

ЗАКЛЮЧЕНИЕ ДИССЕРТАЦИОННОГО СОВЕТА 99.1.056.03,
СОЗДАННОГО НА БАЗЕ ИНСТИТУТА ФИЗИЧЕСКОЙ ХИМИИ И ЭЛЕКТРОХИМИИ им.
А.Н. ФРУМКИНА РОССИЙСКОЙ АКАДЕМИИ НАУК, АКЦИОНЕРНОГО ОБЩЕСТВА
«ВЫСОКОТЕХНОЛОГИЧЕСКИЙ НАУЧНО-ИССЛЕДОВАТЕЛЬСКИЙ ИНСТИТУТ
НЕОРГАНИЧЕСКИХ МАТЕРИАЛОВ ИМЕНИ АКАДЕМИКА А.А. БОЧВАРА»
ГОСУДАРСТВЕННОЙ КОРПОРАЦИИ ПО АТОМНОЙ ЭНЕРГИИ «РОСАТОМ»,
ФЕДЕРАЛЬНОГО ГОСУДАРСТВЕННОГО УНИТАРНОГО ПРЕДПРИЯТИЯ
«ОБЪЕДИНЕННЫЙ ЭКОЛОГО-ТЕХНОЛОГИЧЕСКИЙ И НАУЧНО-
ИССЛЕДОВАТЕЛЬСКИЙ ЦЕНТР ПО ОБЕЗВРЕЖИВАНИЮ РАО И ОХРАНЕ
ОКРУЖАЮЩЕЙ СРЕДЫ» ГОСУДАРСТВЕННОЙ КОРПОРАЦИИ ПО АТОМНОЙ
ЭНЕРГИИ «РОСАТОМ», ПО ДИССЕРТАЦИИ НА СОИСКАНИЕ УЧЕНОЙ СТЕПЕНИ
КАНДИДАТА НАУК

аттестационное дело

№ _____
решение диссертационного совета
от «24» декабря 2024 года № 3/2024

О присуждении Аникину Александру Сергеевичу, гражданину Российской Федерации, ученой степени кандидата технических наук.

Диссертация «Определение диффузионных характеристик трития в конструкционных и функциональных материалах реакторных установок различных типов» по специальности 2.6.8. Технология редких, рассеянных и радиоактивных элементов (технические науки) принята к защите 16 октября 2024 года (протокол № 2/2024) диссертационным советом 99.1.056.03, созданным на базе Федерального государственного бюджетного учреждения науки Института физической химии и электрохимии им. А.Н. Фрумкина Российской академии наук, акционерного общества «Высокотехнологический научно-исследовательский институт неорганических материалов имени академика А.А. Бочвара» Государственной корпорации по атомной энергии «Росатом», Федерального государственного унитарного предприятия «Объединенный эколого-технологический и научно-исследовательский центр по обезвреживанию РАО и охране окружающей среды Государственной корпорации по атомной энергии «Росатом», (123098, Москва, улица Рогова, 5а, приказ о создании диссертационного совета от «02» ноября 2012 года №714/нк).

Соискатель Аникин Александр Сергеевич, 10 сентября 1990 года рождения, в 2013 году окончил с отличием Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования «Российский химико-технологический университет имени Д.И. Менделеева» Министерства науки и высшего образования Российской Федерации по специальности «Химическая технология материалов современной энергетики», квалификация – Инженер. С 2014 по 2018 годы проходил обучение в очной аспирантуре Федерального государственного бюджетного образовательного учреждения высшего образования «Российский химико-технологический университет имени Д.И. Менделеева» Министерства науки и высшего образования Российской Федерации по направлению подготовки 18.06.01 «Химическая технология», с присвоением квалификации – Исследователь. Преподаватель-исследователь.

Работает в должности заместителя директора отделения - начальника научно-исследовательского отдела разработки технологии и оборудования для получения изотопов и изотопной продукции Акционерного общества «Высокотехнологический научно-исследовательский институт неорганических материалов имени академика А.А. Бочвара» Государственной корпорации по атомной энергии «Росатом».

Диссертация выполнена в отделе разработки технологии и оборудования для получе-

ния изотопов и изотопной продукции отделения разработки технологии и оборудования специальных неядерных материалов и изотопной продукции Акционерного общества «Высокотехнологический научно-исследовательский институт неорганических материалов имени академика А.А. Бочвара» Государственной корпорации по атомной энергии «Росатом».

Научный руководитель – Семенов Александр Александрович, кандидат химических наук, главный эксперт отделения разработки технологии и оборудования специальных неядерных материалов и изотопной продукции Акционерного общества «Высокотехнологический научно-исследовательский институт неорганических материалов имени академика А.А. Бочвара» Государственной корпорации по атомной энергии «Росатом».

Официальные оппоненты:

– Лаптев Анатолий Борисович, доктор технических наук, доцент, главный научный сотрудник лаборатории «Климатические, микробиологические исследования и пожаробезопасность материалов» Федерального государственного унитарного предприятия «Всероссийский научно-исследовательский институт авиационных материалов» Национального исследовательского центра «Курчатовский институт» (НИЦ «Курчатовский институт»–ВИАМ);

– Лившиц Александр Иосифович, доктор физико-математических наук, профессор кафедры физики Федерального государственного бюджетного образовательного учреждения высшего образования «Санкт-Петербургский государственный университет телекоммуникаций им. проф. М.А. Бонч-Бруевича» (СПбГУТ) Министерства цифрового развития, связи и массовых коммуникаций Российской Федерации;

дали **положительные** отзывы на диссертацию.

Ведущая организация – Федеральное государственное бюджетное учреждение науки Федеральный исследовательский центр «Карельский научный центр Российской академии наук» (г. Петрозаводск) в своем **положительном** отзыве, подписанном Ольгой Николаевной, доктором биологических наук, член-корреспондентом РАН, и.о. Генерального директора, указала, что диссертация Аникина А.С. выполнена на актуальную тему, является законченной научно-исследовательской работой, выполненной на достаточно высоком научном уровне, в которой решена актуальная научно-практическая задача получения данных для моделирования поведения трития и обеспечения безопасных условий при эксплуатации реакторных установок. Диссертационное исследование, выполненное автором, представляет собой самостоятельную работу, содержащую новые научные результаты и имеющую существенное теоретическое и практическое значение. Сформулированные автором выводы аргументированы и обоснованы. Публикации по теме диссертации и автореферат соответствуют ее содержанию и основным положениям. Диссертация соответствует требованиям пунктов 9-14 «Положения о присуждении ученых степеней», утвержденного постановлением Правительства Российской Федерации от 24 сентября 2013 г. № 842 с изм. «О порядке присуждения ученых степеней», предъявляемым к диссертациям на соискание ученой степени кандидата наук, а ее автор, Аникин Александр Сергеевич, заслуживает присуждения ученой степени кандидата технических наук по специальности 2.6.8 - «Технология редких, рассеянных и радиоактивных элементов» (технические науки). Отзыв обсужден и одобрен на заседании Ученого совета Института прикладных математических исследований - обособленного подразделения ФГБУН Федерального исследовательского центра «Карельский научный центр Российской академии наук», (ИПМИ КарНЦ РАН) протокол № 10 от 26.11.2024 г. Также отзыв рассмотрен и одобрен на заседании Ученого совета ФГБУН Федеральный исследовательский центр «Карельский научный центр Российской академии наук» (КарНЦ РАН), протокол № 10 от 26.11.2024 г.

Соискатель имеет 42 опубликованных работы, в том числе по теме диссертации опубликовано 17 работ, из них в рецензируемых научных изданиях опубликовано 5 работ. Общий объем публикаций составляет 121 страницу. **В диссертации отсутствуют недостоверные сведения об опубликованных работах.** 5 работ опубликовано с соавторами. Личный

вклад в работы, опубликованные в соавторстве, составляет более 50 % и заключается в постановке целей и задач, обосновании результатов экспериментов, изложении научных положений и выводов, разработке методик проведения экспериментов, конструкторской и технологической документации на образцы для исследования, испытательное оборудование и отдельные узлы установок, а также непосредственное проведение испытаний и обработка результатов экспериментальных исследований по определению диффузионных характеристик трития в кандидатных конструкционных и функциональных материалах реакторных установок. Результаты диссертационной работы представлены и обсуждены на 10 международных и всероссийских научных конференциях; монографий и депонированных рукописей соискатель не имеет.

Научные работы по теме диссертации:

1) Лесина, И. Г. Радиоломинография – высокоинформативный метод исследования тритийсодержащих материалов / И. Г. Лесина, А. А. Семенов, **А. С. Аникин** [и др.] // Вопросы атомной науки и техники. Серия: Материаловедение и новые материалы. 2019 г., Выпуск 4 (100). С. 81-90 (**№ 702 Перечня ВАК от «09» декабря 2019 года**).

2) Семенов, А. А. Аппроксимация процесса натекания водорода при его диффузии через металлические мембраны / А. А. Семенов, **А. С. Аникин**, А. В. Лизунов [и др.] // Вопросы атомной науки и техники. Серия: Материаловедение и новые материалы. – 2021. – №. 4 (110). – С. 23-35 (**№ 767 Перечня ВАК от «08» декабря 2021 года**).

3) Аникин, А. С. Исследование диффузии трития в расплавах жидкосолевого реактора / **А. С. Аникин**, А. А. Семенов, А. В. Лизунов [и др.] // Вопросы атомной науки и техники. Серия: Материаловедение и новые материалы. – 2022. – №. 5 (116). – С. 81-92 (**№ 802 Перечня ВАК от «01» ноября 2022 года**).

4) Семенов, А. А. Тритий в расплаве жидко-солевого реактора с различной изотопной чистотой лития-7 / А. А. Семенов, **А. С. Аникин**, А. В. Лизунов [и др.] // Вопросы атомной науки и техники. Серия: Материаловедение и новые материалы. – 2022. – №. 4. – С. 66-82 (**№ 800 Перечня ВАК от «21» октября 2022 года**).

5) Anikin, A. S. Determining the Characteristics of the Tritium Diffusion in the Structural Material of the Liquid-Salt Reactor / **A. S. Anikin**, A. A. Semenov, A. V. Lizunov [et al.] // Atomic Energy, 2023, 133(5-6), p. 279–287 (**Web of Science, Scopus**).

[5]Аникин, А. С. Определение диффузионных характеристик трития в конструкционном материале жидкосолевого реактора / **А. С. Аникин**, А. А. Семенов, А. В. Лизунов [и др.] // Атомная энергия. – 2022. – Т. 133. – №. 5-6. – С. 265-271 (**Web of Science, Scopus**).

На диссертацию и автореферат поступило 13 отзывов, все **положительные**. В отзывах указывается, что представленная к защите диссертационная работа характеризуется высокой актуальностью, научной ценностью и имеет большое значение для обеспечения безопасных условий эксплуатации реакторных установок.

Отзывы направили:

Юхимчук Аркадий Аркадиевич, доктор технических наук, заместитель начальника НИО-19 по НИР Федерального государственного унитарного предприятия «Российский федеральный ядерный центр - Всероссийский научно-исследовательский институт экспериментальной физики» (ФГУП «РФЯЦ-ВНИИЭФ») Государственной корпорации по атомной энергии «Росатом»;

Кинёв Евгений Александрович, кандидат технических наук, ведущий научный сотрудник Акционерного общества «Институт реакторных материалов» (АО «ИРМ») Государственной корпорации по атомной энергии «Росатом»;

Колецкий Виктор Олегович, инженер-технолог 2 категории Федерального государственного унитарного предприятия «Производственное объединение «Маяк (ФГУП «ПО «Маяк») Государственной корпорации по атомной энергии «Росатом»;

Луцки Игорь Олегович, главный специалист (по техническому развитию) ОИТПЭ энергоблока «БРЕСТ-ОД-300» ОДЭК Акционерного общества «Сибирский химический комбинат» (АО «СХК») Государственной корпорации по атомной энергии «Росатом»;

Кириченко Алексей Николаевич, кандидат химических наук, старший научный сотрудник Лаборатории физики плазмы Отделения теоретической физики, вычислительной математики и перспективных разработок Акционерного общества «Государственный научный центр Российской Федерации Троицкий институт инновационных и термоядерных исследований» (АО «ГНЦ РФ ТРИНИТИ») Государственной корпорации по атомной энергии «Росатом»;

Ерискин Александр Александрович, кандидат технических наук, научный сотрудник Лаборатории физики плотной плазмы Отделения физики твердого тела Федерального государственного бюджетного учреждения науки Физического института им. П.Н. Лебедева Российской академии наук (ФИАН);

Кабанов Дмитрий Игоревич, кандидат биологических наук, научный сотрудник лаборатории Радиационной безопасности персонала Федерального государственного бюджетного учреждения «Государственный научный центр Федеральный медицинский биофизический центр им. А.И. Бурназяна (ФГБУ ГНЦ ФМБЦ им. А.И. Бурназяна) ФМБА России»;

Зиганшин Александр Гусманович, кандидат технических наук, начальник центральной научно-исследовательской лаборатории Акционерного общества «Чепецкий механический завод» (АО «ЧМЗ») Государственной корпорации по атомной энергии «Росатом»;

Спицин Александр Викторович, кандидат физико-математических наук, начальник отдела прикладных плазменных технологий Курчатовского комплекса ядерных транспортных энергетических технологий Федерального государственного бюджетного учреждения «Национальный исследовательский центр Курчатовский институт» (НИЦ «Курчатовский институт»);

Егоров Николай Борисович, кандидат химических наук, доцент отделения ядерно-топливного цикла Инженерной школы ядерных технологий Федерального государственного автономного образовательного учреждения высшего образования «Национальный исследовательский Томский политехнический университет» (ФГАОУ ВО НИ ТПУ) Министерства науки и высшего образования Российской Федерации;

Хачересов Григорий Артемович, кандидат технических наук, старший научный сотрудник отдела физики защиты и радиационной безопасности Акционерного общества «Ордена Ленина Научно-исследовательский и конструкторский институт энерготехники имени Н.А. Доллежала» (АО «НИКИЭТ») Государственной корпорации по атомной энергии «Росатом»;

Коновалов Павел Игоревич, кандидат технических наук, и.о. заместителя директора - заместителя главного конструктора - руководителя НПЦ СЭВП Федерального государственного унитарного предприятия «Всероссийский научно-исследовательский институт автоматики имени Н.Л. Духова» (ФГУП «ВНИИА») Государственной корпорации по атомной энергии «Росатом»;

Ананьев Сергей Станиславович, кандидат физико-математических наук, ведущий инженер Акционерного общества «Государственный научный центр Российской Федерации Троицкий институт инновационных и термоядерных исследований» (АО «ГНЦ РФ ТРИНИТИ») Государственной корпорации по атомной энергии «Росатом».

В отзывах были сделаны следующие замечания (далее страницы указаны по автореферату):

– В тексте автореферата присутствуют некоторые опечатки и неточности. Так, например, в разделе «Объект и предмет исследования» (страница 2) написано «Предмет исследования являются...», следует писать «Предметом исследования являются...». В разделе «Соответствие паспорту специальности» написано: «Диссертация соответствует пункту 8 паспорта специальности научной специальности 2.6.8 - ...». По-види-

тому, первое слово «специальности» является лишним. В разделе «Личный вклад автора» написано «..., а также непосредственное проведение испытаний и обработка...», следует писать «..., а также непосредственном проведении испытаний и обработке...»;

– В названии рисунков 5 и 6 необходимо писать в единственном числе: «... логарифма эффективного коэффициента...», как в названии рисунков 7 и 8;

– Автор упоминает о том, что созданы установки «РЕКА», «БВИ» и ЖСР-2020», при этом отсутствует какая-либо информация о технических характеристиках указанных установок;

– В разделе «Теоретическая и практическая значимость работы» указано, что разработаны методики определения диффузионных характеристик трития в конструкционных и функциональных материалах реакторных установок, при этом, не указано имеют ли данные методики метрологическую аттестацию и какие метрологические параметры;

– Для большей информативности на рисунках 1 и 2 (страница 5) следовало бы указать геометрические размеры исследуемых образцов;

– На рисунке 8 (страница 11) в названии образцов присутствуют аббревиатуры «ММ» и «РЛГ», но нет нигде их расшифровки, по-видимому это «Мембранный Метод» и «РадиоЛюминоГрафия»;

– Не указано при каких параметрах проводилось насыщение образцов тритием и до каких концентраций;

– Не указано почему для проведения экспериментов мембранным методом в одном случае используются плоские образцы, а в другом цилиндрические.

– Из текста автореферата не понятно, в чем суть модели с постоянным источником и бесконечным стоком, которая применяется для определения эффективных коэффициентов диффузии трития методом радиолюминографии.

– На рисунке 4 автореферата показана радиолюминограмма образца никеля марки НП2, который насыщен тритием насквозь. Существует ли возможность определять диффузионные характеристики трития в случае, когда затруднительно получить профиль распределения трития по глубине?

– Исследование поведения трития в расплаве свинцового теплоносителя реакторной установки БРЕСТ-ОД-300 проведено, а результаты определения диффузионных характеристик не представлены.

– В тексте автореферата допущены некоторые грамматические и стилистические ошибки.

– По тексту автореферата не представлено обоснование выбранных температур для проведения исследований и экспериментов со сталью ХН80МТЮ в аспекте реальных режимов эксплуатации РУ ИЖСР. В качестве такого обоснования целесообразно было бы отметить, что температурные диапазоны для проведения исследований приняты в соответствии с характерными температурными режимами режимов нормальной эксплуатации (и/или режимов с нарушениями нормальной эксплуатации) РУ ИЖСР.

– В главе 4 представлено описание применения эмпирической модели для расчета диффузионных характеристик трития, прошедшего через расплав свинцового теплоносителя РУ БРЕСТ-ОД-300, однако, по тексту автореферата не представлено достаточное описание условий проведенного эксперимента и характеристик установки, на которой проводился данный эксперимент, а именно: не указана температура свинца, не указана температура и давление трития, подводимого под слой мембраны ЭП823-Ш, не указана толщина мембраны ЭП823-Ш. В работе также следует отметить, что в качестве свинцового теплоносителя РУ БРЕСТ-ОД-300 используется свинец, изготовленный по специальным ТУ «Свинец реакторной чистоты».

– Возникает ощущение, что диссертантом несколько занижены диапазоны ошибок определения коэффициентов диффузии, которые он обозначает на рис. 6, 7 и 8.

Поэтому излом на графике 7 может быть всего лишь артефактом математической обработки, а весь массив данных зависимости логарифма коэффициента диффузии трития в никеле от обратной температуры на этом графике опишется единым линейным уравнением, полностью соответствуя литературным данным.

– На стр. 14-15 в главе «Применение эмпирической модели для расчета диффузионных характеристик трития, прошедшего через расплав свинца» автореферата приведено слишком мало информации, поэтому, в частности, непонятно, как именно диссертант находил коэффициенты A , B , N в уравнении потока трития и определял время запаздывания.

– При верификации методики мембранных испытаний с использованием никеля НП2 в качестве образца сравнения (глава 4, стр. 8-10 автореферата) диссертантом получены величины коэффициентов диффузии хотя и близкие к литературным, но имеющие явное функциональное несоответствие по характеру зависимости логарифма коэффициента диффузии трития от обратной температуры (получена линия с изломом вместо одной прямой линии). Вместе с тем, аналогичное исследование диффузии трития в никеле НП2 в том же температурном диапазоне методом радиолюминографии диссертантом проведено не было, хотя оно могло бы подтвердить или опровергнуть наличие излома на зависимости логарифма коэффициента диффузии от обратной температуры.

– Алгоритм поиска параметров эмпирической математической модели, предложенный диссертантом для аппроксимации процесса диффузии водорода (стр. 13 автореферата), вообще говоря, применим лишь для обработки интегральных зависимостей, то есть для описания роста давления водорода в приемной емкости от времени. Последовательное нахождение параметров A , B и N возможно только для уравнения (5), но не для дифференциального выражения (6) - зависимости от времени величины потока водорода. Алгоритма непосредственного поиска параметров A , B и N для дифференциального выражения (6) в главе «Применение эмпирической модели для расчета диффузионных характеристик трития, прошедшего через расплав свинца» на стр. 14 диссертант не приводит.

– На стр. 4 автореферата в абзаце про «Личный вклад автора» можно было бы продолжить склонять предложение следующим образом: «...заключается в ..., а также в непосредственном проведении испытаний и обработке результатов...».

– На стр. 5 автореферата в конце первого абзаца написано «Глава завершается выводами, которые ... ставят задачи для решения поставленной цели.». Решить можно задачи, а не цели, поэтому лучше было бы написать «...ставят задачи для решения и осуществления (или достижения) поставленной цели».

– На стр. 7 автореферата в последнем абзаце сказано, что «Никель должен иметь значения коэффициентов диффузии трития на порядок выше, чем сталь 316 L, что и наблюдали экспериментально...», хотя в таблице, представленной там же, максимальная разница не порядок (10 раз), а всего лишь ~ 4 раза.

– В записи некоторых коэффициентов и чисел в формулах используется позиционная система счисления с различными основаниями, в виде свернутой формы записи числа, очевидно это опечатка.

– Из материалов автореферата неясно, какова степень достоверности результатов и подтверждена ли технической степенью надежности результатов (коэффициент Стьюдента). Непонятно, из какого количества значений были получены средние значения величин в экспериментах, графические результаты которых представлены в автореферате.

– На с. 9 рис. 6 указана зависимость логарифма эффективных коэффициентов диффузии трития от обратной температуры в сравнении с литературными данными. Автор диссертации делает вывод, что представленные на рисунке экспериментальные показатели и показатели из литературных данных имеют близкие значения. Однако в

автореферате не подтверждена близость этих значений (не указаны значения средне-квадратичного отклонения, коэффициента сходимости и т.д.).

– Из представленных в автореферате данных неясно, были ли предложены какие-либо рекомендации для разработки систем газоочистки от трития и обеспечения безопасности при использовании исследуемых конструкционных и функциональных материалов.

– На рис. 3 показаны фотографии, которые не отражают процесс выплавки соли FLiBe, а лишь демонстрируют некоторые этапы этого процесса.

– На рис. 12 показаны кривые, которые обозначены: форма НТО, форма НТ. Эти сокращения не расшифрованы в автореферате.

– На странице 2 тезис о возможности прогнозирования поведения трития в РУ может оспариваться (например, из-за проведения экспериментов со «стоячим», а не циркулирующим свинцом в условиях эксплуатации РУ). Следовательно, в разных условиях возможно другое соотношение форм трития (НТ и НТО).

– На рисунке 6 не описаны причины расхождения экспериментальных и литературных коэффициентов диффузии при низких температурах.

– Из текста на страницах 14 и 15 неясно, учитывалась ли при анализе диффузия трития из свинца в стенки емкости, а также подводился ли баланс поступившего в свинец и измеренного (вышедшего из свинца) трития. Это также может изменить соотношение форм трития и уточнить полученные результаты.

– Из текста автореферата не понятно, образцы с какой минимальной толщиной могут использоваться при проведении исследований диффузионных характеристик трития методом радиолюминографии?

Выбор официальных оппонентов и ведущей организации обосновывается тем, что они являются признанными специалистами в области исследования взаимодействия изотопов водорода с конструкционными и функциональными материалами, что подтверждается наличием большого числа публикаций в ведущих научных рецензируемых изданиях, а также спецификой и профилем диссертационной работы, и выполнен в соответствии с пп. 22 и 24 «Положения о присуждении научных степеней» «Положения о присуждении ученых степеней», утвержденного Постановлением Правительства Российской Федерации от 24 сентября 2013 № 842 (в действующей редакции).

Диссертационный совет отмечает, что на основании выполненных соискателем исследований: разработаны методики определения диффузионных характеристик трития мембранным и радиолюминографическим методами. **Определены** эффективные коэффициенты диффузии, проницаемости и растворимости трития в конструкционном материале марки ХН80МТЮ, которые верифицированы путем сравнительного анализа результатов, полученных для никеля марки НР2 и стали 316 L, с литературными данными. **Разработана** эмпирическая модель для расчёта зависимости потока изотопов водорода, прошедших через мембрану, от времени, позволяющая выражать процесс диффузии водорода как в интегральном, так и в дифференциальном виде. **Разработана** методика и **определены** диффузионные характеристики трития в расплавах солей фторидов лития и бериллия, предназначенных для использования в ИЖСР.

Теоретическая значимость исследования обоснована тем, что:
получены и интерпретированы экспериментальные данные, которые позволяют прогнозировать поведение трития в реакторных установках на быстрых нейтронах с жидкометаллическим теплоносителем и в реакторных установках с жидкосольевым ядерным реактором;

разработана эмпирическая математическая модель для расчёта потока водорода, прошедшего через мембрану, позволяющая выражать процесс диффузии изотопов водорода как в интегральном, так и в дифференциальном виде.

Значение полученных соискателем результатов исследования для практики

подтверждается тем, что: разработаны методики определения диффузионных характеристик трития в конструкционных и функциональных материалах реакторных установок различными способами, обладающие взаимной согласованностью результатов, и позволяющие проводить исследования скорости диффузии трития в реальных объектах, изготовленных без изменений технологических процессов. **Результаты работ использованы при разработке проекта и обоснования радиационной безопасности** при эксплуатации реакторных установок на быстрых нейтронах со свинцовым теплоносителем БРЕСТ-ОД-300, БР-1200 и исследовательской реакторной установки с жидкосольевым ядерным реактором ИЖСР, создаваемых в рамках федерального проекта «Разработка новых материалов и технологий для перспективных энергетических систем».

Оценка достоверности результатов исследования выявила:

достоверность полученных результатов обеспечивается применением поверенных средств измерений, используемых для контроля параметров проведения экспериментов, калибровки измерительной аппаратуры с помощью стандартных методик и образцов, контролем сходимости и воспроизводимости результатов измерений, сравнением экспериментальных данных с теоретическими данными;

достоверность полученных расчётных соотношений подтверждается применением основных положений теории диффузии, известных методов статистической обработки данных и сравнением с результатами, описанными в литературных источниках;

рабочая гипотеза исследования построена на известных проверяемых данных, фактах, в т.ч. для предельных случаев, согласуется с опубликованными экспериментальными данными по теме диссертации или по смежным отраслям;

выводы диссертации обоснованы и не вызывают сомнения и согласуются с современными представлениями о закономерностях диффузионной проницаемости изотопов водорода.

Личный вклад соискателя заключается в постановке целей и задач работы, обосновании результатов экспериментов, изложении научных положений теории диффузии изотопов водорода в различных материалах и выводов по результатам испытаний, разработке методик проведения экспериментов по определению эффективных коэффициентов диффузии, проницаемости и эффективной растворимости трития, конструкторской и технологической документации на образцы для исследования, испытательное оборудование и отдельные узлы установок, а также непосредственное проведение испытаний и обработка результатов экспериментальных исследований по определению диффузионных характеристик трития в кандидатных конструкционных и функциональных материалах реакторных установок.

В ходе защиты были заданы **следующие вопросы и критические замечания:**

1. Какие эксперименты проводились с использованием трития и насколько достоверна верификация данных, полученных на тритии, с пересчетом на тритий с помощью изотопного коэффициента? Почему представленные температурные зависимости эффективных коэффициентов диффузии не построены в координатах Аррениуса? Не оценивали энергию активации диффузионного процесса?
2. Каким образом создавалось стандартное содержание трития для использования в исследованиях методом радиолюминографии?
3. Почему мембранным методом не проводили исследования диффузионных характеристик с использованием трития?
4. Почему, согласно расчетам, скорость наработки трития из изотопов лития-6 и лития-7 при эксплуатации реактора ИЖСР одинаковая? Есть ли смысл в реакторе использовать расплав соли с высокой концентрацией лития-7? Проводилось ли исследование влияния состава соли смесей фторидов лития и бериллия на диффузионные характеристики трития?

5. Существуют ли требования к изготовлению мембран для проведения исследований? Какой физический смысл несут коэффициенты А и В в уравнении расчета давления водорода на выходе из мембраны от времени?
6. Уравнение для расчета потока водорода, прошедшего через мембрану, от времени является эмпирическим? В чем физический смысл параметра N в данном уравнении? Применима ли разработанная модель для расчета потока водорода, прошедшего через мембрану, для материалов, которые не испытывались в рамках работы?
7. Где осуществлялось изготовление мембран для проведения исследований? Проводилось ли измерение размера пор для данных материалов? Определялось ли исследование влияния размера пор на диффузионные характеристики?
8. Почему для верификации методик использовались данные по коэффициентам диффузии для зарубежных стальных сплавов? Что означает энергия активации в температурных зависимостях диффузионных характеристик трития?
9. С какой целью осуществлялась разработка модели, если результаты, полученные двумя методами одинаковые? Как выбирается метод для проведения исследований диффузионных характеристик трития?
10. Точно ли в анализируемом температурном диапазоне для никеля марки НП2 наблюдаются две температурные зависимости?

Соискатель Аникин А.С. ответил на заданные ему в ходе защиты диссертации вопросы и привел собственную аргументацию:

На первый вопрос соискатель ответил, что все эксперименты методом радиолюминографии проводились с использованием трития. Все эксперименты мембранным методом проводились с использованием протия, с последующим пересчетом на тритий. Полученные двумя методами температурные зависимости эффективных коэффициентов диффузии для сплава марки ХН80МТЮ совпали друг с другом, что подтверждает возможность использования изотопного коэффициента для пересчета диффузионных характеристик от одного изотопа водорода на другой. В работе представлены зависимости эффективных коэффициентов диффузии в координатах Аррениуса, т.е. натуральный и десятичный логарифм коэффициента диффузии от обратной температуры. Энергия активации диффузионного процесса для никеля марки НП2 находится в пределах 50-60 кДж/моль, а для сплава марки ХН80МТЮ составляет примерно $49,0 \pm 1,0$ кДж/моль.

По второму вопросу соискатель пояснил, что в качестве стандартного образца трития используется исходный тритий с сертифицированным количеством и активностью изотопа, с помощью которого осуществляется изготовление и измерение параметров тритийсодержащих газовых смесей изотопов водорода. Приготовление и контроль качества газовых смесей осуществляется на радиометрической установке по разработанной и аттестованной методике. Приготовленные газовые смеси хранятся в специальных сорбционных аппаратах хранения.

На третий вопрос соискатель ответил, что отраслевым стандартом ОСТ 95 10447 предусмотрено проведение испытаний мембранным методом с использованием изотопов водорода с изотопной и химической чистотой не менее 98 ат. %. При проведении исследований с использованием трития будет образовываться большое количество высокоактивных тритийсодержащих отходов, которые потребуют дополнительных мероприятий по их утилизации.

По четвертому вопросу соискатель пояснил, что в работе представлен расчет для лития природного изотопного состава, в котором лития-6 около 7,5 ат. %. При таких условиях вклад в наработку трития от нейтронных реакций с изотопами лития примерно одинаковый. В основном реакции с литием-7 происходят в быстром спектре нейтронов, а реакции с литием-6 происходят с медленными нейтронами. Соответственно, наличие быстрых нейтронов в энергетическом спектре реактора приведет к

взаимодействию с литием-7 с образованием трития, но даже небольшое содержание изотопа литий-6 приведёт к существенному повышению скорости наработки трития в реакторе.

Исследование диффузионных характеристик трития проводилось с использованием расплава смесей фторидов лития и бериллия, произведенных в АО «ВНИИНМ». Известно, что на значения диффузионных характеристик трития влияют не только содержание основных компонентов, но и примесный состав. При выполнении работы была создана методика и определены диффузионные характеристики трития для солей фторидов лития и бериллия двух составов, без определения влияния концентраций компонентов.

На пятый вопрос соискатель ответил, что требования к мембранам изложены в отраслевом стандарте ОСТ 95 10447, основные положения которого учтены при разработке методик и изготовлению образцов для проведения исследований диффузионных характеристик изотопов водорода мембранным методом. С математической точки зрения коэффициенты А и В входят в уравнение прямой, а отношение коэффициентов В/А численно равно времени запаздывания.

На шестой вопрос соискатель пояснил, что разработанная математическая модель имеет эмпирический характер и используется для аппроксимации экспериментальных данных с минимальной суммой квадратов ошибок по МНК. Предложенная модель прошла верификацию для негидридообразующих материалов, в которых изотопы водорода находятся в виде твердого раствора. Возможность применение данной модели для материалов, образующих гидридную фазу, в рамках данной работы не проверялось.

По седьмому вопросу соискатель пояснил, что материал и некоторые мембраны для проведения исследований были изготовлены в организациях, которые являются владельцами технологий обращения с данными сплавами. Сама технология изготовления мембран, по мере возможности, является аналогичной технологии изготовления изделий атомной отрасли. В рамках представленной работы не проводились исследования влияния пористости на диффузионные характеристики трития.

На восьмой вопрос соискатель ответил, что объём публикаций с данными о скорости диффузии трития в зарубежных сплавах превышает количество публикаций по материалам отечественного производства. Энергия активации – это наблюдаемая энергия, необходимая для протекания диффузионного процесса, а именно перехода изотопов водорода из одного вакантного положения в другое.

На девятый вопрос соискатель ответил, что разработанные методики необходимы для определения физических параметров материалов по отношению к изотопам водорода, которые используются при моделировании поведения трития. Методом радиолюминографии определяются эффективные коэффициенты диффузии именно трития, при этом, эффективный коэффициент проницаемости и эффективная растворимость можно определить только мембранным методом.

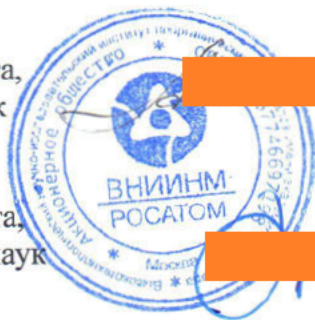
По десятому вопросу соискатель пояснил, что получены исчерпывающие данные, которые свидетельствуют о наличии в анализируемом диапазоне двух температурных зависимостей для никеля марки НП2.

На заседании 24 декабря 2024 года диссертационный совет за решение научной задачи по развитию и совершенствованию научных подходов к определению эффективных коэффициентов диффузии, проницаемости и растворимости трития в конструкционных и функциональных материалах реакторных установок на быстрых нейтронах с жидкометаллическим теплоносителем и в реакторных установках с жидкосолевым ядерным реактором, имеющей значение для развития атомной отрасли, принял решение присудить Аникину Александру Сергеевичу ученую степень кандидата технических наук.

Диссертация соответствует требованиям пп. 9-14 «Положения о присуждении ученых степеней», утвержденного Постановлением Правительства Российской Федерации от «24» сентября 2013 года № 842 (в действующей редакции). По своему содержанию диссертация отвечает паспорту специальности 2.6.8. Технология редких, рассеянных и радиоактивных элементов по направлениям исследования: 8 «...использование опыта эксплуатации типичных для данной отрасли промышленности процессов (сорбция, экстракция, плазменные, пламенные процессы и т.п.) для создания малоотходных, ресурсосберегающих технологических схем других отраслей промышленности». Результаты выполненной диссертационной работы могут быть рекомендованы для изучения и внедрения организациями и предприятиями, где ведутся исследования и разработки в области проектирования реакторных установок, моделирования поведения изотопов водорода, включая тритий, создания систем улавливания и утилизации радиоактивных веществ и для решения задач обеспечения радиационной безопасности эксплуатации объектов атомной отрасли.

При проведении тайного голосования диссертационный совет в количестве 13 человек, из них 12 докторов наук по научной специальности 2.6.8. Технология редких, рассеянных и радиоактивных элементов, участвовавших в заседании, из 18 человек, входящих в состав совета, проголосовали: за – 13 (тринадцать), против – нет, недействительных бюллетеней – нет.

Председатель
диссертационного совета,
доктор химических наук



Алексей Владиленович Ананьев

Ученый секретарь
диссертационного совета,
кандидат технических наук

Ирина Геннадьевна Лесина

«24» декабря 2024 года