

## ОТЗЫВ ОФИЦИАЛЬНОГО ОППОНЕНТА

Федорова Сергея Андреевича, кандидата технических наук на диссертацию Головкина Дмитрия Игоревича «Гидрометаллургическая переработка золотосодержащих концентратов двойной упорности», представленную на соискание ученой степени кандидата технических наук по специальности 2.6.2. Metallургия черных, цветных и редких металлов

На территории Российской Федерации доля запасов золотосодержащего упорного минерального сырья весьма значительна. Упорное сырье характеризуется наличием тонкодисперсного золота, химической депрессией золота на стадии металлургической переработки, присутствием цианисидов и углистого органического вещества. Минеральные материалы, относящиеся к категории дважды упорных, могут сочетать в себе несколько из перечисленных критериев упорности. Степень извлечения Au из такого сырья традиционными методами довольно низкая. Из-за постоянного увеличения стоимости золота на мировом рынке и сокращения легкообогатимых первичных руд и россыпей, в настоящее время активно развиваются исследования по разработке комплексных ресурсоэнергоэффективных способов извлечения Au из данных упорных минеральных материалов. В связи с этим диссертационная работа Головкина Д.И., посвященная разработке гидрометаллургическому способу переработки золотосодержащих концентратов двойной упорности, являющийся энергоресурсосберегающим и обеспечивающий высокое извлечение золота, **является актуальной.**

Диссертационная работа изложена на 165 страницах, состоит из введения, 5 глав, заключения, 44 рисунков, 26 таблиц, списка литературы из 129 источников, 2 приложений. Имеются ссылки как на работы отечественных, так и зарубежных ученых.

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

**В первой главе** представлен анализ имеющихся литературных данных по переработке золотосодержащего сырья двойной упорности. Детально рассмотрены основные центры золотодобычи, лидирующие золотодобывающие компании России. Дана характеристика объектов исследований, описаны виды, классификация и минералогия упорных золотосодержащих руд. Приведен обзор существующих и наиболее распространенных пиро- и гидрометаллургических способов переработки упорного золотосодержащего сырья, показаны их основные достоинства и недостатки. На основе данного обзора сформулированы задачи исследования.

**Во второй главе** обсуждаются физико-химические закономерности азотнокислотного выщелачивания упорного золотосульфидного флотационного концентрата месторождения Маломыр. При исследовании вещественного состава концентрата выявлено два критерия упорности сырья: первый связан с наличием тонко вкрапленного субмикронного золота, заключенного в минералах-носителях (в арсенопирите); второй – с присутствием в концентрате органического углерода. Проведена серия поисковых экспериментов по азотнокислотному выщелачиванию флотоконцентрата. На основании этих экспериментов установлены оптимальные параметры выщелачивания, позволяющие максимально извлечь в раствор железо, мышьяк и серу, тем самым высвободив из сульфидов тонкодисперсное золото. Для исключения потерь золота в процессе азотнокислотного выщелачивания концентрата (оно переходит в хлоридный комплекс в связи с присутствием в материале хлоридов) проводилось предварительная отмывка исходного концентрата раствором серной кислоты. Проведена серия экспериментов по цианированию кеков азотнокислотного выщелачивания в режимах CIL и без сорбента при одинаковых условиях процесса. Показано, что максимальное извлечение золота в раствор достигается при практически полном вскрытии сульфидной матрицы с последующим цианированием в режиме CIL. В заключительной части главы приведены кинетические исследования азотнокислотного растворения пирита

и арсенопирита, которые указывают на то, что лимитирующей стадией процесса растворения является диффузия реагентов через слой образуемых твердых продуктов реакций (преимущественно элементарной серы).

**В третьей главе** рассмотрены поверхностные эффекты ПАВ в процессе атмосферного азотнокислотного выщелачивания, способствующие повышению степени извлечения ценных компонентов, обоснован выбор ПАВ и дана характеристика техническому лигносульфонату. По результатам компьютерного моделирования и лабораторных экспериментов сделаны вывод о том, что введение лигносульфоната на стадии азотнокислотного выщелачивания способствует значительному повышению извлечение золота в раствор на стадии цианирования. Однако в режиме СІІ (при добавлении угольного сорбента) извлечение золота снижается.

**В четвертой главе** изучена кинетика азотнокислотного выщелачивания золотосодержащих сульфидных минералов с добавлением лигносульфоната. Рассчитаны значения кажущейся энергии активации по модели сжимающегося ядра. Для описания кинетики растворения сульфидов (пирита и арсенопирита) в исследуемых условиях выведены полуэмпирические уравнения, отражающие влияние изменяемых параметров (концентрации ПАВ, азотной кислоты, температуры) на лимитирующую стадию процесса выщелачивания. С использованием метода кинетической функции показано, что в ходе азотнокислотного растворения сульфидных минералов режим процесса остаётся неизменным. Обоснованы закономерности функционального действия лигносульфоната по адсорбционно-расклинивающему и эмульгирующему механизмам в процессе азотнокислотного выщелачивания упорного золотосульфидного концентрата. Проведенные расчеты кинетики процесса, а также аналитические исследования позволяют утверждать о снижении диффузионных затруднений.

**В пятой главе** приведены результаты укрупненно-лабораторных испытаний и предложена принципиальная технологическая схема переработки упорного золотосульфидного флотоконцентрата месторождения

Маломыр. (рисунок 14). Представлена технико-экономическая оценка предлагаемой технологической схемы.

**Научная новизна работы.** Предложен новый подход к атмосферному азотнокислотному вскрытию упорного золотосульфидного концентрата, основанный на использовании анионоактивного полимерного поверхностно-активного вещества (лигносульфоната); впервые установлены кинетические закономерности процесса азотнокислотного выщелачивания пирита и арсенопирита в присутствии лигносульфоната; обоснованы закономерности функционального действия лигносульфоната по адсорбционно-расклинивающему и эмульгирующему механизмам в процессе азотнокислотного выщелачивания упорного золотосульфидного концентрата.

**Практическая значимость работы.** Определены оптимальные параметры азотнокислотного выщелачивания сульфидов из концентрата месторождения Маломыр (концентрация азотной кислоты 5 моль/дм<sup>3</sup>, соотношение жидкого к твердому 6:1; продолжительность выщелачивания 60 мин); показано положительное влияние добавки лигносульфоната (СЛС – 0,5 г/дм<sup>3</sup>) в процессе азотнокислотного выщелачивания на последующее извлечение золота цианированием (степень извлечения золота возросла с 68 % до 90 %); предложена принципиальная технологическая схема переработки упорного золотосульфидного концентрата месторождения Маломыр.

**Достоверность результатов,** представленных в диссертационной работе, обусловлена достаточным объемом экспериментальных данных, использованием современных сертифицированных методик исследования, методов анализа и специализированного программного обеспечения.

**Апробация работы.** 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.

**При ознакомлении с материалами диссертационной работы возникли следующие вопросы и замечания:**

1. В чем заключается теоретическая значимость диссертационной работы?
2. Проводилось ли изучение распределения частиц золота по размерам?
3. Какая потеря массы была у концентрата после его кислотной отмывки? В раствор уходили только карбонаты и хлориды?
4. После кислотной отмывки содержания железа, мышьяка и серы в концентрате выросли, а степень извлечения их в раствор при азотнокислом выщелачивании несущественно снизились. С чем это может быть связано?
5. В подглаве 2.3 проведено компьютерное моделирование по влиянию различных параметров при азотнокислом выщелачивании сульфидов или на основании лабораторных экспериментов проведен статистический анализ?

## **ЗАКЛЮЧЕНИЕ**

Перечисленные выше замечания и вопросы не снижают научной и практической ценности проведённых исследований и не влияют на общую положительную оценку работы.

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

В диссертационной работе изложены новые научно обоснованные технологические решения для эффективной переработки золотосодержащих флотационных концентратов двойной упорности с месторождения Маломыр.

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

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:

Старший научный сотрудник  
лаборатории пирометаллургии цветных  
металлов ФГБУН ИМЕТ УрО РАН,  
кандидат технических наук

Федоров  
Сергей  
Андреевич

«30» 10 2024 г.

Почтовый адрес: 620016, г. Екатеринбург, ул. Амундсена, д. 101, Федеральное государственное бюджетное учреждение науки Институт металлургии Уральского отделения Российской академии наук

телефон: +7 (999) 561-52-29

адрес электронной почты: saf13d@mail.ru

Подпись старшего научного сотрудника ИМЕТ УрО РАН, к.т.н.  
Федорова С.А. подтверждаю:

Ученый секретарь ИМЕТ УрО РАН, к.х.н.



Котенков П.В.