

## ОТЗЫВ

официального оппонента на диссертационную работу

Аникина Александра Сергеевича на тему

«Определение диффузионных характеристик трития в конструкционных и функциональных материалах реакторных установок различных типов»,  
представленную к защите на соискание ученой степени кандидата  
технических наук по специальности 2.6.8 – Технология редких, рассеянных и  
радиоактивных элементов (технические науки) в диссертационный совет  
99.1.056.03 на базе АО «ВНИИНМ», ФГУП «РАДОН», ФГБУ ИФХЭ РАН

### **1 Актуальность темы диссертационного исследования.**

Развитие атомной энергетики и замыкание ядерного топливного цикла остаются важными задачами отечественной и глобальной экономики и приобретают новую актуальность в контексте зелёной повестки. В процессе эксплуатации атомных реакторов происходит выброс газообразных радиоактивных веществ, среди которых присутствует тритий. Тритий увеличивает радиационную нагрузку как на персонал реакторных установок, так и на окружающую среду. Газообразный тритий, подобно обычному водороду, обладает высокой способностью диффундировать через оболочки из разных материалов, что затрудняет его локализацию и иммобилизацию в процессе работы реакторов и при переработке отработавшего ядерного топлива. Соответственно, необходимо совершенствовать и создавать новые системы защиты и газоочистки как для действующих реакторных установок, так и, в особенности, для разрабатываемых реакторов и технологических процессов. Для этого необходимы данные о взаимодействии трития с конструкционными материалами реакторных установок и, в первую очередь, данные о скорости диффузии трития в этих материалах. В особенности это относится к определению диффузионных характеристик трития в кандидатных конструкционных и функциональных материалах

Вход. № 26/16118  
03.12.2024

перспективных реакторных установок. Именно этому актуальному научному вопросу посвящена диссертация Аникина А.С.

## **2 Общая характеристика содержания диссертации**

Диссертация состоит из введения, пяти глав, заключения, списка литературы и содержит 147 страниц машинописного текста, 71 рисунок и 33 таблицы.

*Во введении* автором обосновывается актуальность темы исследования, раскрывается степень её разработанности, формулируются цель и задачи исследования. Здесь же формулируются положения о научной новизне, теоретической и практической значимости работы, сообщаются сведения о внедрении результатов и методах исследования. Перечисляются основные положения, выносимые на защиту, обосновывается степень достоверности результатов, описывается личный вклад автора в материалы, представленные в диссертации.

*В первой главе* дан литературный обзор, в котором весьма подробно рассматриваются как общие представления о механизмах диффузии в конденсированных средах, так и, конкретно, междуузельная диффузия лёгких примесей в металлах и сплавах, включая диффузию атомов изотопов водорода. Рассматриваются методы определения коэффициента диффузии водорода в металлах и сплавах, включая радиолюминографию и мембранный метод, используемые в диссертационной работе.

*Во второй главе* представлено описание используемых оборудования, материалов, лабораторных установок, а также методик для определения эффективных коэффициентов диффузии трития.

Основной акцент сделан на *радиолюминографическом* методе, который становится эффективным физическим инструментом для исследования водорода в конденсированных средах. Ценность этого метода для данной работы заключается, прежде всего, в том, что это он предоставляет результаты *прямых* экспериментов с тритием и, тем самым позволяет определять характеристики переноса трития в металлах и сплавах без каких-

либо дополнительных, не всегда бесспорных допущений об особенностях кинетики и термодинамики систем металл-тритий по сравнению с системами металл-протий.

В данной главе представлены также аппаратное оформление и методическое обоснование *мембранного* метода, стандартно применяемого для исследования таких характеристик переноса водорода в металлах как коэффициент диффузии, константа проницаемости, константа растворимости.

*В третьей главе* приведены результаты лабораторных исследований процесса диффузии трития методом радиолюминографии. Верификация методики была произведена на образцах хорошо изученных материалов - никеля НП2 и аустенитной стали 316 L. Распределение атомов трития, абсорбированных в образцах из исследуемого сплава марки ХН80МТЮ, наблюдалось в зависимости от температуры, давления и времени экспозиции. Найдено, что определяющее значение для глубины проникновения трития в сплав ХН80МТЮ имеет температура. Анализ экспериментальных данных позволил определить целевую характеристику взаимодействия трития с исследуемым сплавом – коэффициент диффузии абсорбированных в сплаве атомов трития в зависимости от температуры.

*В четвертой главе* представлены результаты определения характеристик переноса водорода в реакторном сплаве ХН80МТЮ мембранным методом. В данном случае эксперименты проводятся с протием, а характеристики переноса растворённых в сплаве атомов трития находятся из полученных данных в предположении, что частота перескоков между равновесными позициями для атомов трития ниже, чем для атомов протия в корень из отношения атомных масс. Верификация экспериментальной методики проводится путём определения с её помощью хорошо известных характеристик диффузии водорода в никеле. Автор разработал и теоретически обосновал эмпирическую модель для аппроксимации данных о проникновении водорода через металлические мембраны. Найденные с

применением этой модели диффузионные характеристики трития в сплаве ХН80МТЮ сравниваются с результатами, полученными радиолюминографическим методом, и демонстрируют хорошую корреляцию.

*В пятой главе* даны результаты исследований скорости диффузии трития в *расплавах фторидов лития и бериллия*. Исследования проводились мембранным методом. Верификация методики проведена на никеле марки НП2. В расплавах фторидов лития и бериллия двух составов определены коэффициенты диффузии трития, значения и температурная зависимость которых оказались существенно разными, несмотря на близость составов двух солей. Найдены также константы проницаемости и эффективная растворимость трития расплавах фторидов лития и бериллия.

В заключении подведены итоги исследования, изложены основные теоретические и практические выводы.

### **3. Научная новизна.**

В диссертационной работе

- впервые определены значения эффективных коэффициентов диффузии, проницаемости и эффективная растворимость трития для сплава марки ХН80МТЮ на основе никеля при температурных условиях эксплуатации жидкосолевого реактора;

- подтверждена возможность использования метода радиолюминографии для определения эффективных коэффициентов диффузии трития в твердофазных материалах, с сохранением технологии изготовления изделий;

- предложена модель для обработки данных по диффузии трития в конструкционных и функциональных материалах, которая расширяет возможности мембранного метода и позволяет повысить точность аппроксимации экспериментальных результатов;

- впервые определены диффузионные характеристики трития в расплавах фторидов лития и бериллия, предназначенных для использования в исследовательском жидкосолевом реакторе.

**4. Практическая значимость диссертационной работы** заключается в следующем:

- разработана люминографическая методика для определения диффузионных характеристик трития в конструкционных и функциональных материалах реакторных установок, позволяющая проводить исследования скорости диффузии трития в реальных объектах, изготовленных без изменений технологических процессов;

- получены экспериментальные данные, которые позволяют прогнозировать поведение трития в реакторных установках на быстрых нейтронах с жидкометаллическим теплоносителем и в реакторных установках с жидкосолевым ядерным реактором;

Результаты работы используются 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.

**5 Степень обоснованности научных положений, выводов и рекомендаций, сформулированных в диссертации**

Достоверность и обоснованность полученных в диссертационной работе результатов подтверждается использованием современных экспериментальных методик, верифицированных на образцах хорошо изученных материалов. Характеристики переноса трития в исследованных конструкционных и функциональных материалах получены путём анализа экспериментальных данных с применением основных положений теории диффузии и использованием стандартных методов статистической обработки данных. Достоверность и обоснованность результатов диссертационной работы подтверждается также их опубликованием в рецензируемых *тематических* научных журналах и апробацией на тематических научных конференциях.

## **6. Полнота опубликования основных результатов диссертационной работы**

Основные результаты диссертационного исследования опубликованы в 17 научных работах автора, в том числе в изданиях, рекомендованных ВАК - 5 статей (одна из которых в изданиях, индексируемых Scopus и Web of Science), 2 публикации в изданиях, не входящих в список рецензируемых журналов ВАК, и 10 работ в материалах российских и международных конференций.

Результаты работы докладывались и обсуждались на международных и российских конференциях.

## **7. Оформление диссертации**

Работа оформлена в соответствии с требованиями, предъявляемыми к диссертационным работам. Материал достаточно иллюстрирован рисунками и таблицами и изложен в рамках стандартной для работ научно-технического направления структуры.

## **8. Соответствие автореферата содержанию диссертации**

Автореферат достаточно полно отражает содержание диссертации.

## **9. Замечание по диссертации**

По содержанию диссертационной работы имеются следующие замечания:

(1) Соискатель проводит верификацию своих методик, используя в качестве репера хорошо изученный материал - никель марки НП2. При этом полученная соискателем константа растворимости протия в Ni (рис. 4.9, 4.19) снижается с ростом температуры, что свидетельствует об *отрицательной* энтальпии растворения. Однако, согласно литературным данным, энтальпия растворения протия в Ni *положительна*.

(2) Общее замечание к определению данных для *третия* из экспериментов для *протия*.

А. Переход от экспериментальных данных для коэффициента диффузии и константы проницаемости, полученных с протием, к их

значениям для трития производится путём умножения на корень из отношения атомных масс. Это означает, что принимается модель, в которой изотопический эффект сводится только к разнице в частоте колебаний атомов изотопов водорода в равновесных междоузельных позициях, но никак не проявляется в значении энергии активации перескоков. Однако, согласно известным данным для хорошо изученных систем водород – металл (например, водород-Pd, водород-V), изотопический эффект имеет место также и в отношении энергии активации диффузии.

Б. Константа растворимости  $S$  находится в работе из экспериментальных значений коэффициента диффузии  $D$  и константы проницаемости  $P$  как отношение  $P/D$ . Это означает, что априори принимается, что *изотопический эффект в растворимости отсутствует*. Но, согласно экспериментальным данным для хорошо изученных систем водород – металл (например, водород-Pd, водород-V), а также и теоретическим представлениям, изотопический эффект в растворимости имеет место и проявляет себя в отношении как энтропийного фактора, так и энтальпии растворения.

(3) Как об этом говорится в диссертации, одной из стадий переноса водорода через металлические мембраны является диссоциативная абсорбция молекул водорода. Однако, в принятой соискателем модели эта стадия не учитывается. Возможно, есть основания полагать, что влиянием этой стадии в конкретных мембранных экспериментах можно пренебречь, но автор этих оснований не приводит.

(4) Диссертация не свободна от некоторых стилистических и терминологических неточностей. Например,

фраза на стр. 41: «Интенсивность сорбции для молекулярного водорода находится в интервале 2-3 порядков величины, тогда как интенсивность сорбции для тритированной воды находится в диапазоне пятого порядка» (?!),

выражения типа «высокая и низкая диффузия», «магнитный микроскоп» (наверное, имеется в виду магнитно-силовой микроскоп?).

Несмотря на приведённые замечания, оппонент высоко оценивает научный уровень и практическую значимость диссертационной работы.

#### 10. Заключение.

Диссертационная работа Аникина А.С. «Определение диффузионных характеристик трития в конструкционных и функциональных материалах реакторных установок различных типов» является законченной научно-квалификационной работой, соответствует специальности 2.6.8 – Технология редких, рассеянных и радиоактивных элементов (технические науки) и отвечает требованиям п.п. 9, 10, и 14 «Положения о присуждении ученых степеней», утвержденного Постановлением Правительства Российской Федерации от 24 сентября 2013 г. № 842 (в действующей редакции), предъявляемым к кандидатским диссертациям, а ее автор – Аникин Александр Сергеевич – заслуживает присуждения ему ученой степени кандидата технических наук по специальности 2.6.8 – Технология редких, рассеянных и радиоактивных элементов (технические науки).

Отзыв подготовил:

Профессор кафедры физики, доктор физико-математических наук по специальности 01.04.04 (Физическая электроника, включая квантовую), профессор Лившиц Александр Иосифович

Подпись (-и)  [Redacted]

заверяю

заместитель начальника

административно-кадрового управления

 /Н.А. Аксёнова 29.11.2024

 А.И. Лившиц

Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования «Санкт-Петербургский университет телекоммуникаций им. проф. М.А. Бонч-Бруевича» (СПбГУТ).



Юридический адрес: 191186, г. Санкт-Петербург, набережная реки  
Мойки, д. 61, литера А;

Почтовый адрес: 193232, г. Санкт-Петербург, пр. Большевиков, д. 22,  
корпус 1.

Телефон: +7 (812) 326-3156;

e-mail: [rector@sut.ru](mailto:rector@sut.ru)

<https://www.sut.ru/>