

ОТЗЫВ ОФИЦИАЛЬНОГО ОППОНЕНТА

на диссертационную работу Рогожникова Дениса Александровича
«Азотнокислотная переработка полиметаллического упорного сульфидного
сырья цветных металлов», представленную на соискание ученой степени
доктора технических наук по специальности 05.16.02 – Metallургия черных,
цветных и редких металлов

Известно, что цветная металлургия является весьма капиталоемкой и ресурсоемкой отраслью экономики. На протяжении многих лет высокая рентабельность предприятий цветной металлургии обеспечивалась за счет переработки богатых первичных концентратов. В зависимости от подотрасли, содержание основного ценного компонента в концентрате могло составлять 20 % и более. Этому способствовало бурное развитие эффективных приемов обогащения.

В последние десятилетия наблюдается постепенное ухудшение качества рудного сырья. Указанное связано как со снижением содержания ценных компонентов в исходном сырье, так и с присутствием в рудах трудновскрываемых минералов, что делает их упорными. Переработка бедных концентратов в условиях глобального рынка создает угрозу снижения рентабельности предприятий цветной металлургии, поскольку цены на конечную продукцию – металлы и изделия из них – слабо связаны с реальной себестоимостью их производства и зависят скорее от рыночной конъюнктуры.

Данную проблему предприятия цветной металлургии пытаются решить за счет привлечения в производственный процесс забалансового, вторичного и нетипичного первичного сырья. Отсутствие универсальных технологий заставляет специалистов заводов проводить модернизацию действующего производства, поскольку существующие мощности не всегда являются достаточно гибкими и адаптивными. Зачастую скорость этих процессов остается недостаточной из-за высокой загруженности и инертности существующих производств. Иногда это приводит к остановке техпроцесса и

закрытию предприятия. Поэтому в ряде случаев оправданно осуществлять полное техперевооружение с внедрением современных технологий.

При производстве благородных металлов из первичного сырья, в том числе бедного и упорного, применяют широкий спектр технологий. Среди пиromеталлургических способов наиболее распространены обжиг и плавка. Гидрометаллургические способы, более предпочтительные с экологической точки зрения, представлены автоклавным и биовыщелачиванием.

В последние годы появилось большое количество публикаций, свидетельствующих о перспективности азотнокислотного вскрытия подобного сырья. К основным преимуществам данного способа стоит отнести: универсальность, интенсивность и возможность регенерации окислителя. С учетом запланированной в Республике Казахстан опытно-промышленной реализации азотнокислотного способа вскрытия сульфидного золотосодержащего сырья, **актуальность** темы диссертационной работы Рогожникова Д. А. сомнений не вызывает.

Диссертационная работа представлена на 311 страницах машинописного текста, состоит из введения, 7 глав, заключения, списка литературных источников из 281 наименования и 3 приложений.

Во **введении** автором обоснована актуальность работы, приведены: степень разработанности темы исследования; цель работы; объекты и задачи исследования; научная новизна; теоретическая и практическая значимость работы; методология и методы исследования; положения, выносимые на защиту; сведения об апробации работы, личном вкладе автора, публикациях, структуре и объеме диссертации.

В **первой главе** рассмотрены вопросы современного состояния медного и золотодобывающего комплексов России. Приведена достаточно подробная характеристика исследуемого сырья. Проведен всесторонний анализ известных технологий переработки трудновскрываемого сульфидного сырья: рассмотрены основные пиromеталлургические технологии, методы бактериального окисления, автоклавные процессы, современные способы

дезинтеграции (процессы Albion, Activox, Leachox), а также альтернативные технологии (хлорирование, щелочное выщелачивание и пр.). Особое внимание уделено рассмотрению азотнокислотных процессов. Сделан вывод об актуальности и перспективности их дальнейшего, более глубокого и всестороннего изучения.

Во второй главе приведены термодинамические закономерности окисления изучаемых сульфидных соединений азотной кислотой. Установлены преобладающие реакции окисления основных сульфидных минералов. Разработаны термодинамические модели физико-химических превращений в изучаемых системах. Вызывают интерес данные, касающиеся очередности разложения сульфидных минералов в азотнокислых средах при их совместном выщелачивании в составе реального сырья.

Третья глава посвящена изучению процессов азотнокислотного выщелачивания полиметаллического сульфидного сырья. Для семи реальных концентратов приведены: химический и фазовый составы; минералогический состав, морфология и данные о распределении благородных металлов; результаты лабораторных исследований по переработке концентратов с определением параметров, обеспечивающих максимизацию извлечения из сырья выщелачиваемых компонентов; результаты укрупненных лабораторных исследований, проведенных с целью уточнения установленных параметров. Полученные данные позволили достичь высоких показателей по извлечению ценных компонентов – более 92 %. Показано, что азотнокислотное выщелачивание является эффективным процессом для вскрытия золотовмещающей матрицы сульфидных минералов.

В четвертой главе изучена кинетика и механизмы азотнокислотного растворения упорного сульфидного сырья цветных металлов. Определено влияние температуры и концентрации азотной кислоты на скорость вскрытия сульфидов. Приведена характеристика твердых остатков выщелачивания. Для описания кинетики растворения сульфидных минералов в составе реальных концентратов применена модель сжимающегося ядра и её вариации. Для

лучшего понимания изучаемых процессов автором применен оригинальный подход – проведены кинетические исследования азотнокислотного выщелачивания тонкодисперсных и компактных образцов природных минералов (пирита и арсенопирита), в том числе в присутствии ионов Fe (III).

Пятая глава посвящена проблемам улавливания нитрозных газов и регенерации азотной кислоты. Данный вопрос является одним из важнейших в работе, от его успешного решения зависит экономическая эффективность предлагаемого азотнокислотного способа. Приведены варианты утилизации отходящих нитрозных газов. Проведены исследования по абсорбции нитрозных газов водными растворами, в ходе которых достигнута высокая степень улавливания – более 90 %.

В шестой главе представлены результаты исследований по переработке растворов и кеков азотнокислотного выщелачивания. Вопросы утилизации растворов важны с точки зрения иммобилизации и безопасного захоронения мышьяксодержащих промпродуктов, а также извлечения ценных компонентов (меди, цинка и пр.). Для извлечения благородных металлов из кеков предложены как стандартные приемы (цианирование), так и альтернативные гидрометаллургические способы. Интерес вызывает метод сульфидного выщелачивания, использование которого позволяет нивелировать негативное пассивирующее воздействие соединений сурьмы и элементной серы, образующихся в ходе азотнокислотного выщелачивания исходных концентратов.

В резюмирующей **седьмой главе** предложена принципиальная технология переработки сульфидных золотосодержащих концентратов. Приведены результаты балансовых испытаний, описание рекомендуемого оборудования, а также технико-экономическое сравнение предлагаемой азотнокислотной технологии с классической – автоклавным выщелачиванием.

В приложениях приведены: акт о проведении испытаний; акт внедрения; результаты технологических и экономических расчетов; заключение об экономической эффективности.

Данные, представленные в диссертационной работе, являются **достоверными**, поскольку результаты лабораторных и балансовых испытаний коррелируют между собой. Полученные данные опубликованы в высокорейтинговых научных изданиях и монографии, а их **новизна** подтверждена патентом на изобретение.

Предмет научной новизны диссертационной работы заключается в создании термодинамических моделей физико-химических превращений в изучаемых гетерогенных системах; установлению факторов, в наибольшей степени влияющих на кинетику процесса растворения сульфидных минералов; установлению кинетических закономерностей и обоснованию механизмов растворения отдельных природных минералов, в том числе в присутствии ионов Fe (III); оценке каталитического действия пирита при азотнокислотном растворении искусственных и природных смесей пирита и арсенопирита; получению кинетических уравнений, которые достаточно точно описывают процессы растворения сульфидных минералов в азотнокислых растворах; получению математической модели процесса абсорбции нитрозных газов; обоснованию механизма обменной реакции между трисульфидом мышьяка и катионами меди (II); определению возможности глубокого осаждения мышьяка из азотнокислотных растворов в виде крупнокристаллического скородита.

Практическое значение диссертации заключается в разработке и апробировании комплексной азотнокислотной технологии переработки полиметаллического упорного сырья цветных металлов. Предложенная технология обеспечивает высокие показатели вскрытия сульфидных минералов и извлечения ценных компонентов в соответствующие промпродукты. Полученные в диссертационной работе результаты использованы при проектировании одного из предприятий в Республике Казахстан.

Материалы диссертации **соответствуют специальности 05.16.02 –** **Металлургия черных, цветных и редких металлов.**

Автореферат и публикации достаточно **полно** отражают содержание диссертации.

По работе имеются следующие **вопросы и замечания**:

1. Независимость от времени процесса обусловлена начальным интервалом отбора проб. Отношение Ж:Т и концентрация начальной азотной кислоты являются взаимозависимыми параметрами.

2. Как удавалось поддерживать температуру в зоне реакции при бурном протекании процесса взаимодействия сульфидов и азотной кислоты?

3. Почему на рисунке 4.18 отсутствует элементарная сера?

4. На чем основано утверждение о невозможности окисления закиси азота и безвозвратных потерях?

5. Осаждение мышьяка в узких интервалах рН – 0,2-0,3 практически неосуществимо в промышленных условиях.

6. Изучалась ли растворимость скородита и других нерастворимых мышьяксодержащих соединений. Растворимость этих соединений зависит от соответствия стехиометрическому составу, который в свою очередь зависит от условий осаждения.

7. На фоне достаточно грамотного изложения материала встречаются опечатки, некорректные названия элементов («элементарная» сера). Несоответствие ссылки на литературный источник материалам текста.

Однако высказанные замечания не носят принципиального характера, не ставят под сомнение достоверность и обоснованность основных положений и выводов, защищаемых в диссертации.

Результаты представленной диссертации имеют важное значение с научной и практической точек зрения и могут быть использованы на предприятиях цветной металлургии.

Считаю, что по своей актуальности, содержанию, глубине проработки, научной новизне и практической значимости полученных результатов диссертационная работа Рогожникова Д. А. **соответствует** требованиям п. 9 Положения о присуждении ученых степеней в ФГАОУ ВО «Уральский

федеральный университет имени первого Президента России Б.Н. Ельцина», предъявляемым к докторским диссертациям, а ее автор, Рогожников Денис Александрович, **заслуживает** присуждения ему ученой степени доктора технических наук по специальности 05.16.02 – Metallургия черных, цветных и редких металлов.

Заведующий кафедрой металлургии
НЧОУ ВО «Технический университет
УГМК», доктор технических наук,
старший научный сотрудник

Лебедь
Андрей
Борисович

«15» января 2021 г.

Почтовый адрес: 624091, Верхняя Пышма, Успенский проспект, д. 3,
Негосударственное частное образовательное учреждение высшего
образования «Технический университет УГМК»,
телефон: +7(34368) 78-310
адрес электронной почты: a.lebed@tu-ugmk.com

Подпись Лебеда А.Б. заверяю.

Директор НЧОУ ВО
«Технический университет УГМК»

В.А. Лапин