«УТВЕРЖДАЮ»
Ректор РХТУ им. Д.И. Менделеева
д.х.н., профессор С.Н. Филатов

«22» 05 2026 г.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Диссертация Солодовникова Максима Александровича на тему: «Извлечение вольфрама, молибдена и тантала из полупродукта комплексной переработки рений-никелевого суперсплава» по научной специальности 2.6.8. Технология редких, рассеянных и радиоактивных элементов (химические науки) выполнена на 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 Солодовников Максим Александрович, «28» февраля 2000 года рождения, являлся аспирантом кафедры технологии редких элементов и наноматериалов на их основе федерального государственного бюджетного образовательного учреждения высшего образования «Российский химико-технологический университет имени Д.И. Менделеева». Срок обучения в аспирантуре – с 01 сентября 2023 года по настоящее время.

Справка о сдаче кандидатских экзаменов выдана в федеральном государственном бюджетном образовательном учреждении высшего образования «Российский химико-технологический университет имени Д.И. Менделеева» в 2026 году.

Научный руководитель – доктор технических наук по специальности 05.17.02. Технология редких, рассеянных и радиоактивных элементов, профессор, профессор кафедры технологии редких элементов и наноматериалов на их основе федерального государственного бюджетного образовательного учреждения

высшего образования «Российский химико-технологический университет имени Д.И. Менделеева» Трошкина Ирина Дмитриевна.

По результатам рассмотрения диссертации Солодовникова Максима Александровича на тему: «Извлечение вольфрама, молибдена и тантала из полупродукта комплексной переработки рений-никелевого суперсплава» принято следующее заключение.

Актуальность темы диссертационной работы обусловлена растущей потребностью мировой и российской промышленности в стратегически важных металлах – вольфраме, тантале, молибдене и рении. Благодаря высокой температуре плавления, коррозионной стойкости и механической прочности они незаменимы при производстве легирующих добавок к сплавам, танталовых электролитических конденсаторов, режущего инструмента и коррозионностойкого химического оборудования. Эти металлы являются ключевыми компонентами рений-никелевых суперсплавов, применяемых в авиационно-космической и энергетической отраслях для производства лопаток турбин и дисков газотурбинных двигателей в авиации, а также стационарных газовых турбин в энергетике.

Научная новизна заключается в следующем:

1. Установлено, что изменение энтальпии выщелачивания вольфрама и молибдена из окисленного W-Mo-Ta-полупродукта в интервале температур 40÷120 °C составляет −113,1 и −69,6 кДж/моль, энтропии – +109,7 и +50,3 Дж/(моль·К) при изменении энергии Гиббса −84,6 ÷ −145,8 кДж/моль, соответственно. Определено значение кажущейся энергия активации щелочного выщелачивания вольфрама и молибдена из окисленного полупродукта, составившее 26,0±1,3 и 24,5±1,2 кДж/моль, соответственно, что подтверждает лимитирование процесса химической реакцией на поверхности частиц полупродукта.

2. Выявлено повышение сорбционной ёмкости по молибдену бинарного ТВЭКСа−Д2ЭГФК+ФОР за счёт комбинированного катионообменного и сольватационного механизма извлечения молибденил-ионов из солянокислых

маточных растворов осаждения вольфрамовой кислоты. Емкость по молибдену достигает 205 мг/г, что в 1,8 раза выше, чем при применении ТВЭКС–Д2ЭГФК.

3. Получен импрегнат на основе октанола-1 с константой скорости насыщения им стиролдивинилбензольной пористой матрицы $(5,2\pm0,5)\cdot10^{-3}$ $мин^{-0.5}$. Равновесная сорбционная ёмкость при извлечении тантала из сульфатно-фторидного раствора этим импрегнатом по гидратно-сольватному механизму, подтвержденному методом ИК-спектроскопии, составила 440 мг/г.

Практическая и теоретическая значимость работы состоит в следующем:

1. Определены оптимальные условия спекания W-Mo-Ta-полупродукта с карбонатом натрия с добавками азотсодержащих окислителей и гидроксидом натрия. Рассчитаны термодинамические характеристики реакций, протекающих в процессе спекания.

2. Показана возможность сорбционного извлечения молибдена из маточного солянокислого раствора осаждения вольфрамовой кислоты с использованием ТВЭКСов, содержащих фосфорорганические экстрагенты, установлены равновесные и кинетические характеристики процесса.

3. Показана возможность экстракционного, осадительного и сорбционного извлечения тантала из сульфатно-фторидного раствора выщелачивания Ta-полупродукта комплексной переработки отходов рений-никелевого суперсплава.

4. Получен импрегнат на основе октанола-1 для сорбции тантала из плавиково-сернокислых сред, что в сравнении с жидкостной экстракцией обеспечивает пожаро-взрывобезопасность процесса. Изучена кинетика насыщения пористой матрицы экстрагентом, получена константа скорости процесса.

5. Разработана и апробирована принципиальная технологическая схема извлечения W, Ta и Mo из W-Mo-Ta-содержащего полупродукта с получением товарных продуктов.

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

Основные положения диссертации получили полное отражение в 21 печатной работе, в том числе в 4 статьях в журналах, индексируемых в международных базах данных научного цитирования.

Результаты диссертации представлены на 14 международных и всероссийских конференциях, в том числе на: XVII Конференции молодых ученых, аспирантов и студентов ИФХЭ РАН «Физикохимия - 2022» (Москва, 2022 г.); Республиканской научно-практической конференции с международным участием «Инновационные технологии переработки минерального и техногенного сырья химической, металлургической, нефтехимической отраслей и производства строительных материалов» (г. Ташкент, РУз, 2022 г.); 1, 2, 3 и 4–ой международных научно-практических конференциях «Редкие металлы и материалы на их основе: технологии, свойства и применение» (Сажинские чтения) (Москва, 2021 г., 2022 г., 2024 г., 2026 г.); XX Российской ежегодной конференции молодых научных сотрудников и аспирантов «Физико-химия и технология неорганических материалов» (Москва, 2023 г.); Международных конгрессах молодых ученых по химии и химической технологии МКХТ (Москва, 2022 г., 2024 г., 2025 г.); Международной научно-технической конференции, посвященной 90-летию со дня создания Института общей и неорганической химии Академии наук Республики Узбекистан и 80-летию со дня создания Академии наук Республики Узбекистан (Ташкент, 2023 г.); Международной научно-практической конференции «Перспективы, инновационные решения и актуальные проблемы в химической промышленности» (г. Алмалык, РУз, 2024 г.); 12-ом Международном симпозиуме по технецию и рению (Москва, 2025 г.); XVI Всероссийской конференции с международным участием, посвященной 175-летию открытия явления ионного обмена и 25-летию журнала «Сорбционные и хроматографические процессы» (Воронеж, 2025 г.); V Всероссийской конференции с международным участием «Исследования и разработки в области химии и технологии функциональных материалов», посвященной 90-летию со дня рождения академика РАН Владимира Трофимовича Калинникова (Апатиты, 2025 г.).

Публикации в изданиях, индексируемых в международных базах данных:

1. Тарганов И.Е., Солодовников М.А., Трошкина И.Д. Окислительное выщелачивание рения из шлифотходов ренийсодержащих суперсплавов // Известия вузов. Цветная металлургия. 2023. Т. 29, №5. С. 25-33. https://doi.org/10.17073/0021-3438-2023-5-25-33. (CAS).

2. Солодовников М.А., Трошкина И.Д. Извлечение вольфрама из полупродукта комплексной переработки отходов ренийсодержащих суперсплавов // Цветные металлы. 2025. № 7. С. 45–53. DOI: 10.17580/tsm.2025.07.07. (Scopus).

3. Solodovnikov M., Troshkina I. Recovery of Tantalum from a Semi-Product of the Comprehensive Processing of Waste from a Rhenium-Containing Nickel-Based Superalloy // Open Chemical Engineering Journal. 2025. Vol. 19. P. e18741231423189 31423189. DOI: 10.2174/0118741231423189 31423189. (Scopus).

4. Solodovnikov M.A., Troshkina I.D., Ivanov P.I. Recovery of tantalum from sulfate-fluoride solutions using Levextrel-resin-TBP and Levextrel-resin-TiAP // Hydrometallurgy. 2026. Vol. 243, P. 106768. DOI: 10.1016/j.hydromet.2026.106768. (Scopus).

Патент:

1. Патент № 2835950 Российская Федерация. Способ извлечения тантала импрегнатом из фторидных растворов: № 2024116518: заявл. 15 июля 2024: опубл. 06 марта 2025. Бюл. № 7 / Трошкина И.Д., Солодовников М.А.; заявитель РХТУ им. Д.И. Менделеева.

Публичные доклады на международных и российских научных мероприятиях:

1. Тарганов И.Е., Трошкина И.Д., Полькин В.Э., Солодовников М.А. Химическое растворение шлифотходов ренийсодержащих никелевых суперсплавов // 1-я Международная научно-практическая конференция «Редкие металлы и материалы на их основе», посвященная памяти академика Н.П. Сажина (РЕДМЕТ-2021): Сборник тезисов. Москва, 9–10 декабря 2021 г. М.: АО «Гиредмет» им. Н.П. Сажина, 2021. С. 147–148.

2. Солодовников М.А., Трошкина И.Д. Изучение кинетики сорбции Mo(VI) из солянокислых растворов, образующихся при переработке шлифотходов

рений-никелевого суперсплава, на различных носителях // Физикохимия-2022. 2022. С. 103–104.

3. Солодовников М.А., Трошкина И.Д. Кинетика водного выщелачивания вольфрама из спека полупродукта комплексной переработки шлифотходов рений-никелевого суперсплава // 2-я Международная научно-практическая конференция «Редкие металлы и материалы на их основе: технологии, свойства и применение», посвященная памяти академика Н.П. Сажина (РЕДМЕТ-2022): Сборник тезисов. Москва, 23–25 ноября 2022 г. М.: АО «Гиредмет» им. Н.П. Сажина, 2022. С. 82–83.

4. Тарганов И.Е., Гакиев А.Л., Солодовников М.А., Трошкина И.Д. Сорбционное извлечение никеля из растворов выщелачивания ренийсодержащих шлифотходов // Успехи в химии и химической технологии. 2022. Т. 36, № 9 (258). С. 67–68.

5. Солодовников М.А., Трошкина И.Д. Кинетика водного выщелачивания вольфрама из спека полупродукта комплексной переработки шлифотходов рений-никелевого суперсплава // Редкие металлы и материалы на их основе: технологии, свойства и применение: Сборник статей. 2023. С. 77–80.

6. Солодовников М.А., Трошкина И.Д. Исследование кинетики выщелачивания вольфрама из полупродукта переработки суперсплава на основе никеля // Актуальные проблемы создания и использования высоких технологий переработки минерально-сырьевых ресурсов Узбекистана: материалы Международной научно-технической конференции. Ташкент. 2023. С. 384–385.

7. Солодовников М.А. Кинетика водного выщелачивания молибдена из спека полупродукта комплексной переработки шлифотходов рений-никелевого суперсплава // XX Российская ежегодная конференция молодых научных сотрудников и аспирантов «Физико-химия и технология неорганических материалов». Москва, 17–20 октября 2023 г. С. 333–334.

8. Солодовников М.А., Трошкина И.Д. Извлечение тантала из полупродукта комплексной переработки рений-никелевого суперсплава // 3-я Международная научно-практическая конференция «Редкие металлы и материалы на их основе:

технологии, свойства и применение», посвященная памяти академика Н.П. Сажина (РЕДМЕТ-2024): Сборник тезисов. Москва, 3–5 апреля 2024 г. М.: АО «Гиредмет» им. Н.П. Сажина, 2024. С. 57–58.

9. Солодовников М.А., Трошкина И.Д. Сорбционное извлечение тантала из сульфатно-фторидных растворов комплексной переработки рений-никелевого суперсплава // Успехи в химии и химической технологии. 2024. Т. XXXVIII, № 10 (289). С. 45–47.

10. Солодовников М.А., Трошкина И.Д. Сорбция ионов тантала из фторидно-сульфатных растворов выщелачивания отходов рений-никелевого суперсплава // Материалы Международной научно-практической конференции «Перспективы, инновационные решения и актуальные проблемы в химической промышленности». Алмалык, 25–26 октября 2024 г. С. 33.

11. Солодовников М.А., Бардыш А.В., Трошкина И.Д. Сорбция тантала из сульфатно-фторидного раствора переработки шлифотходов рений-никелевого суперсплава // Ионообменные материалы в сорбционных, хроматографических и мембранных процессах – ИОНИТЫ-2025: Материалы XVI Всероссийской конференции с международным участием. Воронеж, 19–21 ноября 2025 г. Воронеж, 2025. С. 158–160.

12. Солодовников М.А., Трошкина И.Д. Сорбционное извлечение тантала из сульфатно-фторидных растворов выщелачивания отходов рений-никелевого суперсплава // Труды Кольского научного центра РАН. Серия: Технические науки. 2025. Т. 16, № 4. С. 142–149. DOI: 10.37614/2949-1215.2025.16.4.027.

13. Солодовников М.А., Сигитов С.Р., Трошкина И.Д. Извлечение молибдена из полупродукта комплексной переработки рений-никелевого суперсплава // Успехи в химии и химической технологии. 2025. Т. XXXIX, № 8 (292). С. 95–98.

14. Solodovnikov M.A., Borchaninova A.O., Sigitov S.R., Troshkina I.D. Kinetics of aqueous leaching of tantalum from the sintered semi-product of complex processing of rhenium-nickel superalloy waste // The 12th International Symposium on Technetium and Rhenium – Science and Utilization. Moscow, 6–7 November 2025. M.: Publishing house "Granitsa", 2025. P. 78–80.

15. Solodovnikov M.A., Sigitov S.R., Troshkina I.D. Sorption of molybdenum from hydrochloric acid solutions of rhenium-nickel superalloy waste processing // The 12th International Symposium on Technetium and Rhenium – Science and Utilization. Moscow, 6–7 November 2025. M.: Publishing house "Granitsa", 2025. P. 76–77.

16. Солодовников М.А., Трошкина И.Д. Извлечение вольфрама и молибдена из полупродукта комплексной переработки отходов рений-никелевого суперсплава // Международный конгресс по редким металлам, материалам и технологиям «РЕДМЕТ-2026»: Сборник тезисов. Москва, 20–22 мая 2026 г. М.: АО «Гиредмет» им. Н.П. Сажина, 2026. С. 231–232.

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: «Очистка и концентрирование рудных щелоков, газообразных и твердых продуктов разложения рудных концентратов и других видов сырья».

Автореферат отражает основное содержание диссертации.

Диссертация Солодовникова Максима Александровича 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 Солодовникову Максиму Александровичу; 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 образовательном учреждении высшего образования «Российский химико-технологический университет имени Д.И. Менделеева», предъявляемым к подобным работам, диссертация на тему: «Извлечение вольфрама, молибдена и

тантала из полупродукта комплексной переработки рений-никелевого суперсплава» 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 «26» мая 2026 года, протокол № 8.

В обсуждении приняли участие: заведующий кафедрой Степанов С.И., профессор Борисова Н.Е., профессор Трошкина И.Д., доцент Бояринцев А.В., доцент Сафиулина А.М, доцент Жуков А.В., заведующий лабораторией технеция Герман К.Э. (Федеральное государственное бюджетное учреждение науки Институт физической химии и электрохимии им. А.Н. Фрумкина Российской академии наук).

Принимало участие в голосовании 7 человек. Результаты голосования: «За» – 7 человек, «Против» – нет, воздержались – нет, протокол № 8 от «26» мая 2026 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 Бояринцева Е.В.