

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

аттестационное дело № \_\_\_\_\_

Решение диссертационного совета от 13 декабря **2023 г., № 11**  
о присуждении **Хвостову Сергею Сергеевичу**, гражданину РФ,  
ученой степени кандидата **химических** наук

Диссертация «Коррозия стали ЭП-823 в хлоридных расплавах при пирохимической переработке отработавшего ядерного топлива» по специальности «2.6.9. Технология электрохимических процессов и защита от коррозии» принята к защите **09 октября 2023 г., протокол № 6** диссертационным советом Д 24.1.045.01, созданным на базе ФГБУН Института высокотемпературной электрохимии Уральского отделения РАН (ИВТЭ УрО РАН), 620066, г. Екатеринбург, ул. Академическая, 20; приказ № 105/нк от 11.04.2012.

Соискатель Хвостов Сергей Сергеевич 27 февраля 1992 года рождения в 2015 году окончил ФГАОУ ВО «Уральский федеральный университет имени первого Президента России Б.Н. Ельцина» (УрФУ), там же окончил аспирантуру в 2019 г., работает **начальником лаборатории технологий обращения с радиоактивными отходами и коррозионных процессов** Акционерного общества «Институт реакторных материалов» (АО «ИРМ»).

**Диссертация выполнена** на предприятии Госкорпорации Росатом АО «ИРМ».

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

**Официальные оппоненты:**

**Трофимов Евгений Алексеевич**, доктор химических наук, доцент, профессор кафедры материаловедения и физико-химии материалов

ФГАОУ ВО «Южно-Уральский государственный университет (национальный исследовательский университет)»;

**Сафонов Иван Александрович**, кандидат химических наук, руководитель направления, группы подготовки научно-технических проектов Частного учреждения «Наука и инновации» Госкорпорации «Росатом»;

*дали положительные отзывы на диссертацию.*

**Ведущая организация** ФГБУН Институт металлургии Уральского отделения РАН, г. Екатеринбург, в своем положительном отзыве, утвержденном директором института академиком РАН Ремпелем Андреем Андреевичем, доктором физико-математических наук, и подписанном заместителем директора Рыльцевым Романом Евгеньевичем, доктором физико-математических наук, заведующим лабораторией физической химии, указала, что в работе решена важная научно-техническая задача – установлены закономерности коррозионного поведения стали ЭП-823 и ее основных компонентов в условиях операции «мягкого хлорирования» при пирохимической переработке смешанного нитридного уран-плутониевого отработавшего ядерного топлива (СНУП ОЯТ).

Соискатель имеет 22 опубликованные работы, 11 из них по тематике диссертационного исследования, в том числе 3 статьи в рецензируемых журналах, рекомендованных ВАК, 2 статьи в других журналах, 4 публикации в материалах конференций и 1 патент РФ.

Наиболее значимые научные работы:

1. Pastukhov, V. I. Effect of grain boundaries type on carbides precipitates in tempered martensite / V. I. Pastukhov, **S. S. Khvostov**, M. L. Lobanov // Materials Science Forum. – 2019. – Т. – 946. – С. 368-373. – DOI 10.4028/www.scientific.net/MSF.946.368. Доля авторского права 70%.

2. Голосов, О. А. Скорость коррозии стали ЭП-823 в расплавах хлоридов щелочных металлов / О. А. Голосов, **С. С. Хвостов**, С. В. Старицын А. В. Барыбин, В. И. Пастухов, Н. В. Глушкова, Ю. П. Зайков, Е.

В. Никитина, Н. А. Казаковцева // Расплавы. – 2023. – № 2. – С. 203-218. – DOI 10.31857/S0235010623020068. Доля авторского права 60%.

3. Хвостов, С. С., Возможности нейтронно-активационного анализа для исследования коррозионного поведения металлических материалов в расплавах солей/ С. С. Хвостов, О. А. Голосов, Е. В. Никитина, Э. А. Карфидов, Н. В. Глушкова, Ю. П. Зайков.// Расплавы. – 2023. № 6. – С. – 536-542. – DOI 10.31857/S0235010623060038. Доля авторского права 80%.

### **На автореферат прислали положительные отзывы:**

1. Доктор химических наук **Кузнецов С.А.**, заведующий лабораторией высокотемпературной химии и электрохимии Института химии и технологии редких и рассеянных элементов и минерального сырья Кольского научного центра РАН, г. Апатиты. Заданы вопросы и сделано замечание:

- В уравнении 1 указана энергия Гиббса для  $K_3NbCl_7$  вместо  $NbCl_2$ .
- Достаточно ли 1-2 мол.%  $PbCl_2$  для полного перевода U в солевой расплав?
- Как соотносятся массы плавов и возгонов с активностями радионуклидов?

2. Кандидат технических наук **Якорнов С.А.**, первый заместитель технического директора ОАО «Уральская горно-металлургическая компания», г. Верхняя Пышма Свердловской обл.:

- Окисление железа катионами свинца при 500 и 650°C невозможно.
- Как изменится скорость коррозии стали при наличии движения расплава?

3. Доктор химических наук **Гаркушин И.К.**, профессор кафедры общей и неорганической химии Самарского государственного технического

- Название диссертации следовало бы конкретизировать.
- Реакции  $PbCl_2$  с металлами упоминаются на с.8, а приведены на с.14.
- Нет схем гальванических элементов, возникающих при коррозии стали.

4. Кандидат химических наук **Половов И.Б.**, доцент кафедры редких металлов и наноматериалов УрФУ, г. Екатеринбург:

- Каким образом нитрид урана влияет на ход коррозии?
- При моделировании рассматриваются несуществующие соединения.
- Некорректно использовать «моль %» вместо «мол.%».

5. Кандидат химических наук **Наумов В.С.**, старший научный сотрудник лаборатории химии теплоносителей и коррозии АО «Ордена Ленина Научно-исследовательский и конструкторский институт энерготехники им. Н.А. Доллежала», г.Москва:

- Не обоснован выбор конструкционного материала.
- Не указана область применения стали класса ЭП-823 при переработке ОЯТ.

6. Доктор физико-математических наук **Сидоров В.Е.**, директор Научно-образовательного центра «Расплав» Уральского государственного педагогического университета и кандидат физико-математических наук **Русанов Б.А.**, старший научный сотрудник этого центра, г. Екатеринбург:

- Как оксидировали сталь?
- Для чего проводили оксидирование?

7. Кандидат химических наук **Петров В.Г.**, доцент химического факультета Московского государственного университета им. М.В. Ломоносова:

- Какие режимы переработки ОЯТ рекомендованы?
- Каким было время нейтронной активации образцов в реакторе?
- Какое ПО использовали для термодинамических расчетов?

Кандидат химических наук **Чемезов О.В.**, доцент кафедры металлургии цветных металлов УрФУ (г. Екатеринбург) прислал положительный отзыв на диссертацию с вопросами и замечаниями:

- Изменялась ли скорость коррозии в ходе ваших коротких испытаний?
- Образец соли на рис. 1.9 имеет округлые формы, это не монокристалл.
- Неверно оценивать среднюю скорость коррозии при наличии нескольких ее видов (равномерной, очаговой, межкристаллитной, вздутия и т.д.).
- Могут ли спектры излучения металлов накладываться друг на друга?
- Откуда в стали после облучения появляется изотоп  $^{60}\text{Co}$ ?
- Кварцевые держатели образцов реагируют с металлом или расплавом?
- Объяснение природы узелковых вздутий не конкретно.

## **Обоснование выбора официальных оппонентов и ведущей организации.**

Оппоненты являются признанными специалистами в области физической химии и термодинамики металлургических процессов, а также коррозии металлических материалов (Е.А. Трофимов), коррозии сталей и сплавов и радиационного материаловедения (И.А. Сафонов).

Ведущая организация Институт металлургии УрО РАН известна научному сообществу своими исследованиями структуры и физико-химических свойств (в том числе термической стабильности) конструкционных материалов и сплавов.

### **Диссертационный совет отмечает, что на основании выполненных соискателем исследований**

*разработана методика изучения коррозии стали ЭП-823 в условиях, близких к реальным технологическим условиям пирохимической переработки СНУП ОЯТ, которая включает термодинамическое моделирование взаимодействия компонентов конструкционного материала с расплавами солей, экспериментальное определение коррозионных характеристик оксидированной и неоксидированной стали в расплавах LiCl-KCl-PbCl<sub>2</sub> при наличии и отсутствии контакта с модельным ураннитридным топливом;*

*предложен модифицированный метод нейтронно-активационного анализа для определения характеристик коррозии стали, заключающийся во введении в исследуемые образцы набора радиоактивных меток компонентов материала, что позволяет фиксировать их переход в солевой расплав и газовую фазу в условиях неконтролируемого изменения массы образцов при выделении свинца на корродирующей поверхности;*

*доказано влияние контакта с модельным ураннитридным топливом, а также наличия оксидной пленки на поверхности на коррозионное поведение стали ЭП-823 в расплавах LiCl-KCl-PbCl<sub>2</sub> при варьировании температуры и состава электролита.*

### **Теоретическая значимость исследования:**

*доказано*, что коррозия стали ЭП-823 в расплаве  $2\text{KCl}-3\text{LiCl}$  при температуре  $500^\circ\text{C}$  носит равномерный характер при глубине проникновения в металл не более  $0,3$  мкм за 24 часа, а при  $650^\circ\text{C}$  глубина равномерной коррозии достигает  $2,0$  мкм и наряду с ней появляется межкристаллитная коррозия с проникновением в металл по границам зерен на глубину  $\approx 4$  мкм;

*применительно к проблематике диссертации результативно* использован комплекс современных методов исследования: термодинамическое моделирование, гравиметрия, металлография, рентгенофазовый анализ, оптическая и сканирующая электронная микроскопия, микрозондовый рентгеноспектральный анализ, модифицированный метод нейтронно-активационного анализа.

*изложены* доказательства ускорения коррозии стали ЭП-823 при добавлении в электролит 1-2 мол.% хлорида свинца, приводящего в интервале температур от  $650$  до  $750^\circ\text{C}$  к селективному растворению хрома и железа в солевом расплаве и появлению в газовой фазе летучих соединений, содержащих эти металлы;

*изучены* защитные свойства оксидной пленки толщиной  $10-15$  мкм, образующейся на поверхности стали при контакте с окислительной атмосферой и состоящей из магнетита  $\text{Fe}_3\text{O}_4$  и железо-хромистой шпинели  $\text{Cr}_2\text{FeO}_4$ ;

*раскрыты* причины изменения скорости коррозии исследуемой стали в расплавах  $\text{LiCl}-\text{KCl}-\text{PbCl}_2$  под влиянием модельного ураннитридного топлива, контакт с которым может вызывать образование металлического свинца на поверхности образцов.

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

*разработан* на основе полученных данных и запатентован способ переработки тепловыделяющих элементов.

**Оценка достоверности результатов исследования выявила:**

*результаты получены* на сертифицированном оборудовании, с проведением необходимой калибровки измерительных приборов отделения радиационного материаловедения АО «ИРМ», что обеспечило высокую точность, объективность, хорошую воспроизводимость и согласованность полученных данных;

*установлено* количественное совпадение результатов, полученных с помощью гравиметрических измерений и нейтронно-активационного анализа.

*Личный вклад соискателя* заключается в участии в постановке задач исследования, планировании и проведении экспериментальных работ, обработке результатов измерений и подготовке публикаций.

Работа соответствует следующим направлениям **паспорта специальности «2.6.9. Технология электрохимических процессов и защита от коррозии»** «теоретические основы коррозии» стали ЭП-823 в солевых расплавах (п. 1), изучение «структуры и защитных свойств» этого материала (п. 5), использования метода нейтронно-радиационного анализа «для исследований и мониторинга коррозионных процессов» (п.6).

Результаты работы могут быть рекомендованы для использования специалистам, работающим в области замыкания ядерного топливного цикла и переработки ОЯТ (АО «Прорыв», г. Москва; АО «Сибирский химический комбинат», г. Северск Томской обл.; АО «Институт реакторных материалов, г. Заречный Свердловской обл.), а также сотрудникам образовательных и научно-исследовательских организаций (ИБТЭ УрО РАН, УрФУ, г. Екатеринбург; Кабардино-Балкарского государственного университета, г. Нальчик).

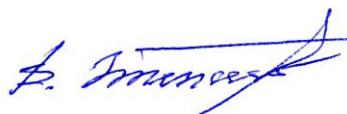
В ходе защиты диссертации соискатель ответил на заданные вопросы; критических замечаний не было высказано.

На заседании 13 декабря 2023 г. диссертационный совет постановил: за решение научной задачи, важной для развития технологии электрохимических процессов и защиты от коррозии – установление

закономерностей коррозии стали ЭП-823, материала оболочки тепловыделяющих элементов, при пререработке отработавшего ядерного топлива в расплавах на основе  $\text{LiCl-KCl-PbCl}_2$  – присудить Хвостову С.С. ученую степень кандидата химических наук.

При проведении тайного голосования диссертационный совет в количестве 18 человек, из них 7 докторов наук по специальности рассматриваемой диссертации, участвовавших в заседании, из 27 человек, входящих в состав совета, проголосовали: «за» – 15, «против» – 2, недействительных бюллетеней – 1.

Заместитель председателя совета  
доктор химических наук



Степанов Виктор Петрович

Ученый секретарь совета  
кандидат химических наук



Кулик Нина Павловна

15.12.2023

Подписи Степанова В.П. и Кулик Н.П. заверяю  
Ученый секретарь ЦВТЭ УрО РАН к.х.н.



А.О.Кодинцева