

## УТВЕРЖДАЮ

Первый проректор  
федерального государственного бюджетного  
образовательного учреждения высшего  
образования «Санкт-Петербургский горный  
университет императрицы Екатерины II»,  
д.э.н., профессор



Н.В.Пашкевич

мая 2024 г.

## ОТЗЫВ

ведущей организации – федерального государственного бюджетного  
образовательного учреждения высшего образования «Санкт-Петербургский  
горный университет императрицы Екатерины II» на диссертацию

Васильковой Анастасии Олеговны

**«Разработка рациональной технологии извлечения золота из техногенного  
сырья на основе применения ультранизких концентраций цианида  
натрия»,**

представленную на соискание ученой степени кандидата технических наук по  
специальности 2.6.2. Metallургия черных, цветных и редких  
металлов

### 1. Актуальность темы диссертации

В настоящее время в России большое внимание уделяется вопросам рационального использования недр и сохранения природно-ресурсного потенциала. Истощение запасов первичных руд ведет к необходимости вовлечения в переработку техногенного сырья – отходов производства, образующихся в результате функционирования горнодобывающих предприятий. Техногенное сырье является перспективным для вовлечения в разработку ввиду высокого содержания черных, цветных, редких и благородных металлов и исключения затрат на его добычу, доля которой в себестоимости получения металлов обычно весьма значительна.

Согласно данным по запасам и содержанию в них цветных и благородных металлов перспективными техногенными объектами, представляющими собой комплексное сырье для извлечения ценных компонентов, являются огарки сернокислотного производства (более 25 млн. т), получаемые на предприятиях химической промышленности, а также хвосты обогащения полиметаллических

руд (более 150 млн. т), с содержанием Au – 0,7–3,0 г/т, Ag – 5,0–25,0 г/т, Fe – 20–50 %, Cu – 0,15–0,5 %, Zn – 0,3–0,8 %.

За последние десятилетия выполнен значительный объем исследований по извлечению ценных компонентов из указанного сырья с применением обогатительных, гидро-пирометаллургических процессов, а также комбинированных схем. Из числа испытанных вариантов в настоящее время наиболее рациональным и промышленно освоенным является цианирование, но этот процесс характеризуется высоким расходом цианида натрия, вследствие повышенного содержания меди, и гипохлорита кальция в цикле обезвреживания цианистых пульп, что делает процесс экономически неэффективным.

В связи с этим актуальной представляется разработка гидрометаллургической технологии переработки техногенного сырья, основанной на использовании ультранизких концентраций цианида натрия (5–100 мг/дм<sup>3</sup>), что позволит существенно сократить расход реагентов (NaCN и Ca(ClO)<sub>2</sub>).

## **2. Структура и содержание работы**

Работа представлена на 145 страницах машинописного текста, включая 26 таблиц, 30 рисунков и 3 приложения. Диссертация состоит из введения, семи глав, заключения, списка литературы из 126 наименований. Работа выполнена в АО «Иргиредмет».

В разделе «Введение» обоснована актуальность диссертационной работы, ее научная новизна и практическая значимость. Сформулированы цель и направления исследований, а также перечислены основные положения, выносимые на защиту.

В первой главе представлен обзор научно-технических публикаций по теме диссертационной работы, дана краткая характеристика техногенного сырья (пиритные огарки и хвосты флотации полиметаллических руд), а также проведен анализ существующих способов их переработки.

Во второй главе представлены результаты опытов по изучению основных физико-химических закономерностей растворения металлических золота и меди при ультранизких концентрациях цианида натрия с применением метода вращающегося диска. Определены области протекания процессов растворения данных металлов, изучены зависимости их скорости растворения от концентрации цианида натрия, температуры и щелочности раствора.

Рассчитаны значения констант скорости растворения золота и меди в растворах с ультранизкой концентрацией растворителя, а также энергии активации процессов.

На основании полученных физико-химических характеристик растворения золота и меди сделан вывод о том, что ведение процесса цианирования указанных металлов при ультранизких концентрациях растворителя протекает эффективно.

Проведены опыты по оценке скорости растворения природных минералов меди (халькопирит, борнит, азурит) в растворах с ультранизкой концентрацией цианида натрия. Для сравнения выполнены эксперименты при концентрации растворителя 1 г/дм<sup>3</sup>. Вычислены значения экспериментальной энергии активации вышеуказанных минералов меди для раствора с ультранизкой концентрацией цианида натрия.

Изучена зависимость удельной скорости растворения минералов от способа подачи растворов с ультранизкой концентрацией цианида натрия в процесс выщелачивания (разовый и дробный). Отмечено, что дробная подача цианида натрия в процесс цианирования снижает скорость растворения меди на 10–30 % в сравнении с разовой загрузкой, что является положительным эффектом при цианировании золотомедного сырья с использованием ультранизких концентраций растворителя.

В третьей главе представлены результаты исследований, проведенных с целью оценки применимости процесса цианирования с ультранизкими концентрациями цианида натрия для извлечения ценных компонентов из техногенных продуктов различного вещественного состава: пиритные огарки и хвосты обогащения, полученные при флотации полиметаллических руд на предприятиях Российской Федерации.

Полученные результаты показали, что цианирование исследуемого техногенного сырья можно проводить при пониженных концентрациях цианида натрия в растворе (на уровне 50 мг/дм<sup>3</sup>) практически без снижения показателей извлечения золота.

Ввиду значительных запасов и содержания ценных компонентов для разработки рациональной технологии извлечения ценных компонентов из техногенного сырья выбраны хвосты обогащения II, полученные при флотации медно-цинковой руды на одном из предприятий Российской Федерации.

В четвертой главе приведены результаты исследований по разработке технологии извлечения золота из лежалых хвостов обогащения II, включающей предварительную отмывку, известковую обработку и цианирование полученного материала, с оптимизацией условий по каждому переделу.

Изучено влияние продолжительности цианирования и расхода NaCN, крупности помола, отношения Ж:Т и способа подачи растворителя на извлечение золота из лежалых хвостов обогащения II, прошедших предварительную водную и известковую обработку.

В пятой главе представлены результаты укрупненно-лабораторных испытаний, проведенных на лежалых хвостах обогащения II исходной крупности и после бисерного помола до крупности 30 мкм. Проведенные испытания подтвердили лабораторные данные и показали перспективность технологии цианирования хвостов обогащения II при ультранизких концентрациях цианида натрия (концентрация NaCN в растворе 30 мг/дм<sup>3</sup>). Также сделан вывод, что вариант с предварительным бисерным измельчением хвостов обогащения на данном этапе представляется экономически нецелесообразным ввиду высокого расхода цианида натрия и активного хлора. При этом показано, что доизвлеченное золото не окупит дополнительных затрат на реагенты.

В шестой главе приведены результаты опытно-промышленных испытаний технологии цианирования текущих хвостов обогащения II, проведенных в опытном цехе АО «Покровский рудник» (г. Благовещенск) на пробе массой 67 т, которые подтвердили результаты лабораторных и укрупненно-лабораторных испытаний. Предложена технология переработки насыщенного угля, включающая предварительное обезмеживание, автоклавно-щелочную десорбцию золота, вторичное концентрирование и электролитическое осаждение золота.

В седьмой главе приведено описание рекомендованной технологической схемы извлечения золота из лежалых и текущих хвостов обогащения II на основе применения ультранизких концентраций цианида натрия, а также выполнен ее укрупненный технико-экономический расчет.

Заключение содержит краткие результаты проведенных исследований.

Приложения содержат характеристику природных минералов меди, использованных для изучения основных закономерностей их растворения методом порошков, а также сопутствующие расчетные данные.

### **3. Научная новизна диссертации**

Впервые с использованием метода вращающегося диска изучена кинетика процессов растворения металлических золота и меди в растворах с ультранизкой концентрацией цианида натрия (5–100 мг/дм<sup>3</sup>). Определены значения констант скоростей реакций, лимитирующие стадии и энергии активации процессов растворения металлов.

С использованием метода порошков изучены основные закономерности растворения природных медных минералов (халькопирит, борнит и азурит) в растворах с ультранизкой концентрацией лиганда.

### **4. Практическая значимость работы**

На основании результатов теоретических исследований разработана технологическая схема извлечения золота из хвостов обогащения полиметаллических руд, обеспечивающая приемлемые показатели извлечения золота и расход растворителя и включающая следующие основные операции: водная отмывка растворенных цветных металлов с последующей нейтрализацией кислых растворов (для лежалых хвостов), известково-воздушная обработка, предварительное и сорбционное цианирование (СIP-процесс) при концентрации NaCN 10–30 мг/дм<sup>3</sup>, отдельная десорбция меди и золота из фазы насыщенного угля, вторичное концентрирование золота на активный уголь, электролитическое осаждение золота, плавку катодных осадков.

Технология испытана в укрупненно-лабораторных и опытно-промышленных условиях на лежалых и текущих хвостах обогащения полиметаллических руд с содержанием 1,24 и 1,35 г/т золота, 14,8 и 16,7 г/т серебра, 0,135 и 0,16 % меди, 0,239–0,39 % цинка соответственно.

В результате проведенных испытаний подтверждены экспериментальные данные теоретических и технологических исследований и достигнуты следующие показатели: концентрация NaCN в процессе цианирования – 10–30 мг/дм<sup>3</sup>, извлечение Au – 31,5 и 31,9 %, расход NaCN – 0,3 и 0,135 кг/т для лежалых и текущих хвостов соответственно.

Проведенный укрупненный технико-экономический расчет разработанной технологии, основанной на применении ультранизких концентраций цианида натрия для переработки хвостов обогащения, показал свою рентабельность. Условный чистый денежный поток от операционной деятельности составил для текущих и лежалых хвостов, соответственно 1138,24

и 599,11 млн. руб./год, рентабельность – 80,76 и 25,85 %, срок окупаемости – 1,37 и 2,77 лет.

На основании полученных данных разработан технологический регламент на переработку хвостов обогащения для технико-экономического обоснования реконструкции обогатительной фабрики, перерабатывающей медно-цинковые руды.

**5. Достоверность и апробация результатов исследований** подтверждается использованием аттестованных методик при выполнении физико-химических методов анализа, применением современных средств измерений, математической обработкой результатов исследований, использованием апробированных современных компьютерных программ, укрупненно-лабораторными и опытно-промышленными испытаниями, а также согласованностью выводов теоретических исследований и опытно-промышленных испытаний.

Основные результаты работы докладывались на международном совещании, международных конференциях и выставках, на кафедре металлургии цветных металлов ФГБОУ ВО «ИРНИТУ».

#### **6. Общая оценка диссертации, вопросы и замечания**

Оформление диссертации производит благоприятное впечатление, а графические и табличные материалы достаточно полно отражают полученные автором результаты.

Материал в диссертации изложен научным, технически грамотным языком. Все главы работы логически связаны между собой, содержат выводы, по которым можно судить о завершенности раздела и решении задач на конкретном этапе исследования. Рисунки, цветные иллюстрации и графики, приведенные в работе, выполнены качественно и полноценно дополняют текстовую информацию. Автореферат отвечает основному содержанию работы, а поставленные в диссертации задачи решены в полном объеме.

По содержанию диссертации и автореферата имеются следующие вопросы и замечания:

1. В главе 2 приведены результаты теоретических исследований кинетики процесса растворения золота и меди в растворах с ультранизкой концентрацией цианида натрия. Как полученные результаты использованы при разработке технологии переработки хвостов обогащения II?

2. На стр. 54 в главе 2 диссертации сказано, что удельную поверхность минералов меди в процессе изучения основных закономерностей их растворения в растворах с ультранизкой концентрацией цианида натрия определяли с помощью лазерного гранулометра фирмы Malvern Mastersizer 3000, но не приведены полученные значения.

3. На стр. 67 в главе 3 диссертации в качестве перспективного объекта для проведения дальнейших исследований автор выбирает хвосты обогащения II, хотя по результатам рационального анализа (стр. 63) извлечение золота из данного сырья наименьшее (37,4 %) против 66,7 % - из пиритных огарков, 46,5 % - из хвостов обогащения I.

4. Помимо золота в изученном техногенном сырье присутствуют цветные металлы, в частности, медь и цинк (табл. 3.1, 3.2 диссертации). Насколько реальна возможность их извлечения?

5. На стр. 92 в главе 5 диссертации для обезвреживания хвостов сорбционного цианирования автором предложена противоточная декантационная отмывка с хлорированием промвод. Рассматривались ли другие методы и варианты обезвреживания?

6. Несмотря на положительные результаты технико-экономического расчета разработанной технологии (табл. 7.2 диссертации и табл. 5 автореферата), обращает на себя внимание полученное низкое извлечение золота из хвостов обогащения II (31,5–31,9 %). Существуют ли какие-либо способы повышения извлечения золота из данного сырья?

7. В тексте диссертации отсутствует единая система выражения концентрации цианида натрия: концентрация растворителя приводится в г/дм<sup>3</sup> и в моль/дм<sup>3</sup>.

8. Имеются опечатки и пунктуационные неточности (стр. 38, 49, 58, 71, 93 диссертации).

Однако указанные замечания не снижают ценность и общую положительную оценку диссертации.

## **7. Заключение**

Результаты исследований Васильковой А.О. содержатся в 4-х статьях, опубликованных в журналах из Перечня изданий, рекомендованных ВАК РФ.

Автореферат отвечает основному содержанию работы, а поставленные в диссертации задачи решены в полном объеме.

Диссертация Васильковой А.О. является законченной научно-квалификационной работой, выполненной автором самостоятельно, на современном научном уровне, содержит результаты, обладающие научной новизной и практической значимостью для предприятий цветной металлургии, занимающихся вопросами извлечения золота из отходов горнометаллургического производства, а также переработкой медистых золотосодержащих руд. Это позволяет считать, что диссертация Васильковой А.О. соответствует п. 9 «Положения о порядке присуждения ученых степеней», утвержденного постановлением Правительства РФ от 24.09.2013 г., № 842, а ее автор – Василькова Анастасия Олеговна – достойна присуждения ученой степени кандидата технических наук по специальности 2.6.2. Металлургия черных, цветных и редких металлов.

Отзыв обсужден и одобрен на заседании кафедры металлургии федерального государственного бюджетного образовательного учреждения высшего образования «Санкт-Петербургский горный университет императрицы Екатерины II». Присутствовало на заседании 11 чел., результаты голосования: «за» – 11, «против» – нет, «воздержались» – нет, протокол заседания № 23 от «13» мая 2024 г.

Председатель заседания –  
заведующий кафедрой металлургии,  
доктор технических наук,  
профессор

Бажин Владимир Юрьевич

Секретарь заседания –  
ведущий инженер кафедры  
металлургии

Брылевская Елена Анатольевна

Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования «Санкт-Петербургский горный университет императрицы Екатерины II».

Почтовый адрес: Россия, 199106, Санкт-Петербург, Васильевский остров, 21 линия д.2

Официальный сайт: <https://spmi.ru/>

Тел. +7-812-382-01-28, e-mail: [rectorat@spmi.ru](mailto:rectorat@spmi.ru)



*В.Ю. Дюмина, Е.А. Брылевской*  
Заведующий кафедрой металлургии

Заведующий кафедрой металлургии  
и директор управления делопроизводства  
и документооборота

Е.Р. Яновицкая

13.05.2024