



МИНОБРНАУКИ РОССИИ
ФЕДЕРАЛЬНОЕ ГОСУДАРСТВЕННОЕ БЮДЖЕТНОЕ УЧРЕЖДЕНИЕ НАУКИ
ФЕДЕРАЛЬНЫЙ ИССЛЕДОВАТЕЛЬСКИЙ ЦЕНТР
«КАРЕЛЬСКИЙ НАУЧНЫЙ ЦЕНТР РОССИЙСКОЙ АКАДЕМИИ НАУК»
(КарНЦ РАН)

ул. Пушкинская, 11, г. Петрозаводск, 185910
тел. (8142) 76-97-10, 76-60-40, факс 76-96-00 E-mail: krcras@krc.karelia.ru
ОКПО 02700018, ОГРН 1021000531133 ИНН/КПП 1001041594/100101001

УТВЕРЖДАЮ

И.о. Генерального директора
Федерального государственного
бюджетного учреждения науки
Федеральный исследовательский
центр «Карельский научный центр
Российской академии наук»
член-корреспондент РАН
доктор биологических наук



О.Н. Бахмет

« 11 » ноября 2024 г.

ОТЗЫВ ВЕДУЩЕЙ ОРГАНИЗАЦИИ

на диссертационную работу Аникина Александра Сергеевича
«Определение диффузионных характеристик трития в конструкционных и
функциональных материалах реакторных установок различных типов», представленную
на соискание ученой степени кандидата технических наук по специальности 2.6.8 –
«Технология редких, рассеянных и радиоактивных элементов» (технические науки)

1. Актуальность темы диссертационного исследования

Развитие атомной энергетики и замыкание ядерного топливного цикла являются актуальными задачами промышленности и науки, как прикладной, так и фундаментальной. При эксплуатации атомных реакторов возможны неконтролируемые выбросы газообразных радиоактивных веществ, в том числе трития. Особенно высоки локальные концентрации трития в точках выбросов, что приводит к повышению дозовой нагрузки на персонал. Тритий обладает высокой диффузионной способностью, особенно при повышенной температуре, поэтому его сложно локализовать и утилизировать как при эксплуатации реакторных установок, так и при переработке отработавшего ядерного топлива. Кроме того, для создания новых реакторных установок необходимо разрабатывать уникальные газоочистные системы, для которых требуются диффузионные

характеристики трития. В этом контексте тематика диссертационного исследования Аникина А.С. является актуальной и значимой для науки и атомной отрасли в целом.

2. Структура и содержание работы

Диссертационная работа Аникина А.С. характеризуется продуманной последовательностью изложения, хорошо структурирована, ее содержание адекватно отражает цель и задачи исследования. Кратко по структуре изложения.

Диссертация состоит из введения, 5 глав, заключения, библиографического списка (124 наименований) и приложения. Во введении дается обоснование актуальности исследования, излагается степень разработанности темы, сформулированы цель, задачи, объект и предмет исследования, соответствие паспорту специальности, научная новизна, теоретическая и практическая значимость, сведения о внедрении результатов, методы исследования, положения, выносимые на защиту, степень достоверности результатов, личный вклад автора, апробация результатов и публикации по теме работы.

В первой главе на основе анализа зарубежных и отечественных научных источников представлены подходы к пониманию научной проблемы при эксплуатации тритийсодержащих реакторных установок различных типов. Особое внимание уделено рассмотрению способов взаимодействия изотопов водорода с материалами и механизмам диффузии изотопов водорода в конструкционных материалах. Проанализирован ряд способов контроля распределения трития в металлах и методы оценки его диффузионных характеристик. На основе критического анализа методических подходов к определению диффузионных характеристик трития, автором аргументировано использование разработанных оригинальных методик их оценки.

В разделе «Оборудование, материалы и методы исследований» описана методика оценки эффективного коэффициента диффузии трития методом радиолуминографии. Этот инновационный метод основан на получении и анализе распределения трития по глубине анализируемых материалов. Автором подробно описаны исследуемые материалы и используемое оборудование. Представлен также мембранный метод, применяемый для валидации и повышения степени достоверности результатов работы: Исследование функциональных материалов реакторных установок осуществляется с применением мембранного метода, где анализируемый расплав размещается над мембраной из высокопроницаемого для трития материала. При проведении исследований используются материалы, выпускаемые промышленными предприятиями атомной энергетики.

Раздел 3 посвящен комплексным испытаниям с оценкой влияния различных факторов на оценку диффузионных характеристик трития в реакторных сталях методом радиолуминографии. Рост температуры, давления и продолжительности насыщения приводят к увеличению суммарной концентрации трития в образцах. Для

прогнозирования поведения трития в образцах из сплава марки ХН80МТЮ автором получена температурная зависимость эффективного коэффициента диффузии в соответствии с законом Аррениуса. Верификация методики радиолюминографии проведена с использованием образцов из никеля марки НП2 и аустенитной стали 316 L.

В разделе «Исследование конструкционных материалов мембранным методом» приведены результаты определения эффективных коэффициентов диффузии, проницаемости и растворимости трития в реакторном сплаве марки ХН80МТЮ. Проведен сравнительный анализ скорости диффузии трития в данном материале и в никеле марки НП2. Обоснована эмпирическая модель для аппроксимации данных проникновения водорода через металлические мембраны. Эта модель обеспечивает математическую обработку зашумленных данных диффузионных экспериментов. Модель была апробирована при проведении исследований диффузии трития в расплаве свинцового теплоносителя реакторной установки БРЕСТ-ОД-300.

Заключительный раздел посвящен результатам исследования диффузии трития в расплавах солей реактора ИЖСР. Исследования проведены для расплавов фторидов лития и бериллия двух составов, которые предназначены для использования в качестве несущей соли для топливных добавок и для теплоносителя в первом контуре охлаждения реактора. Для данных расплавов были определены температурные зависимости эффективных коэффициентов диффузии и растворимости трития.

Диссертация и автореферат Аникина А.С. оформлены в соответствии с требованиями стандартов. Автореферат отражает содержание диссертационной работы.

3. Степень обоснованности научных положений, выводов и рекомендаций

Основные научные положения, выводы и рекомендации соответствуют задачам исследования, базируются на положениях теории взаимодействия изотопов водорода с конструкционными материалами, а также на содержательном анализе широкого спектра научных трудов по выбранной проблематике.

Разработанные автором методические подходы и эмпирическая модель оценки диффузионных характеристик трития подтверждены значительным объемом экспериментальных данных. Результаты исследований различными методами согласуются. Для каждого метода проведена верификация результатов с применением образцов сравнения.

4. Достоверность и новизна научных положений и выводов

Научная новизна диссертационной работы Аникина А.С. заключается в решении важной прикладной задачи по определению диффузионных характеристик трития в материалах перспективных реакторных установок.

Основные научные результаты состоят в следующем.

1. Определены значения эффективных коэффициентов диффузии, проницаемости и эффективная растворимость трития для сплава марки ХН80МТЮ на основе никеля при температурных условиях эксплуатации жидкосолевого реактора.

2. Подтверждена возможность использования метода радиолюминографии для определения эффективных коэффициентов диффузии трития в твердофазных материалах.

3. Предложена модель для обработки данных по переносу трития в конструкционных и функциональных материалах, которая расширяет возможности мембранного метода и позволяет эффективно сглаживать зашумленные экспериментальные зависимости.

4. Определены диффузионные характеристики трития в расплавах фторидов лития и бериллия, предназначенных для использования в исследовательском жидкосолевом реакторе.

Достоверность полученных результатов и рекомендаций подтверждается их апробацией на международных и всероссийских научно-практических конференциях, публикацией научных статей в рецензируемых журналах, рекомендованных ВАК РФ. Конкретика отражена в автореферате.

5. Значимость для науки и практики

Диссертационная работа вносит значительный вклад в развитие инструментальных методов оценки диффузионных характеристик трития для моделирования его поведения в реакторных установках на быстрых нейтронах с жидкометаллическим теплоносителем и в установках с жидкосолевым ядерным реактором.

Практическая значимость заключается в разработке и внедрении методик определения диффузионных характеристик трития в конструкционных и функциональных материалах реакторных установок, позволяющих проводить исследования переноса трития в реальных объектах, изготовленных без изменений технологических процессов.

Теоретическая значимость заключается в разработке эффективной эмпирической математической модели для расчёта потока водорода, прошедшего через мембрану, позволяющая аппроксимировать процесс переноса в аналитическом виде.

Результаты работы 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 жидкосолевым ядерным реактором ИЖСР, создаваемых в рамках федерального проекта «Разработка новых материалов и технологий для перспективных энергетических систем». Кроме того, материалы диссертации могут быть использованы в

научно-производственной практике таких предприятий как ФГУП «ПО «Маяк», ФГУП «ВНИИА им. Н.Л. Духова» и ФГУП «РФЯЦ-ВНИИЭФ».

6. Соответствие паспорту специальности

Диссертация соответствует пункту 8 паспорта научной специальности 2.6.8 – «Технология редких, рассеянных и радиоактивных элементов», отрасль науки – технические науки и требованиям, установленным «Положением о присуждении ученых степеней» (утв. Постановлением Правительства РФ от 24 сентября 2013 г. № 842, с изм.).

7. Вопросы и замечания по диссертационной работе

Отмечая достаточно высокий научный уровень и в целом положительно оценивая проведенное Аникиным А.С. диссертационное исследование, считаем необходимым сформулировать некоторые замечания и предложения.

1. Различия в оценках, даже по порядку величины, коэффициента диффузии (D) часто появляются вследствие не только недостаточного учета различий экспериментальных методик и их реализаций, но и по причине неявного использования различных граничных условий для уравнения диффузии. Например, для стороны, обращенной в вакуум, можно поставить условие равенства нулю приповерхностной концентрации, а можно написать уравнение материального баланса (диффузионный приток из объема уносится квадратичной молекулярной десорбцией). Обработка одних и тех же экспериментальных данных даст различные значения D . Похоже, что подразумевается первый вариант при описании и использовании мембранного метода. Уточнения подобного рода необходимы. К тому же, при обработке данных по двухслойным мембранам (расплав-металл) не указывается, какие условия сопряжения приняты на стыке слоев (равенство концентраций не подойдет, видимо, «сшиваются» потоки диффузанта). В подобных ситуациях приходится мыслить «по умолчанию».

2. Диссертант обсуждает возможность двухканальной диффузии (дополнительно по границам зерен), но затем, при обработке результатов измерений, не учитывает ее и акцентировано не обосновывает, почему другие возможные каналы переноса вносят незначительный вклад для конкретных материалов и в конкретных условиях.

3. Эмпирическая модель для расчёта (сглаживания, формула (4.6) на стр. 118 и (5) в автореферате на стр. 13) потока изотопов водорода, прошедшего через мембрану, предложенная автором, имеет неопределенность вида $0/0$ при соответствующем некотором значении времени. Это может привести к непредсказуемой потере точности расчета (и даже смене знака дроби вне ее физического содержания). Утверждение на стр. 118, что «... это не мешает ее использования для моделирования», носит скорее успокоительный характер, чем доказательный.

4. На стр. 119 приводится сравнение эмпирической формулы и «прямого численного дифференцирования». Конкретные численные методы дифференцирования имеют свои названия, преимущества и недостатки. «Прямой» пока не является широко известным в специальной математической литературе. Не хватает конкретики. Теперь в порядке рекомендации: сначала следовало бы сгладить (по 3-5-7 точкам), а потом уже дифференцировать и сравнивать. «Катастрофичность прямого дифференцирования» наглядно показана на рис. 4.21.

Кроме указанных замечаний следует отметить наличие в тексте диссертации несущественных редакционных неточностей. Например, автор часто вещественный натуральный логарифм обозначает как $\text{Ln}(x)$, $\text{LN}(x)$, хотя общепринято $\ln(x)$.

Однако высказанные замечания не снижают теоретическую и практическую значимость диссертации, они не затрагивают основные результаты работы и защищаемые положения. Они могут быть использованы автором при проведении дальнейших научных исследований с целью развития данной проблематики.

8. Заключение о соответствии диссертации и автореферата критериям, установленным Положением о присуждении ученых степеней

Диссертация Аникина Александра Сергеевича «Определение диффузионных характеристик трития в конструкционных и функциональных материалах реакторных установок различных типов» 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.

Область исследования соответствует пункту 8 паспорта научной специальности 2.6.8 – «Технология редких, рассеянных и радиоактивных элементов», отрасль науки – технические науки.

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» ноября 2024 г.


Отзыв рассмотрен и одобрен на заседании Ученого совета ФГБУН Федеральный исследовательский центр «Карельский научный центр Российской академии наук» (КарНЦ РАН), протокол № 10 от 26 ноября 2024 г.

Отзыв подготовили:

Заика Юрий Васильевич, доктор физико-математических наук по специальности 05.13.18 – «Математическое моделирование, численные методы и комплексы программ», директор ИПМИ КарНЦ РАН. Адрес электронной почты: zaika@krc.karelia.ru

 Ю.В. Заика

Председатель Ученого Совета КарНЦ РАН
Член-корр. РАН, д.б.н.


О.Н. Бахмет

Собственноручные подписи

Ю.В. Заики и О.Н. Бахмет удостоверяю.

Ученый секретарь КарНЦ РАН

27 ноября 2024 г.


Н.Н. Фокина



Федеральное государственное бюджетное учреждение науки Федеральный исследовательский центр «Карельский научный центр Российской академии наук» (КарНЦ РАН). Почтовый адрес: 185910 Республика Карелия, г. Петрозаводск, ул. Пушкинская д. 11. Телефон: (8142) 76-60-40

Сайт: <http://www.krc.karelia.ru/> Электронная почта: krcras@krc.karelia.ru