ЗАКЛЮЧЕНИЕ ДИССЕРТАЦИОННОГО СОВЕТА **24.1.045.01** НА БАЗЕ **ФГБУН ИНСТИТУТА ВЫСОКОТЕМПЕРАТУРНОЙ ЭЛЕКТРОХИМИИ УРАЛЬСКОГО ОТДЕЛЕНИЯ РАН** ПО ДИССЕРТАЦИИ НА СОИСКАНИЕ УЧЕНОЙ СТЕПЕНИ КАНДИДАТА НАУК

аттестационное дело № _____

решение диссертационного совета от **04 февраля 2026 г. № 2**

о присуждении ***Архипову Степану Павловичу***,

гражданину Российской Федерации,

ученой степени кандидата **химических** наук

Диссертация «Электрохимическое поведение урана, хрома, железа и никеля в расплаве $LiF\text{-}BeF_2$» по специальности 2.6.9. Технология электрохимических процессов и защита от коррозии принята к защите **05 ноября 2025 г., протокол № 19**, диссертационным советом 24.1.045.01, созданным на базе ФГБУН Института высокотемпературной электрохимии Уральского отделения Российской академии наук (ИВТЭ УрО РАН), 620066, г. Екатеринбург, ул. Академическая, д. 20; приказ № 105/нк от 11.04.2012.

Соискатель Архипов Степан Павлович, 15 февраля 1994 года рождения, в 2020 г. окончил ФГАОУ ВО «Уральский федеральный университет имени первого Президента России Б.Н. Ельцина»; в 2024 г. окончил аспирантуру ИВТЭ УрО РАН; работает **младшим научным сотрудником** лаборатории радиохимии ИВТЭ УрО РАН.

Диссертация выполнена в лаборатории радиохимии ИВТЭ УрО РАН.

Научный руководитель – член-корреспондент РАН, доктор химических наук, профессор ***Зайков Юрий Павлович***, научный руководитель ИВТЭ УрО РАН.

Официальные оппоненты:

Ананьев Алексей Владиленович, доктор химических наук, профессор, главный научный сотрудник Акционерного общества «Высокотехнологический научно-исследовательский институт неорганических материалов им. академика А.А. Бочвара»,

Лизин Андрей Анатольевич, кандидат химических наук, ведущий научный сотрудник отделения радиохимических технологий Акционерного общества «Государственный научный центр – Научно-исследовательский институт атомных реакторов, **дали положительные отзывы на диссертацию.**

Ведущая организация Акционерное общество «Ордена Ленина Научно-исследовательский и конструкторский институт энерготехники имени Н.А. Доллежаля» (АО НИКИЭТ), г. Москва, в своём положительном отзыве, подписанном Шутько Кириллом Игоревичем, кандидатом химических наук, начальником лаборатории химии теплоносителей и коррозии, и Наумовым Валерием Сергеевичем, кандидатом технических наук, старшим научным сотрудником той же лаборатории, указала, что диссертация С.П. Архипова посвящена решению актуальной задачи, связанной с разработкой методов контроля коррозионных процессов, протекающих во фторбериллатных расплавах с участием таких металлов, как Ni, Fe и Cr, входящих в состав основных конструкционных материалов разрабатываемого жидкосолевого ядерного реактора (ЖСР).

Соискатель имеет 35 опубликованных работ, 17 из них по теме диссертации, в том числе **6 статей** в рекомендованных ВАК рецензируемых научных изданиях, 5 публикаций в материалах конференций, **6 патентов** (вклад соискателя в каждой публикации составляет не менее 40%).

Наиболее значимые научные работы:

1. Arkhipov, S.P. Interaction between uranium trifluoride and the mixture of lithium and beryllium fluorides / S.P. Arkhipov, Yu.P. Zaikov, P.A. Arkhipov, A.R. Mullabaev // Journal of the Electrochemical Society. – 2024. – V. 171, №. 6. – P. 062504. https://doi.org/10.1149/1945-7111/ad4f1f

2. Arkhipov, S.P. Electrochemical behavior of chromium difluoride in molten lithium and beryllium fluoride mixtures / S.P. Arkhipov, Yu.P. Zaikov, P.A. Arkhipov, A.R. Mullabaev // Journal of the Electrochemical Society. – 2023. – V. 170, №. 10. – P. 102506. https://doi.org/10.1149/1945-7111/ad02c1

3. Arkhipov, S.P. Interaction between iron fluoride and molten FLiBe / S.P. Arkhipov, Yu.P. Zaikov, P.A. Arkhipov, A.R. Mullabaev // Processes. – 2022. – V. 10, №. 12. – P. 2742. https://doi.org/10.3390/pr10122742

Положительные отзывы на автореферат прислали:

1. Кандидат химических наук ***Пантелеева Виктория Вячеславовна***, доцент кафедры физической химии Пермского государственного национального исследовательского университета. Сделано замечание:

- Мало внимания уделено обсуждению механизма электродных процессов.

2. Кандидат химических наук ***Краюхин Сергей Александрович***, директор по науке Технического университета Уральской горно-металлургической компании, г. Верхняя Пышма. По автореферату и диссертации нет замечаний и вопросов.

3. Доктор химических наук ***Кушхов Хасби Билялович***, заведующий кафедрой неорганической и физической химии Кабардино-Балкарского государственного университета имени Х.М. Бербекова, г. Нальчик:

- В названии работы не упомянут свинец, хотя он изучен наряду с Fe, Ni, Cr.
- Результаты квадратно-волновой вольтамперометрии и хронопотенциометрии приведены очень кратко.
- Степень окисления железа в расплавах LiF-BeF_2 только +2?

4. Доктор химических наук ***Шубин Алексей Борисович***, главный научный сотрудник лаборатории металлургических расплавов Института металлургии имени академика Н.А. Ватолина Уральского отделения РАН, г. Екатеринбург:

- На рис.4 неправильно приведена формула нитрида бора: «NB» вместо BN.
- Точность определения ΔG (табл.2) представляется «слишком» хорошей.

5. Доктор физико-математических наук ***Хмельницкий Дмитрий Владимирович***, заместитель начальника научно-исследовательского отделения Российского федерального ядерного центра – Всероссийского научно-исследовательского института технической физики имени академика Е.И. Забабахина, г. Снежинск:

- Точность полученных термодинамических параметров, возможно, переоценена.

• Не обсуждается связь между лабораторными электрохимическими измерениями и реальными условиями эксплуатации реактора.

• Отсутствует анализ погрешностей полученных результатов.

6. Доктор технических наук ***Сабирзянов Наиль Аделевич***, заведующий лабораторией химии гетерогенных процессов Института химии твердого тела Уральского отделения РАН, г. Екатеринбург:

• Как осуществлялась подготовка металлических образцов?

• Как долго может служить диафрагма электрода сравнения из нитрида бора?

7. Кандидат химических наук ***Волкович Владимир Анатольевич,*** доцент кафедры редких металлов и наноматериалов Уральского федерального университета имени первого Президента России Б.Н. Ельцина, г. Екатеринбург:

• Как влияет отношение $LiF:BeF_2$ на величину электродных потенциалов?

• Как при измерении ОВП относительно бериллиевого динамического электрода в расплаве $LiF\text{-}BeF_2\text{-}UF_3$ учитывали образование интерметаллида и фиксировали выделение фазы именно бериллия?

• Какое отношение концентраций U(IV)/U(III) соответствует оптимальному диапазону ОВП топливной соли ЖСР?

• На стр. 14 ошибочно дана ссылка на реакцию (21), должна быть реакция (6).

8. Кандидат химических наук ***Чемезов Олег Владимирович,*** доцент кафедры цветных металлов Уральского федерального университета имени первого Президента России Б.Н. Ельцина, г. Екатеринбург:

• В выводах утверждается, что катодный процесс протекает в диффузионном режиме, но ход поляризационных кривых указывает, что он сложнее.

• Какова растворимость бериллия в исследованных расплавах?

• Корректно ли делать выводы на основании линейных зависимостей потенциалов, построенных по трем точкам в узком диапазоне температур?

Выбор официальных оппонентов и ведущей организации.

Оппоненты являются известными специалистами в области химии и технологии урана и трансурановых элементов, в том числе решения проблем жидкосолевого реактора (А.В. Ананьев); в области технологий основных

материалов современной энергетики и прикладной радиохимии (А.А. Лизин). Одно из ключевых направлений деятельности ведущей организации, АО НИКИЭТ, заключается в разработке жидкосолевых ядерных реакторов.

Диссертационный совет отмечает, что на основании выполненных соискателем исследований:

разработана оригинальная методика получения фторбериллатных солевых композиций с остаточным содержанием примесей не более 0,006 мас.% (в том числе не более 0,001 мас.% кислородсодержащих соединений), которая включает проведение реакций взаимодействия оксида бериллия с фторидом аммония либо металлического бериллия с расплавом $LiF-PbF_2$, отделение механических взвесей фильтрацией расплава и удаление кислородсодержащих соединений с помощью потенциостатического электролиза;

предложено с целью снижения коррозии конструкционных сплавов, состоящих из никеля, железа и хрома, в расплавах $LiF-BeF_2$ использовать буферную пару UF_4 / UF_3 для регулирования окислительно-восстановительного потенциала среды;

доказано экспериментально, что металлы, являющиеся компонентами конструкционных материалов или присутствующие в ионном виде в расплавах соли-теплоносителя ($0,73LiF-0,27BeF_2$) и топливной соли ($0,66LiF-0,34BeF_2$) жидкосолевого реактора, в интервале температур 650 – 750 °С располагаются в ряду напряжений в последовательности Li, Be, U, Cr, Fe, Ni, Mo, W.

Теоретическая значимость исследования:

доказано, что в расплаве $0,66LiF-0,34BeF_2$ с добавками не более 0,6 мас.% дифторидов никеля, свинца, железа или хрома металлы находятся преимущественно в виде двухзарядных ионов, а уран при введении в расплав добавки его трифторида в расплав $0,73LiF-0,27BeF_2$ – в виде U^{3+};

применительно к проблематике диссертации результативно использован комплекс современных методов исследования: рентгенофазовый анализ, атомно-эмиссионная спектроскопия с индуктивно связанной плазмой, метод восстановительного плавления, квадратно-волновая вольтамперометрия,

фиксация стационарных поляризационных кривых, хронопотенциометрия, измерение ЭДС гальванических элементов;

изложены закономерности температурных и концентрационных зависимостей равновесных потенциалов U, Cr, Fe, Pb, Ni в расплавах 0,66LiF-0,34BeF_2 и 0,73LiF-0,27BeF_2, на основании которых определены температурные зависимости условных стандартных потенциалов соответствующих металлов и рассчитаны термодинамические характеристики образования их фторидов;

раскрыта связь окислительно-восстановительного потенциала расплавов LiF-BeF_2 с присутствием в них примесных ионов Cr^{2+}, Fe^{2+}, Ni^{2+}, а также пары U^{4+}/ U^{3+} в интервале отношения мольных долей от 7 до 377;

изучены процессы катодного восстановления ионов Cr^{2+}, Fe^{2+}, Pb^{2+} в расплаве 0,66LiF-0,34BeF_2 и U^{3+} в расплаве 0,73LiF-0,27BeF_2 и установлено, что лимитирующей стадией для них является доставка электроположительного компонента из объема расплава к поверхности электрода.

Значение полученных соискателем результатов исследования для практики подтверждается тем, что:

разработана оригинальная методика определения окислительно-восстановительного потенциала фторбериллатных расплавов с использованием бериллиевого динамического электрода сравнения;

создан оригинальный капсулированный никелевый электрод сравнения с диафрагмой из самосвязанного нитрида бора, позволяющий проводить измерения равновесных и окислительно-восстановительных потенциалов в расплавах LiF-BeF_2 с точностью до ±1мВ;

определены диапазоны окислительно-восстановительного потенциала расплавов 0,66LiF-0,34BeF_2 и 0,73LiF-0,27BeF_2 (0,8 – 1,1 В относительно бериллиевого динамического электрода сравнения), при которых коррозия высоконикелевых хромсодержащих сплавов минимальна.

Оценка достоверности результатов исследования.

результаты получены с использованием сертифицированного оборудовании: рентгеновского дифрактометра Rigaku D/MAX-2200VL/PC, масс-спектрометра с индуктивно-связанной плазмой NexIon 2000 (Perkin Elmer, США),

потенциостата-гальваностата Autolab PGSTAT302N с модулем FRA32M, перчаточного бокса с контролируемой атмосферой MBraun UNIlab);

использованы современные методики обработки полученных экспериментальных данных: программа Fullprof, электронная база данных HSC, A. Roine. HSC Chemistry® [Software], Outotec, Pori 2018, программа NOVA 2.0;

установлено совпадение величин степени окисления хрома, железа и урана в расплавах 0,66LiF-0,34BeF_2 и 0,73LiF-0,27BeF_2, полученных двумя разными методами (фиксацией стационарных поляризационных кривых и измерением ЭДС гальванических элементов).

Личный вклад соискателя. Анализ литературных данных, разработка и изготовление установок для синтеза и очистки фторбериллатных расплавов, а также для потенциометрических и поляризационных измерений, планирование и проведение экспериментов, обработка и анализ полученных данных, подготовка публикаций выполнены автором лично. Постановка цели и задач, обсуждение и интерпретация результатов проведены совместно с научным руководителем.

В соответствии с паспортом специальности «**2.6.9. Технология электрохимических процессов и защита от коррозии»** работа направлена на разработку «электрохимических методов защиты» применяемых в жидкосолевых реакторах конструкционных материалов от коррозии во фторидных расплавах.

Результаты диссертации могут быть рекомендованы для применения в исследованиях коррозионной стойкости конструкционных материалов жидкосолевых реакторов предприятиям Госкорпорации «Росатом», в частности, Акционерным обществам «Научно-исследовательский и конструкторский институт энерготехники имени Н.А. Доллежаля» и «Высокотехнологический научно-исследовательский институт неорганических материалов им. академика А.А. Бочвара» (г. Москва), «Государственный научный центр – Научно-исследовательский институт атомных реакторов» (г. Димитровград), «Российский федеральный ядерный центр – Всероссийский научно-исследовательский институт технической физики им. академика Е.И. Забабахина» (г. Снежинск), а также Федеральному государственному унитарному предприятию «Горно-химический комбинат» (г. Железногорск), Институту высокотемпературной

электрохимии Уральского отделения РАН и Уральскому федеральному университету им. первого Президента России Б.Н. Ельцина (г. Екатеринбург).

В ходе защиты диссертации соискатель Архипов С.П. ответил на заданные ему вопросы, критические замечания высказаны не были.

Диссертация Архипова С.П. представляет научно-квалификационную работу, в которой решена важная для разработки жидкосолевых ядерных реакторов задача прогнозирования и контроля коррозионных процессов конструкционных материалов в расплавах $LiF\text{-}BeF_2$, перспективных для использования в качестве топливной соли и теплоносителя.

На заседании 06 февраля 2026 г. диссертационный совет принял решение: присудить Архипову С.П. ученую степень кандидата химических наук по специальности 2.6.9. Технология электрохимических процессов и защита от коррозии.

При проведении тайного **голосования** диссертационный совет в количестве **18** человек, из них **6** докторов наук по научной специальности рассматриваемой диссертации, участвовавших в заседании, из **25** человек, входящих в состав совета, проголосовали: **18** за, **0** против, **0** недействительных бюллетеней.

Заместитель председателя диссертационного совета
доктор химических наук Ткачева Ольга Юрьевна

Ученый секретарь диссертационного совета
кандидат химических наук Кулик Нина Павловна
06 февраля 2026 г.

Подписи Ткачевой О.Ю. и Кулик Н.П. заверяю

Ученый секретарь ИВТЭ УрО РАН,
кандидат химических наук Кодинцева Анна Олеговна