

ОТЗЫВ ОФИЦИАЛЬНОГО ОППОНЕНТА

на автореферат и диссертационную работу Горячева Андрея Александровича на тему «Обоснование и разработка термогидрохимической технологии переработки медно-никелевых руд и техногенных продуктов с использованием сульфата аммония», представленную на соискание ученой степени кандидата технических наук по специальности: 2.8.9. – Обогащение полезных ископаемых (технические науки).

Актуальность темы диссертационной работы

Проблема расширения минерально-сырьевой базы меди и никеля за счёт создания альтернативных комбинированных технологий обогащения в последние годы приобрела особую значимость. Для удовлетворения растущих потребностей рынка в цветных металлах предприятия горно-металлургического комплекса вынуждены вовлекать в переработку значительно большие объёмы бедных медно-никелевых руд. При увеличении доли тонковкрапленных руд, поступающих на обогащение, значительно возрастают потери цветных металлов в хвосты. Складируемые отходы обогащения подвержены гипергенным изменениям, что приводит к ухудшению технологических свойств медь- и никельсодержащих минералов, загрязнению прилегающих экосистем, что особенно актуально для северных регионов, где экосистемы отличаются низкой резистентностью к внешнему воздействию. Требуется создание экономически эффективных и экологически безопасных технологий обогащения медно-никелевых руд и техногенных продуктов. В этой связи тема представленной на отзыв диссертации актуальна как в научном, так и прикладном отношении.

Целью работы является изучение и обоснование механизма взаимодействия сульфата аммония $((\text{NH}_4)_2\text{SO}_4)$ с сульфидными минералами и медно-никелевыми рудами в процессе их низкотемпературного обжига и разработка технологии обогащения, обеспечивающей извлечение цветных металлов из руд.

Для решения поставленной цели автором были сформулированы следующие задачи исследований:

- установление фазовых превращений сульфидных минералов, происходящих при взаимодействии с сульфатом аммония в процессе их низкотемпературного обжига;
- разработка научных основ химико-металлургического обогащения медно-никелевых руд методом низкотемпературного обжига с сульфатом аммония;
- исследование процесса извлечения ионов меди, железа, никеля и кобальта из продуктивных растворов выщелачивания обожженной смеси;
- определение способов безопасной утилизации твердой фазы и растворов после выщелачивания и извлечения цветных металлов.

Идея работы заключается в использовании данных о фазовых превращениях сульфидных минералов в процессе низкотемпературного обжига в смеси с сульфатом аммония для обоснования технологий извлечения цветных металлов из сульфидных руд.

Общая характеристика диссертационной работы

Представленная на отзыв диссертационная работа Горячева Андрея Александровича состоит из введения, пяти глав, заключения и списка литературы. Текст изложен на 140 страницах, иллюстрирован 68 рисунками, содержит 4 таблицы и список использованных библиографических источников в количестве 137 наименований.

Во введении обоснована актуальность темы диссертации, сформулированы цели и задачи исследований, научная новизна и практическая значимость, представлены основные положения, выносимые на защиту.

В первой главе приведен обзор перспективных направлений и технологий вовлечения в переработку медно-никелевых руд Мурманской области, рассмотрена минерально-сырьевая база региона, экологическая

опасность неполного извлечения цветных металлов и опасность складирования сульфидсодержащих отходов обогащения, проанализированы технологические проблемы переработки медно-никелевого сырья и нетрадиционные технологии его переработки.

Во второй главе дана краткая характеристика объектов и применяемых методов исследования.

В третьей главе представлены результаты исследования преобразований синтезированных сульфидных минералов в процессе низкотемпературного обжига. Рассмотрены фазовые превращения, происходящие с минералами при их обжиге в смеси с сульфатом аммония.

Четвертая глава посвящена разработке технологии обогащения чернового флотационного медно-никелевого концентрата, руд Аллареченского техногенного месторождения и месторождения Ньюд П с извлечением цветных металлов в продуктивный раствор.

В пятой главе предложены способы извлечения цветных металлов из продуктивных растворов. Приведена технологическая схема переработки сульфидного медно-никелевого сырья с получением товарных продуктов, выполнена экономическая оценка использования технологии низкотемпературного обжига, приведен ожидаемый экономический эффект.

В заключении сформулированы основные выводы по диссертационной работе.

Обоснованность и достоверность защищаемых научных положений и выводов диссертации

Все защищаемые научные положения и выводы диссертации А.А. Горячева имеют под собой теоретическую и экспериментальную основу.

Научные положения, выводы и рекомендации работы основаны на результатах лабораторно-аналитических исследований в аккредитованных лабораториях с привлечением комплекса современных физических и физико-

химических методов, применением аттестованных методик, подтверждаются корректной статистической обработкой результатов.

Автором изучены фазовые превращения сульфидных минералов, происходящие при их обжиге при 400°C, а также особенности взаимодействия сульфидов при их обжиге в смеси с сульфатом аммония. На примере медно-никелевого сырья различного происхождения определены оптимальные режимные параметры обжига, приводящие к интенсивному формированию сульфатов цветных металлов.

Объектами исследований послужили синтезированные сульфидные минералы – пентландит, халькопирит, борнит и пирротин, а также природное и техногенное медно-никелевое сырьё – руда отвала Аллареченского техногенного месторождения, черновой флотационный концентрат, некондиционная руда месторождения Нюд II. Экспериментальные образцы были исследованы методами сканирующей электронной микроскопии, энергодисперсионной рентгеновской спектроскопии, рентгенофазового, синхронного термического, химического и минералогического анализов.

Результаты работы А.А. Горячева в достаточной мере апробированы: доведены до сведения широкой научной общественности и обсуждены на ряде представительных национальных и международных конференциях и семинарах.

Это позволяет рассматривать результаты диссертационной работы как обоснованные и достоверные.

Новизна результатов диссертационного исследования

Выявленные А.А. Горячевым закономерности позволили получить следующие наиболее существенные результаты, определяющие научную новизну диссертационной работы:

- Выявлен механизм взаимодействия сульфидов медно-никелевых руд с сульфатом аммония в процессе обжига. Пирротин взаимодействует с реагентом с образованием различных аммонийсодержащих сульфатов

железа, таких как пиракмонит $(\text{NH}_4)_3\text{Fe}(\text{SO}_4)_3$ и сабиит $\text{NH}_4\text{Fe}(\text{SO}_4)_2$. Сульфиды никеля и меди обедняются железом и образуют промежуточные, обогащенные цветными металлами, вторичные фазы: краунингшиллит $(\text{Ni}_{0,9}\text{Fe}_{0,1})\text{S}$, полидимит (Ni_3S_4) , борнит $(\text{Cu}_3\text{FeS}_4)$, фукучилит $(\text{Cu}_3\text{FeS}_8)$, ковеллин (CuS) . Конечным продуктом взаимодействия являются водорастворимые сульфаты никеля и меди.

- В процессе водного выщелачивания обожженной смеси медно-никелевых руд и сульфата аммония образованные при оптимальных условиях обжига сульфаты цветных металлов полностью растворяются при последующем водном выщелачивании (температура около 80°C , продолжительность выщелачивания 40 мин, интенсивность перемешивания интенсивностью 230 мин^{-1}). Остаток (кек выщелачивания) характеризуется преобладанием устойчивых при температуре 400°C оксидов, гидроксидов и силикатов.

- Разработанные оптимальные технологические параметры технологии (массовое соотношение концентрата и сульфата аммония составляет 1:7, крупность частиц обжигаемой смеси - 40 мкм, температура обжига 400°C , продолжительность обжига - 240 мин) обеспечивают извлечение меди и никеля в раствор свыше 90% от исходного содержания в концентрате. Установлено, что при переработке медно-никелевых руд целесообразно совместное измельчение с сульфатом аммония.

- Схема, включающая извлечение меди методом цементации на железе, последующее осаждение железа известью, а также никеля и кобальта с помощью гидроксида магния, обеспечивает извлечение цветных металлов из раствора свыше 99%. Образовавшийся после осаждения железа осадок характеризуется преобладанием гипса $(\text{CaSO}_4 \times 2\text{H}_2\text{O})$ и может быть использован в качестве компонента строительных смесей. Выделение оксидов серы и азота, а также аммиака на стадии обжига делает возможным регенерации сульфата аммония.

Таким образом, полученные А.А. Горячевым результаты открывают возможности создания научных основ химико-металлургического обогащения – термогидрохимической технологии переработки медно-никелевых руд и техногенных продуктов.

Вклад автора состоял в постановке целей и задач исследований, выборе методик, проведении работ, включающих отбор проб руды и процессы рудоподготовки, постановку лабораторных экспериментов по низкотемпературному обжигу и водному выщелачиванию, с последующим произведением расчетов и обоснованием выводов. Таким образом, основные положения, выносимые на защиту, принадлежат автору работы.

Практическое значение диссертационной работы

Практическое значение диссертации А.А. Горячева очевидно и заключается в создании комбинированной технологии обогащения сульфидного медно-никелевого сырья природного и техногенного генезиса, способствующей снижению потерь ценного компонента в процессе обогащения, а также капитальных и эксплуатационных затрат. Использование результатов работы на промышленных предприятиях позволит сократить себестоимость производства цветных металлов, а также снизить негативное воздействие на атмосферный воздух за счет улавливания отходящих газов с последующей регенерацией реагента.

Способ переработки сульфидного медно-никелевого сырья методом низкотемпературного обжига с сульфатом аммония защищен патентом РФ.

Замечания и рекомендации по работе

По диссертационной работе А.А. Горячева имеются следующие вопросы и замечания, которые, однако, не затрагивают сути и новизну научных положений, основных выводов и общую положительную оценку работы:

1. Рассмотренные объекты исследования расположены в Мурманской области, являющейся частью Арктической зоны РФ. В Арктике сосредоточены огромные запасы медно-никелевых руд страны. В этой связи во введении было бы полезно добавить фразу, уточняющую важность проводимой работы в рамках концепции развития Арктики в соответствии с Указом Президента РФ от 31 марта 2023 г.
2. Целесообразно было бы привести в диссертации карту-схему расположения объектов исследования, а также краткое описание основного промышленного оборудования от стадии дробления и измельчения сырья до стадии извлечения металлов из раствора.
3. Не проведено обоснование выбора сульфата аммония по сравнению с другими химическими соединениями с позиции возможной регенерации реагента и обеспечения замкнутого производства.
4. Существует принципиальная возможность регенерации сульфата аммония посредством улавливания отходящих газов. Однако схема осуществления процесса, а также экономические затраты в работе не представлены.
5. Существует несколько основных способов выделения никеля и меди из продуктивных растворов, применяемых в промышленном масштабе. Но обоснование выбора автором извлечения меди методом цементации и осаждения гидроксида никеля в работе не представлено.
6. В диссертации отмечается, что образующийся остаток после выщелачивания, а также железо-гипсовый кек могут быть использованы в качестве компонентов строительных смесей. Было бы целесообразно указать, в производстве каких именно стройматериалов возможно их применение, какие дополнительные операции необходимы для доведения этих отходов до нужных кондиций (т.к. в составе железогипсового кека может находиться около 15% оксидов железа, а также заметные количества оксидов хрома, никеля, меди и т.п., т.е. возникает проблема соответствия требованиям

СанПиН и СНиП); каковы ожидаемые потребительские свойства получаемой продукции и привести (если есть) примеры такого использования.

7. Отсутствует расчет, за счет какого передела (операции) происходит снижение потерь цветных металлов. Нет расчета (даже ориентировочного) стоимости реконструкции предприятия и срока амортизации.

8. Не указано, потребуется ли при переходе на новую технологию изменение всей технологии очистки отходящих газов и ориентировочная цена этого изменения.

Общая оценка диссертационной работы

Диссертация представляет собой законченную научно-квалификационную работу, обладающую внутренним единством содержания, научной новизной и практической значимостью и оценивается положительно. Диссертационная работа соответствует пунктам 3, 4, 5 и 9 Паспорта специальности 2.8.9. – Обогащение полезных ископаемых.

Диссертация А.А. Горячева является научно-квалификационной работой, в которой на основании выполненных автором исследований дано одно из возможных решений весьма актуальных научно-практических проблем – расширение минерально-сырьевой базы цветных металлов и снижение негативного воздействия на окружающую среду в Арктике.

Работа соответствует требованиям пунктов 9-14 «Положения о порядке присуждения ученых степеней» (в редакции Постановления Правительства РФ от 24.09.2013 №842), предъявляемых ВАК при Минобрнауки России к диссертациям на соискание ученой степени кандидата наук.

Автореферат соответствует структуре и содержанию диссертационной работы.

Основные положения диссертационной работы раскрыты в 14 научных работах, в том числе в 3 статьях в изданиях, рекомендованных ВАК РФ; получен 1 патент. Работа получила поддержку от Фонда содействия инновациям на конкурсе «УМНИК-2020», региональную поддержку в виде

Инновационного ваучера, а также диплом лауреата конкурса работ молодых ученых на конференции «Плаксинские чтения – 2022». Результаты работы А.А. Горячева доложены и обсуждены на 8 международных и всероссийских конференциях.

Автор диссертации, Горячев Андрей Александрович, заслуживает присуждения ученой степени кандидата технических наук по специальности 2.8.9. – Обогащение полезных ископаемых.

Официальный оппонент,
кандидат технических наук, доцент,
заведующий кафедрой обогащения
и переработки полезных ископаемых
и техногенного сырья НИТУ МИСИС

Т.И. Юшина

г. Москва, Ленинский проспект, 6с7,
корпус Л, аудитория Л-225, кафедра ОПИ НИТУ МИСИС
+74992302446, +79032795452
yushina.ti@misis.ru

2.8.9 – Обогащение полезных ископаемых

Подпись руки Юшиной Т.И. подтверждаю:
Проректор НИТУ МИСИС по безопасности и
общим вопросам

И.М. Исаев

« 08 » февраля 2024 г.



СВЕДЕНИЯ
об официальном оппоненте по диссертационной работе
Горячева Андрея Александровича
«Обоснование и разработка термогидрохимической технологии
переработки медно-никелевых руд и техногенных продуктов с
использованием сульфата аммония»

ФИО	Место основной работы (полное наименование, адрес, контакты, должность)	Ученая степень (документ о присвоении степени)	Ученое звание (документ о присвоении звания)
Юшина Татьяна Ивановна	Федеральное государственное автономное образовательное учреждение высшего образования «Национальный исследовательский технологический университет «МИСиС» (ФГАОУ ВО НИТУ «МИСиС»), 119049, Россия, г. Москва, Ленинский проспект, д.4 e-mail: yushina.ti@misis.ru Тел.: +7 499 230-24-46 Должность: заведующий кафедрой Обогащения и переработки полезных ископаемых и техногенного сырья	Кандидат технических наук Диплом КТ № 037818 о присуждении степени кандидата технических наук, степень присуждена решением диссертационного совета Московского Государственного горного университета от 14 ноября 1997 г. (протокол № 44)	Доцент Аттестат ДЦ № 045133 о присвоении ученого звания доцента по кафедре обогащения полезных ископаемых, звание присуждено приказом Министерства образования и науки Российской Федерации от 28 мая 2012 г. № 265/нк-2

**Основные публикации по теме диссертации в рецензируемых научных
изданиях за последние 5 лет:**

1. В.Н. Петухов, С.А. Щелкунов, О.А. Малышев, Т.И. Юшина. Ацетиленовые реагенты для флотации углей: монография / Магнитогорск: Изд-во Магнитогорск. гос. техн. ун-та им. Г.И. Носова, 2023. 235 с.
2. Yushina, T.I., Shchelkunov, S.A., Malyshev, O.A. Flotation of copper-zinc ores using reagents based on acetylene alcohols // Non-ferrous Metals, 2023, No. 2, pp. 19–26.

3. R. I. Ismagilov, T. I. Yushina. A. M. Dumov. Contrast range examination of rich iron ore from Mikhailovskoe deposit and evaluation of possibility of its preliminary concentration via physical methods // CIS Iron and Steel Review — Vol. 26 (2023), pp. 22–31.
4. Никитин А. Ю., Елисеева Р. А., Юшина Т. И. Анализ конструктивных особенностей и практика применения колонных флотомашин на обогатительных фабриках России // «Обогащение руд». 2023. № 3, с. 42-48.
5. Yushina, T.I., Shchelkunov, S.A., Malyshev, O.A. Quantum-chemical substantiation of collecting properties of acetylene reagents in flotation of sulphide minerals // Non-ferrous Metals, 2021, 51(2), pp. 3–10.
6. Yushina T.I., Dumov A.M., Makavetskas A.R. Study of the material composition of lead-zinc ore of the Shalkiya deposit in order to determine the possibility of its processing. Non-ferrous Metals. 2022. No. 2, pp. 8–14 <https://doi.org/10.17580/nfm.2022.02.02> (Q2)
7. Yushina T.I., VAN TRONG N., Dumov A.M., Thuy N.T. Technology for processing quartz-sericite ore by selective grinding and flotation. Eurasian Mining. 2022, 38(2), pp. 44–49. <https://doi.org/10.17580/em.2022.02.11> (Q2)
8. Yushina T.I., Shchelkunov S.A., Malyshev O.A. Justification of applying collectors from the class of unsaturated tertiary alcohols in flotation of gold-bearing sulphide ores. Non-ferrous Metals, 2022, 52(1), pp. 3–10. <https://doi.org/10.17580/nfm.2022.01.01> (Q2)
9. Yushina T.I., Trong N.V., Dumov A.M., Thuy N.T. A study on the possibility of processing quartz-sericite ore of the Ha Tinh deposit in Vietnam. Obogashchenie Rud, 2022, 2022(1), pp. 8–13. <https://doi.org/10.17580/or.2022.01.02> (Q3)
10. Yushina T.I., Thuy N.T., Dumov A.M., Van Trong N. A study on the possibility of processing quartz-feldspar ore of the Quang Nam deposit in Vietnam. Obogashchenie Rud, 2022, 2022(6), pp. 3–8. <https://doi.org/10.17580/or.2022.06.01> (Q3)
11. Петухов В.Н., Щелкунов С.А., Малышев О.А., Кубак Д.А., Юшина Т.И. Компьютерное моделирование взаимодействия ацетиленовых спиртов с фрагментами ому - основа прогнозирования эффективности флотации углей. Кокс и химия. 2022. № 7. С. 7-16. https://doi.org/10.52351/00232815_2022_07_7 (ВАК)
12. Петухов В.Н., Щелкунов С.А., Малышев О.А., Кубак Д.А., Юшина Т.И. Влияние растворителя (воды) на квантово-химические взаимодействия при флотации углей. Кокс и химия. 2022. № 11. https://doi.org/10.52351/00232815_2022_11_30 (ВАК)

13. Petukhov V.N., Shchelkunov, S.A., Malyshev, O.A., Kubak, D.A., Yushina, T.I. Interaction of Acetylenic Alcohols with the Coal's Surface during Flotation. *Coke and Chemistry*, 2022, 65(7), pp. 261–269. (BAK)
14. Yushina, T.I., Chanturia, E.L., Dumov, A.M., Myaskov, A.V. Modern trends of technological advancement in iron ore processing // *Gornyi Zhurnal*, 2021, (11), стр. 75–83.
15. Tyukin, A.P., Yushina, T.I. Determining optimum process parameters for gas-dynamic separation of granular materials// *Tsvetnye Metally*, 2021, (12), p. 7–13.
16. Chylbak-Ool, E.D., Kruglov, A.V., Dmitrakova, U.V., Yushina T.I. Influence of granulometric composition and characteristics of filtration fabric on dehydration of difficult-to-filter concentrates // *Tsvetnye Metally*, 2021, 2021(8), p. 20–25.
17. Dmitrakova, U.V., Kruglov, A.V., Chylbakool, E.D., Yushina, T.I. Filtering equipment application practice at russian enterprises // *Obogashchenie Rud*, 2021, 2021(4), p. 52–56.
18. Yushina, T.I., Thuy, N.T., Dumov, A.M., Van Trong, N. Features of material constitution of quartz–feldspar ore from quang nam deposit in Vietnam // *Eurasian Mining*, 2021, 35(1), p. 49–54.
19. Kuskov, V.B., Lvov, V.V., Yushina, T.I. Increasing the recovery ratio of iron ores in the course of preparation and processing // *CIS Iron and Steel Review*, 2021, 21, p. 4–8.
20. Yushina, T.I., Petrov, I.M., Chernyi, S.A., Petrova, A.I. Problems and prospects of waste processing and recycling of production containing rare earth metals // *Non-ferrous Metals*, 2021, 50(1), p. 15–26.
21. Yushina, T.I., Dumov, A.M. Mineral composition and commercial application feasibility of sericite ore in Ha Tinh Province // *Eurasian Mining*, 2020(2), pp. 32–38.
22. Tyukin, A.P., Yushina, T.I. Mathematical modelling of gas-dynamic separation processes // *Tsvetnye Metally*, 2020(7), стр. 9–17.
23. Yushina, T.I., Purev, B., Namuungerel, B. Substantiation of the erdenetiyn-ovoo copper-molybdenum ore flotation technology with the use of tertiary acetylene alcohols // *Non-ferrous Metals*, 2020, 49(2), стр. 3–10.
24. Yushina, T.I., Petrov, I.M., Cherny, S.A., Petrova, A.I. Rare-earth metal ore processing technologies when developing new deposits information about authors // *Obogashchenie Rud*, 2020(6), стр. 47–53.
25. Yushina, T.I., Petrov, I.M., Cherny, S.A., Petrova, A.I. Overview of processing technologies for the raw materials of rare-earth metals (REM) at existing enterprises // *Obogashchenie Rud*, 2020(2), стр. 46–51.

26. Yushina, T.I., Purev, B., Yanes, K.S.D., Malofeeva, P.R. Improvement of porphyry copper flotation efficiency with auxiliary collectors based on acetylene alcohols // Eurasian Mining, 2019, 2019(1), p. 25–30

27. Yushina, T.I., Purev, B., D'Elia, K., Namuungerel, B. Analysis of technological schemes and substantiation of the selection of the reagent regimes for copper-molybdenum ores flotation // Non-ferrous Metals, 2019, 46(1), p. 3–11

28. Bocharov, V.A., Yushina, T.I., Ignatkina, V.A., Kayumov, A.A., Petrov, I.M. On the selection of technologies of comprehensive processing of ores of nonferrous and rare metals based on penetrative disclosure of minerals comprehensive processing // IMPC 2018 - 29th International Mineral Processing Congress, 2019, стр. 1214–1221

Официальный оппонент,

кандидат технических наук, доцент,
заведующий кафедрой обогащения
и переработки полезных ископаемых
и техногенного сырья НИТУ МИСИС

Т.И. Юшина

Достоверность сведений и подпись руки Юшиной Т.И. подтверждаю:

Проректор НИТУ МИСИС по безопасности и
общим вопросам

И.М. Исаев

« 08 » сентября 2024 г.

