

**УТВЕРЖДАЮ**

И.о. ректора ФГБОУ ВО «Иркутский  
национальный исследовательский  
технический университет»

В.В. Смирнов

05 \_\_\_\_\_ 2023 г.



## **ЗАКЛЮЧЕНИЕ**

### **федерального государственного бюджетного образовательного учреждения высшего образования «Иркутский национальный исследовательский технический университет»**

Диссертация Бараускас А.Э. «Переработка фторсодержащего техногенного сырья алюминиевого производства с целью получения криолита» выполнена на кафедре металлургии цветных металлов федерального государственного бюджетного образовательного учреждения высшего образования (ФГБОУ ВО) «Иркутский национальный исследовательский технический университет».

В 2016 году Бараускас Алёна Эдуардовна с отличием окончила ФГБОУ ВО «ИРНТУ» по направлению подготовки 22.03.02 Металлургия, профиль «Металлургия цветных, редких и благородных металлов» с присуждением квалификации «бакалавр» и продолжила обучение в магистратуре. В 2018 году Бараускас Алёна Эдуардовна с отличием окончила ФГБОУ ВО «Иркутский национальный исследовательский технический университет» по направлению подготовки 22.04.02 «Металлургия», программе магистратуры «Совершенствование и оптимизация технологических процессов производства цветных металлов» с присуждением квалификации «магистр».

В этом же 2018 году Бараускас А.Э. поступила на обучение в очную аспирантуру ФГБОУ ВО «Иркутский национальный исследовательский технический университет» на кафедру металлургии цветных металлов. Успешно ее окончила в 2022 году и получила диплом с присвоением квалификации «Исследователь. Преподаватель-исследователь».

Научный руководитель – Немчинова Нина Владимировна, доктор технических наук, профессор, федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования «Иркутский национальный исследовательский технический университет», заведующая кафедрой металлургии цветных металлов.

Кафедра металлургии цветных металлов:

1. Аксенов Александр Владимирович – доцент каф., к.т.н., доцент;
2. Баранов Анатолий Никитич – профессор каф., д.т.н., профессор;
3. Бельский Сергей Сергеевич – доцент каф., к.т.н., доцент;
4. Васильев Андрей Анатольевич – доцент каф., к.т.н., доцент;
5. Зайцева Анна Александровна – ассистент каф.;
6. Кузьмина Марина Юрьевна – доцент каф., к.х.н., доцент;
7. Минеева Татьяна Султановна – доцент каф., к.т.н., доцент;

8. Немчинова Нина Владимировна – заведующая кафедрой, д.т.н., профессор;
  9. Никаноров Александр Витальевич – доцент каф., к.т.н.;
  10. Петровский Алексей Анатольевич – доцент каф., к.т.н.;
  11. Тютрин Андрей Александрович – доцент каф., к.т.н., доцент.
  12. Сысоев Иван Алексеевич – доцент каф., к.т.н., доцент.
- Кафедра Х и БТ им. профессора В.В. Тутуриной:
13. Яковлева Ариадна Алексеевна – профессор каф., д.т.н., профессор.

**По итогам обсуждения принято следующее заключение:**

Представленная Бараускас Алёной Эдуардовной диссертация обобщает самостоятельные исследования автора и является завершённым научным трудом, выполненным по специальности 2.6.2. Металлургия черных, цветных и редких металлов.

***Актуальность темы диссертации***

Производство алюминия в России является передовой отраслью промышленности; единственная и крупнейшая компания «РУСАЛ» входит в число мировых лидеров по объемам получения первичного алюминия и изделий из него.

Как известно, получение алюминия заключается в электролизе криолит-глиноземного расплава, осуществляемом в электролитических ячейках (электролизерах), отличающихся видом углеродного анода: с обожженными анодами (ОА) или самообжигающимся (СА, анодом Содерберга). В результате осуществления технологического процесса неизбежно происходит образование твердых отходов – отработанной футеровки электролизеров (ОФЭ), а также мелкодисперсного фторсодержащего техногенного сырья, формируемого при получении алюминия в электролизерах с анодом Содерберга. К таким мелкофракционным отходам относятся неорганическая пыль от электрофильтров, хвосты флотации угольной пены, снимаемой с поверхности электролитных ванн, шлам, образующегося при использовании «мокрой» системы очистки газов. Предлагаемые на сегодняшний день методы по их рециклингу и утилизации не внедрены в производство в крупных масштабах, поэтому данные виды техногенного сырья вынужденно складироваться на специальных полигонах и в шламонакопителях для хранения вблизи предприятий по производству алюминия. Образующиеся пыль электрофильтров и шлам газоочистки относятся к 3-му классу опасности, хвосты флотации угольной пены и ОФЭ – к 4-му.

Современные способы переработки данных видов фторсодержащего сырья направлены на извлечение из них ценных элементов с последующим получением химических соединений ( $\text{CaF}_2$ ,  $\text{Na}_3\text{AlF}_6$ ), востребованных в процессе электролиза, или на использование отходов в других отраслях: стройиндустрии, черной металлургии (в качестве возможного восстановителя или флюса).

Соотношение компонентов (пыли электрофильтров, шлама газоочистки, хвостов флотации угольной пены) в лежалом шламе, складированном на шламовых полях, зависит от технологии ведения электролиза и оборудования, используемого в отделении по переработке отходов и газоочистных установок цехов электролиза.

Компания «РУСАЛ» активно переводит свои алюминиевые заводы на использование для очистки отходящих газов высокоэффективной «сухой» системы, основанной на способности глинозема адсорбировать фторсодержащие соединения. Однако при этом возможно возникновение дефицита вторичного криолита, получаемого в настоящее время при переработке отходящих газов по классической содобикарбонатной схеме при проведении электролиза на ваннах с СА.

На сегодняшний день отсутствуют технологии, внедренные в производство, по комплексной переработке фторсодержащих техногенных материалов, способствующие максимальному извлечению ценных элементов. За хранение техногенного сырья промышленные предприятия каждый год обязаны платить за размещение отходов.

В связи с этим разработка способов утилизации данных техногенных материалов с целью максимального извлечения фтора и получением химических соединений (например, криолита), которые возможно повторно использовать при получении первичного алюминия, является актуальной.

Актуальность работы подтверждается ее соответствием приоритетным направлениям развития науки, технологий и техники РФ и соответствуют Стратегии развития минерально-сырьевой базы Российской Федерации до 2035 года (распоряжение Правительства РФ от 22.12.2018 № 2914-р) в части создания новых технологий переработки техногенного сырья металлургических производств.

Диссертационная работа выполнена при финансовой поддержке РФФИ в рамках научного проекта № 20-38-90212 «Изучение физико-химических закономерностей процесса гидрометаллургической переработки фторуглеродсодержащего техногенного сырья алюминиевого производства методами математического моделирования».

**Целью работы соискателя** является технологии щелочной переработки фторсодержащего техногенного сырья алюминиевого производства (угольной отработанной футеровки и лежалого шлама) при воздействии ультразвуковых колебаний с переводом фтора в раствор и получением криолита, востребованного в электролизном производстве.

#### ***Основные научные результаты и их новизна***

На основе термодинамического анализа физико-химических взаимодействий компонентов лежалого шлама с раствором едкого натра установлена закономерность влияния температуры процесса на извлечение фтора в раствор при заданном исходном химическом составе твердой фазы.

Определено влияние параметров (температура, отношение твердого к жидкому в пульпе, продолжительность выщелачивания) щелочной переработки техногенного сырья (при воздействии ультразвуковых колебаний частотой  $22 \pm 1,65$  кГц) на максимальную степень перехода фтора в раствор и разработаны математические модели процесса выщелачивания.

Установлена возможность образования криолита из растворов (с концентрацией фторид-ионов не ниже  $18,0$  г/дм<sup>3</sup>) щелочной переработки техногенного сырья алюминиевого производства.

**Конкретное личное участие автора в получении результатов научных исследований, изложенных в диссертации**, заключается в формулировке цели и задач диссертации; в подготовке проб лежалого шлама и ОФЭ для аналитических исследований; организации и проведении экспериментальных исследований; проведении моделирования, математической обработки экспериментальных данных; разработке компьютерных программ; обработке и обобщении полученных результатов, а также в их апробации на конференциях различного уровня; подготовке материалов к публикации; разработке технологической схемы щелочно-ультразвуковой переработки техногенного сырья; формулировке выводов и рекомендаций для дальнейшего направления развития исследований.

**Степень достоверности исследований** полученных результатов обеспечивается необходимым объемом теоретических и экспериментальных исследований. Степень достоверности результатов исследования обусловлена их соответствием известным тен-

денциям развития алюминиевой отрасли, ранее полученным результатам и разработкам, а также доказываемая с позиции теории металлургических процессов и практики аналогичных процессов, применением высокотехнологических аналитических методов исследований и сертифицированного оборудования лабораторий ФГБОУ ВО «Иркутский национальный исследовательский технический университет».

#### ***Практическая значимость***

Предложен способ переработки лежалого шлама алюминиевого производства раствором каустической соды (с концентрацией 2,0–2,4 % NaOH) при одновременном воздействии ультразвуковых колебаний, позволяющий извлекать фтор в раствор для последующей кристаллизации криолита, востребованного в процессе электролиза (патент РФ на изобретение № 2791681).

Установлены оптимальные параметры извлечения фтора из проб лежалого шлама в раствор выщелачивания: температура процесса – 90 °С, соотношение жидкой и твердой фаз в пульпе – 9:1, продолжительность – 90 мин; максимальная степень извлечения фтора составила 86,1 % масс.

Определены оптимальные параметры извлечения фтора из ОФЭ в раствор выщелачивания при воздействии ультразвука: концентрация NaOH – 2 %, Ж:Т = 6:1, продолжительность – 90 мин.

Получен вторичный криолит из растворов щелочной переработки техногенного сырья (с содержанием фторид-иона в растворе в среднем 18,0 г/дм<sup>3</sup>), отвечающий требованиям электролитического получения алюминия (ГОСТ 10561-80).

Рекомендована принципиальная технологическая схема совместной переработки фторсодержащих техногенных материалов алюминиевого производства (угольной ОФЭ и лежалого шлама) по предложенному методу применительно к Иркутскому алюминиевому заводу.

Ожидаемое снижение ежегодной платы за размещение отходов 3 (пыль электрофильтров и шлам газоочистки) и 4 (хвосты флотации угольной пены и отработанная футеровка электролизеров) классов опасности составило 1335,5 тыс. руб. Ожидаемое снижение себестоимости продукции за счет снижения платы за хранение отходов и затрат на приобретение свежего криолита составит на годовой выпуск алюминия-сырца ~ 3300 тыс. руб.

Полученные в ходе выполнения диссертационного исследования теоретические и практические результаты, разработанные компьютерные программы для ЭВМ имеет научно-практический интерес для производителей первичного алюминия (имеется акт филиала ПАО «РУСАЛ Братск» в г. Шелехов) и используются в учебном процессе при подготовке бакалавров и магистров по направлению «Металлургия» (акт внедрения в Иркутском национальном исследовательском техническом университете).

***Соответствие диссертации паспорту специальности 2.6.2. Metallургия черных, цветных и редких металлов:*** № 1 (Рудное, нерудное, техногенное и энергетическое сырье); № 7 (Рециклинг материалов, переработка отходов производства и потребления); № 19 (Гидрометаллургические процессы и агрегаты).

***Апробация работы.*** Основные результаты диссертационной работы докладывались на XX Междунар. научно-практ. конференции «Металлургия: технологии, инновации, качество» «Металлургия-2017» (г. Новокузнецк, 15–16 ноября 2017 г.), Междунар. научной конференции, посвященной 80-летию С.С. Набойченко «Современные технологии производства цветных металлов» (г. Екатеринбург, 24–25 марта 2022 г.), Всероссийских научно-практ. конференциях с международным участием «Перспективы развития

технологии переработки углеводородных и минеральных ресурсов» (г. Иркутск, 26–27 апр. 2018 г., 20–21 апр. 2022 г.).

*Полнота изложения материалов диссертации в работах, опубликованных соискателем.* Основные результаты диссертационной работы полностью отражены в следующих научных работах автора.

*Статьи из Перечня изданий, рекомендованных ВАК РФ*

1. Немчинова, Н.В. Анализ химического состава техногенных материалов производства первичного алюминия для поиска рациональных методов их переработки / Н.В. Немчинова, А.А. Тютрин, **А.Э. Бараускас** // Цветные металлы. – 2019, № 12. – С. 22–29. (журнал индексируется международной наукометрической базой данных Scopus).

2. **Бараускас, А.Э.** Гидрометаллургическая переработка мелкодисперсного фторуглеродсодержащего техногенного сырья производства первичного алюминия / **А.Э. Бараускас**, Н.В. Немчинова // Вестник Иркутского государственного технического университета. – 2020, № 6. – С. 1311–1323.

3. Немчинова, Н.В. Переработка мелкодисперсного техногенного сырья производства алюминия с целью извлечения ценных компонентов / Н.В. Немчинова, **А.Э. Бараускас**, А.А. Тютрин, В.С. Вологин // Известия вузов. Цветная металлургия. – 2021, № 5. – С. 38–49.

Nemchinova, N.V. Processing of finely dispersed technogenic raw materials for aluminum production in order to extract valuable components / N.V. Nemchinova, **А.Э. Barauskas**, А.А. Tyutrin, V.S. Vologin // Russian Journal of Non-Ferrous Metals. – 2021, Vol. 62, Issue 6. – P. 659–667.

*Статья в рецензируемом научном издании, индексируемом в международной реферативной базе данных Scopus*

4. Nemchinova, N.V. Choosing the Reagent to Leach Fluorine From Spent Pot Lining of Aluminum Electrolysis Cells / N.V. Nemchinova, A.N. Baranov, **А.Э. Barauskas** // Materials Science Forum. – 2022, vol. 1052. – P. 488–492.

*Патент*

5. Пат. № 2791681, Российская Федерация, С22В 7/00; С01В 7/20 (2006.01). Способ извлечения фтора при переработке лежалого шлама алюминиевого производства / Н.В. Немчинова, А.А. Тютрин, **А.Э. Бараускас**; заявитель и патентообладатель ФГБОУ ВО «ИРНИТУ». № заявки 2022111415, заявл. 27.04.2022; опубл. 13.03.2023. Бюл. № 8.

*Свидетельства о регистрации программ для ЭВМ*

6. Свидетельство № 2020660658, Российская Федерация, Расчет материального баланса фтора при производстве первичного криолита / А.А. Тютрин, Н.В. Немчинова, **А.Э. Бараускас**; заявитель и патентообладатель ФГБОУ ВО «ИРНИТУ». № заявки 2020619561, заявл. 28.08.2020; опубл. 09.09.2020.

7. Свидетельство № 2021665540, Российская Федерация, Расчет материального баланса процесса электролиза криолит-глиноземных расплавов в электролизерах с самообжигающимися анодами / Н.В. Немчинова, **А.Э. Бараускас**; заявитель и патентообладатель ФГБОУ ВО «ИРНИТУ». № заявки 2021664780, заявл. 24.09.2021; опубл. 28.09.2021.

*Другие публикации*

8. Сомов, В.В. Мировые тенденции утилизации отработанной футеровки алюминиевого производства / В.В. Сомов, Н.В. Немчинова, **А.Э. Бараускас** // Переработка природного сырья: сборник научных трудов студентов, магистрантов, аспирантов и мо-

лодых ученых ИМиХТ им. С.Б. Леонова. – Иркутск: Изд-во ИРНИТУ, 2016. – С. 170–175.

9. Немчинова, Н.В. Извлечение фтора из угольной части отработанной футеровки электролизеров производства алюминия / Н.В. Немчинова, А.А. Тютрин, В.В. Сомов, **А.Э. Бараускас**, А.А. Яковлева // «Металлургия: технологии, инновации, качество» «Металлургия-2017»: материалы XX Международной научно-практической конференции (г. Новокузнецк, 15–16 ноября 2017 г.). – Новокузнецк, 2017. – Ч.1. – С. 441–446.

10. **Бараускас**, А.Э. Подбор оптимального режима работы ультразвуковой установки при выщелачивании фтора из отработанной футеровки электролизера / **А.Э. Бараускас**, Н.В. Немчинова, В.В. Сомов // Перспективы развития технологии переработки углеводородных и минеральных ресурсов: материалы VIII Всероссийской научно-практической конференции с международным участием (г. Иркутск, 26–27 апреля 2018 г.). – Иркутск, 2018. – С. 9–12.

11. Сомов, В.В. Рациональные пути переработки фторуглеродсодержащих материалов электролитического получения алюминия / В.В. Сомов, Н.В. Немчинова, **А.Э. Бараускас** // Metallurgy цветных металлов: материалы IV Международной научно-технической конференции, посвященной 100-летию со дня рождения С.И. Кузнецова (г. Екатеринбург, 30 ноября–01 декабря 2018 г.). – Екатеринбург, 2018. – С. 58–61.

12. **Бараускас**, А.Э. Разработка компьютерной программы для экспресс-расчета материального баланса фтора при производстве вторичного криолита / **А.Э. Бараускас**, Н.В. Немчинова, А.А. Тютрин, В.С. Вологин // Переработка природного и техногенного сырья: сборник научных трудов студентов, магистрантов, аспирантов и молодых ученых Института высоких технологий. – Иркутск: Изд-во ИРНИТУ, 2020. – С. 91–94.

13. **Бараускас**, А.Э. Математическое моделирование процесса выщелачивания фтора из отработанной угольной футеровки алюминиевых электролизеров / **А.Э. Бараускас**, Н.В. Немчинова, А.А. Тютрин, Т.В. Будько // Современные технологии производства цветных металлов: материалы Международной научной конференции, посвященной 80-летию С.С. Набойченко (г. Екатеринбург, 24–25 марта 2022 г.). – Екатеринбург, 2022. – С. 257–263.

14. **Бараускас**, А.Э. Кристаллизация криолита из щелочных растворов переработки лежалого шлама алюминиевого производства / **А.Э. Бараускас** // Перспективы развития технологии переработки углеводородных и минеральных ресурсов: материалы XII Всероссийской научно-практической конференции с международным участием (г. Иркутск, 20-21 апреля 2022 г.). – Иркутск, 2022. – С. 23–26.

15. **Бараускас**, А.Э. Математическое моделирование процесса щелочного выщелачивания фтора из лежалого шлама алюминиевого производства / **А.Э. Бараускас**, Ю.В. Сокольников, Н.А. Чередников // Молодежный вестник ИрГТУ. – 2022, № 4. – С. 899–908.

Диссертация представляет собой научно-квалификационную работу, которая соответствует критериям, установленным в п. 9 «Положения о порядке присуждения ученых степеней» от 24.09.2013 г., № 842.

Диссертация Бараускас Алёны Эдуардовны на тему «Переработка фторсодержащего техногенного сырья алюминиевого производства с целью получения криолита» рекомендуется к защите на соискание ученой степени кандидата технических наук по специальности 2.6.2. Metallurgy черных, цветных и редких металлов.

Заключение принято на расширенном заседании кафедры металлургии цветных металлов ФГБОУ ВО «Иркутский национальный исследовательский технический университет», протокол № 10 от 11 мая 2023 г.

Результаты голосования: «за» – 13 чел., «против» – 0 чел., «воздержалось» – 0 чел.

Председатель расширенного заседания  
кафедры металлургии цветных металлов,  
доцент кафедры металлургии цветных  
металлов, к.т.н., доцент

Т.С. Минеева

Секретарь заседания,  
доцент кафедры металлургии цветных  
металлов», к.х.н., доцент

М.Ю. Кузьмина

