



«УТВЕРЖДАЮ»

И. о. ректора РХТУ им. Д. И. Менделеева,
доктор технических наук, профессор
И. В. Воротынцев

« 22 » марта 2022 г.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Диссертация Хтет Йе Аунга на тему: «Комплексная щелочно-карбонатно-хлоридная переработка красных шламов с извлечением скандия, РЗЭ, титана, алюминия и железа» по научной специальности 2.6.8 Технология редких, рассеянных и радиоактивных элементов выполнена кафедре технологии редких элементов и наноматериалов на их основе федерального государственного бюджетного образовательного учреждения высшего образования «Российский химико-технологический университет имени Д.И. Менделеева».

В процессе подготовки диссертации Хтет Йе Аунг, «05» сентября 1992 года рождения, являлся аспирантом кафедры технологии редких элементов и наноматериалов на их основе Российского химико-технологического университета имени Д.И. Менделеева с 01 сентября 2016 года по 31 августа 2020 года. С 01 сентября 2020 года по настоящее время является соискателем ученой степени кандидата наук без освоения программы подготовки научно-педагогических кадров в аспирантуре на кафедре технологии редких элементов и наноматериалов на их основе.

Справка об обучении выдана Российским химико-технологическим университетом им. Д. И. Менделеева в 2021 году.

Научный руководитель – кандидат химических наук (специальность 05.17.02 Технология редких, рассеянных и радиоактивных элементов), доцент кафедры технологии редких элементов и наноматериалов на их основе Российского химико-технологического университета им. Д. И. Менделеева Бояринцев Александр Валентинович.

По результатам рассмотрения диссертации на тему: «Комплексная щелочно-карбонатно-хлоридная переработка красных шламов с извлечением скандия, РЗЭ, титана, алюминия и железа» принято следующее заключение.

Актуальность темы диссертационной работы обусловлена необходимостью обеспечения отечественной сырьевой базы соединениями критически важных редкоземельных и редких металлов которые могут быть получены при комплексной переработке красных шламов, а также необходимостью оптимизации начальных стадии и разработки физико-химических основ финальных стадий технологической схемы комплексной переработки красных шламов, позволяющей в качестве продуктов выделять черновые концентраты скандия, редкоземельных элементов, циркония и титана, а также железо в виде чугуна и соединения алюминия пригодные для производства ликвидных продуктов.

Научная новизна заключается в следующем:

1. Установлено, что при карбонизации красного шлама (КШ) углекислым газом протекает частичное или полное разрушение канкринита и гидрограната кальция с образованием нордстрандита и высвобождением изоморфно замещенного и химически связанного скандия из твердой фазы этих минералов в карбонатный раствор.

2. Показана применимость уравнения Яндера для математического описания кинетических кривых карбонатного: в двухфазных системах твердое – жидкость, и карбонизационного: в трехфазных системах твердое – жидкость – газ CO_2 , выщелачивания скандия из КШ. Рассчитаны и табулированы константы скоростей реакций и кажущиеся энергии активации выщелачивания скандия из КШ в системах: КШ – $\text{Na}_2\text{CO}_3(\text{NaHCO}_3)$ – H_2O и КШ – $\text{Na}_2\text{CO}_3(\text{NaHCO}_3)$ – CO_2 – H_2O , в том числе при ультразвуковой и механической обработке пульпы.

3. Методами рентгенофлуоресцентного анализа и ИК-спектроскопии доказано образование смешанных гетерополиядерных соединений алюминия со скандием, и на примере иттрия и иттербия с редкоземельными элементами (РЗЭ), в процессах поликонденсации их оксикарбонатных соединений, образующих вторичные осадки при карбонизационном выщелачивании КШ.

4. Показано, что введение в выщелачивающие карбонатные растворы хлоридных анионов, или таких комплексонов как этилендиаминтетрауксусная кислота и 8-оксихинолин, повышает степень извлечения скандия, среднетяжелых РЗЭ, титана, алюминия, галлия из КШ, а также стабилизирует карбонатные растворы этих элементов, предотвращая вторичное осадкообразование.

5. Методами рентгенофазового анализа, энергодисперсионной рентгеновской спектроскопии и масс-спектрометрии с индуктивно-связанной плазмой установлено, что в состав шлака, полученного в процессе восстановительной плавки железа из КШ, входят нефелин $\text{Na}_{7.11}(\text{Al}_{7.2}\text{Si}_{8.8}\text{O}_{32})$; герцинит $(\text{Fe}_{0.807}\text{Al}_{0.193})(\text{Al}_{1.807}\text{Fe}_{0.193})\text{O}_4$; рутил TiO_2 ; кирштейнит CaFeSiO_4 ; перовскит CaTiO_3 и минеральная фаза состава $\text{Ca}_{8.688}\text{Na}_{0.625}(\text{Al}_6\text{O}_{18})$. Высказано предположение об изоморфном замещении алюминия и железа скандием, галлием и РЗЭ в герцените, кирштейните и фазе состава $\text{Ca}_{8.688}\text{Na}_{0.625}(\text{Al}_6\text{O}_{18})$, а титана – цирконием и гафнием в рутиле и перовските.

6. Разработаны физико-химические основы кислотной переработки шлака восстановительной плавки железосодержащей части КШ с извлечением скандия, РЗЭ, алюминия, титана и других редких элементов.

Практическая значимость работы состоит в следующем:

1. Разработан способ карбонизационного выщелачивания скандия и РЗЭ из КШ, предотвращающий образование вторичных осадков за счет гетерополиядерных соединений скандия и РЗЭ с алюминием, позволяющий извлекать в карбонатные растворы за одну стадию более 45–45% скандия и более 60% среднетяжелых РЗЭ.

2. Разработаны условия повышения содержания скандия в выделяемом из карбонатных растворов черновом скандиевом концентрате с 1,5–2% до 10–15%.

3. Разработан процесс карбонатно-хлоридного выщелачивания алюминия, скандия, РЗЭ, титана и других редких металлов из КШ, позволяющий на 30–40%

повысить их извлечение в продуктивные растворы и устойчивость таких растворов для дальнейшей переработки.

4. Разработаны стадии кислотной переработки шлака восстановительной плавки железосодержащей части КШ с извлечением в растворы серной или хлористоводородной кислот более 85% скандия, до 70% суммы РЗЭ, более 90% циркония, до 60% гафния, более 65% галлия и до 20% титана.

5. На основании проведенных исследований оптимизирована стадия карбонизационного выщелачивания скандия, РЗЭ, титана и других редких элементов из КШ. За счет оптимизации повышено извлечение скандия на 10–15%, РЗЭ на 20–30% за одну стадию, содержание скандия в черновом скандиевом концентрате на 10–12%, содержание железа в железосодержащей части КШ на 5–10%. Разработаны завершающие стадии комплексной переработки КШ после восстановительной плавки железосодержащего концентрата, полученного после извлечения части алюминия, скандия, РЗЭ, титана и других редких элементов в щелочно-карбонатных средах, кислотной переработки шлака с извлечением из него скандия, РЗЭ, циркония, гафния, галлия и титана. Общее извлечение ценных компонентов из КШ по предлагаемой комплексной технологии достигает: скандия – более 90 %, иттрия – более 70%, РЗЭ тяжелой группы – 60–95%, РЗЭ средней группы – 60–75%, РЗЭ легкой группы – 35–55%, железа более 92%, титана ~50%, циркония – 80–90%, алюминия ~40%.

Работа характеризуется логичностью построения, аргументированностью основных научных положений и выводов, а также четкостью изложения.

Основные положения диссертации получили полное отражение в 15 печатных изданиях, в том числе в изданиях из перечня ВАК – 3 статьи, в журналах, входящих в базы данных научного цитирования Scopus, Web of Science – 3 статьи.

Результаты диссертации представлены на 7 международных и всероссийских конференциях, в том числе на XIV, XV и XVI Международных конгрессах молодых ученых по химии и химической технологии «УССТ-МКХТ» (Москва, 2018, 2019, 2020; опубликованы в журнале «Успехи в химии и химической технологии»), научно-практической конференции, посвященной 70-летию Института материалов современной энергетики и нанотехнологии РХТУ им. Д.И. Менделеева «Состояние и перспективы развития технологии материалов современной энергетики и наноматериалов» (Москва, 2019; опубликованы в журнале «Успехи в химии и химической технологии»), научно-практической конференции «Минерально-сырьевая база металлов высоких технологий. Освоение, воспроизводство, использование» (Москва 2019), научно-технической конференции «Химические технологии в инновационном потенциале Росатома» (Москва 2020), международной конференции «Scientific research of the SCO countries: synergy and integration», (Китай, 2021).

Публикации по теме диссертации

Публикации в изданиях, индексируемых в международных базах данных:

1. Alexander V. Boyarintsev, **Htet Ye Aung**, Sergei I. Stepanov, Andrei A. Shoustikov, Pavel I. Ivanov, Vladimir G. Giganov. Evaluation of main factors for

improvement of scandium leaching process from Russian bauxite residue (red mud) in carbonate media // ACS Omega. 2022. V. 7. Iss. 1. P. 259-273. (Web of Science, Scopus)

2. Alexander Boyarintsev, **Htet Ye Aung**, Sergey Stepanov and Andrei Shoustikov. Complex reprocessing of industrial alkaline waste of alumina production (red mud) for solving raw materials and environmental problems // E3S Web of Conferences. 2021. V. 258. Article number 08026. (Scopus)

3. **Htet Ye Aung**, Alexander Boyarintsev, Sergey Stepanov and Andrei Shoustikov. Current key options for management of industrial alkaline waste of alumina production (red mud) // E3S Web of Conferences. 2021. V. 284. Article number 01003. (Scopus)

Статьи в других научных журналах:

1. Степанов С.И., Бояринцев А.В., **Хтет Йе Аунг**, Чекмарев А.М., Гозиян А.В. Извлечение скандия из красных шламов и отходов мокрой магнитной сепарации титано-железо-ванадиевых руд // Разведка и охрана недр. 2020. № 10. С. 40-45.

2. Степанов С.И., Аунг Маунг Маунг, **Аунг Хтет Йе**, Бояринцев А.В. Химические аспекты карбонатного выщелачивания скандия из красных шламов // Вестник ВГУИТ. 2018. Т. 80. № 4. С. 349–355.

3. Бояринцев А.В., Маунг Аунг Маунг, **Йе Аунг Хтет**, Степанов С.И. Извлечение алюминия при комплексной переработке красных шламов // Вестник ВГУИТ. 2018. Т. 80. № 3. С. 317–322.

Публичные доклады на международных научных мероприятиях:

1. **Htet Ye Aung**, Boyarintsev Alexander Valentinovich, Stepanov Sergey Illarionovich. Non-autoclave alkaline leaching of aluminum from bauxite residue (red mud) // International Conference «Scientific research of the SCO countries: synergy and integration», Beijing, China, December 30, 2021. P. 186-191.

2. Бояринцев А.В., **Хтет Йе Аунг**, Степанов С.И. Карбонатные среды в технологии скандия и редкоземельных элементов // Сб. тезисов докладов по материалам Международной научно-технической конференции «Химические технологии в потенциале развития Росатома», 14-15 октября 2020 г. АО «ВНИИХТ», М., ООО «Винпресс», 2020. С. 32-33.

3. Степанов С.И., Бояринцев А.В., **Хтет Йе Аунг**, Чекмарев А.М., Гозиян А.В. Извлечение скандия из красных шламов и отходов мокрой магнитной сепарации титаномагнетитовых руд // Сб. научных трудов по материалам Научно-практической конференции «Минерально-сырьевая база металлов высоких технологий. Освоение, воспроизводство, использование» (Москва 3-4 декабря 2019 г.). М.: ФГБУ «ВИМС». 2020. С. 160-167.

4. **Хтет Йе Аунг**, Бояринцев А.В., Степанов С.И., Гозиян А.В. Способы интенсификации процесса карбонатного выщелачивания скандия из красного шлама // Успехи в химии и химической технологии. 2020. Т. 34. № 9. С. 37-39.

5. **Хтет Йе Аунг**, Бояринцев А.В., Степанов С.И. Выщелачивание РЗЭ из красных шламов в карбонатные и хлоридно-карбонатные растворы в условиях карбонизации // Успехи в химии и химической технологии. 2019. Т. 33. № 9. С. 25-27.

6. **Хтет Йе Аунг**, Бояринцев А.В., Степанов С.И. Выщелачивание алюминия из красных шламов водными растворами гидроксида натрия и фторида натрия // Успехи в химии и химической технологии. 2019. Т. 33. № 9. С. 46-48.

7. Бояринцев А.В., Степанов С.И., **Хтет Йе Аунг**, Маунг Маунг Аунг. Гидролитическое осаждение алюминия и скандия из щелочно-карбонатных растворов при переработке красных шламов // Сб. научных трудов Научно-практической конференции, посвященной 70-летию Института материалов современной энергетики и нанотехнологии РХТУ им. Д.И. Менделеева «Состояние и перспективы развития технологии материалов современной энергетики и наноматериалов» (г. Москва, 19 апреля 2019 г.). М.: РХТУ. 2019. С. 50.

8. Маунг Маунг Аунг, **Хтет Йе Аунг**, Бояринцев А.В., Степанов С.И. Извлечение скандия при карбонатной переработке красных шламов // Успехи в химии и химической технологии. 2018. Т. 32. № 9. С. 42-44.

9. **Хтет Йе Аунг**, Маунг Маунг Аунг, Бояринцев А.В., Степанов С.И. Безавтоклавное щелочное выщелачивание алюминия из красных шламов // Успехи в химии и химической технологии. 2018. Т. 32. № 9. С. 45-47.

По тематике, методам исследования, предложенным новым научным положениям диссертация соответствует паспорту специальности научных работников 2.6.8 – Технология редких, рассеянных и радиоактивных элементов по направлению исследования: «Способы утилизации техногенного и вторичного сырья».

Автореферат отражает основное содержание диссертации.

Диссертация **Хтет Йе Аунга** является завершенной научно-квалификационной работой, содержащей результаты, полученные на основании исследований, проведенных на высоком научном и техническом уровне с применением современных методов исследования. Научные положения, выводы и рекомендации, сформулированные автором, теоретически обоснованы и не вызывают сомнений. Представленные в работе результаты принадлежат **Хтет Йе Аунгу**; они оригинальны, достоверны и отличаются научной новизной и практической значимостью.

С учетом научной зрелости автора, актуальности, научной новизны и практической значимости работы, а также ее соответствия требованиям Положения о порядке присуждения ученых степеней в федеральном государственном бюджетном учреждении высшего образования «Российский химико-технологический университет имени Д.И. Менделеева», предъявляемым к подобным работам, диссертация на тему: «Комплексная щелочно-карбонатно-хлоридная переработка красных шламов с извлечением скандия, РЗЭ, титана, алюминия и железа» рекомендуется к защите на соискание ученой степени кандидата химических наук по специальности 2.6.8 – Технология редких, рассеянных и радиоактивных элементов.

Диссертация рассмотрена на заседании кафедры технологии редких элементов и наноматериалов на их основе, состоявшемся «01» марта 2022 года, протокол № 10.

В обсуждении приняли участие: заведующий кафедрой Степанов С.И., профессор Чижевская С.В., профессор Трошкина И.Д., доцент Бояринцев А.В., доцент Жуков А.В. старший преподаватель Шустиков А.А.

Принимало участие в голосовании 7 человек. Результаты голосования: «За» – 7 человек, «Против» – нет, воздержались – нет, протокол № 10 от «01» марта 2022 г.

Заведующий кафедрой технологии
редких элементов и наноматериалов
на их основе,
д.х.н., профессор

Степанов С.И.

Секретарь кафедры технологии
редких элементов и наноматериалов
на их основе, ведущий инженер, к.х.н.

Чибрикина Е.И.