулимина Н.Л.

