



ИРМ
РОСАТОМ

Государственная корпорация по атомной энергии «Росатом»
АКЦИОНЕРНОЕ ОБЩЕСТВО
«ИНСТИТУТ РЕАКТОРНЫХ МАТЕРИАЛОВ»
(АО «ИРМ»)

УТВЕРЖДАЮ

Заместитель директора

по научной и инновационной

деятельности, канд. техн. наук

А.В. Варивцев

«10» ноября 2025 г.



ОТЗЫВ ВЕДУЩЕЙ ОРГАНИЗАЦИИ

на диссертационную работу Половникова Павла Васильевича
«Моделирование микроструктурных изменений в ядерном топливе при
облучении», представленную на соискание учёной степени кандидата технических
наук по специальности 2.4.9 – «Ядерные энергетические установки, топливный
цикл, радиационная безопасность»

1. Актуальность темы диссертационного исследования

Диссертация Половникова П. В. посвящена разработке усовершенствованных математических моделей и расчете микропараметров для современных компьютерных кодов ИБРАЭ РАН, описывающих процессы, происходящие в топливе ядерных реакторов и других объектах ядерного топливного цикла. Основное внимание уделено моделированию процессов, протекающих в ядерном топливе тепловыделяющих элементов (ТВЭЛов) быстрых и тепловых реакторов. Подходы, используемые при разработке ИБРАЭ РАН расчетных кодов БЕРКУТ-У и MFPR/R, основаны на современных физических моделях, описывающих физические процессы, происходящие в топливе, и реализации этих моделей в виде алгоритмов. Уравнения, описывающие состояние топлива, содержат достаточно большое количество принципиально важных параметров, экспериментальные данные о которых ограничены или отсутствуют. В подобных ситуациях возникает задача оценки, или, если возможно, расчета недостаточно точно известных параметров.

Данная задача решается путем применения современных методов атомистического моделирования, что помогает оптимизировать проведение дорогостоящих экспериментов при тестировании изучаемого материала.

По мере развития теории и появления новых экспериментальных данных возникает необходимость в разработке новых моделей, описывающих процессы в топливе, и включения их в топливный код. Это повышает надежность и предсказательную силу кода, что может быть использовано для повышения эффективности и безопасности ядерных установок, оптимизации топливного цикла и обеспечения радиационной безопасности, что и определяет актуальность выполненной диссертационной работы.

2. Структура и содержание работы

Диссертация состоит из введения, трёх глав, заключения, списка литературы из 170 библиографических ссылок, двух приложений. Общий объём работы составляет 104 страниц основного текста, включая 7 таблиц и 32 рисунка.

Введение формулирует актуальность выбранной темы, цель и задачи исследования. Рассматриваются научная новизна, практическая значимость результатов, степень достоверности и личный вклад автора. Представлены данные по апробации работы и положения, выносимые на защиту.

В первой главе приводится обзор процессов, происходящих в ядерном топливе при облучении в части ускорения диффузии и формирования газонаполненной пористости, а также подходов, используемых для их моделирования с помощью компьютерных топливных кодов.

Вторая глава отражает этапы моделирования радиационно-стимулированных процессов (атермальной диффузии, мгновенного и радиационно-стимулированного выходов ПД) в реакторных материалах с использованием приближения парных столкновений и метода молекулярной динамики. Получены уточненные для диоксидного и новые для нитридного топлива значения микроскопических параметров процессов взаимодействия осколков деления с матрицей, внедренные в код MFPR, разрабатываемый в ИБРАЭ РАН с участием автора диссертации.

В третьей главе диссертант моделирует коалесценцию подвижных газонаполненных пор и пузырей (как аналог броуновских частиц в рамках теории

Ланжевена и уравнения Смолуховского), оценивает поведение крупных неподвижных пор в рим-зоне облученного UO_2 топлива в тепловых реакторах, математически анализирует явление «взрывного распухания» в некоторых видах интерметаллидного топлива при низкотемпературном облучении в исследовательских реакторах с высокой скоростью выгорания топлива.

В заключении перечислены основные результаты диссертационной работы, выносимые на защиту.

Диссертация и автореферат оформлены в соответствии с требованиями стандарта ГОСТ Р 7.0.11-2011.

3. Степень обоснованности научных положений, выводов и рекомендаций

Обоснованность результатов работы подтверждается:

- сравнением полученных аналитических расчетов с результатами численного моделирования аналогичных систем в пакетах программ открытого доступа *SRIM* и *LAMMPS*;
- сравнением и верификацией получаемых расчетных результатов с имеющимися литературными экспериментальными данными;
- соответствием полученных результатов и выводов (в том числе для хорошо изученных видов топлива) общепринятым понятиям, отраженным в научной литературе.

4. Достоверность и новизна научных положений и выводов

Работа сочетает в себе систематизацию ранее приведенных в научной литературе данных и полученных в настоящем исследовании собственных результатов, что свидетельствуют о научной квалификации соискателя. Решение поставленных в диссертации задач, определило *научную новизну* работы. Разработаны частные модели слияния (коалесценции) подвижных и малоподвижных внутризеренных пузырей, позволяющие обосновать и уточнить существующие модели их броуновской кинетики. Для расчета распухания топлива использованы приближения парных и тройных столкновений, пор одинакового и значительно различающихся размеров. Выполнена переоценка баллистических

множителей атермальной диффузии по механизмам отдачи и выбивания, в том числе впервые для уран-нитридного топлива.

На основе проведенных исследований разработана частная модель коалесценции крупных пор в периферийной области таблетки («рим-зоне») облученного топлива UO_2 в реакторах на тепловых нейтронах, а также частная модель, описывающая «взрывное» распухание интерметаллидных соединений урана в процессе облучения в исследовательских реакторах.

Полученные расчеты верифицированы на литературных данных.

5. Практическая и научная значимость

Найденные значения микропараметров внедрены в усовершенствованный твэльный код БЕРКУТ-У, аттестованный до ресурса выгорания 12% тяжелых атомов, и используются при выполнении расчетных обоснований безопасности РУ БРЕСТ-ОД-300, БР-1200 и БН-1200М в составе интегрального кода ЕВКЛИД/V2. Модели, описывающие эволюцию пористости в рим-зоне, включены в код SFPR/C++, являющийся модулем аттестованных кодов TITAN-1 и TITAN-2, которые используются для расчетного моделирования энергетических реакторов типа ВВЭР с оксидным топливом. Все это свидетельствует о *практической ценности* результатов работы.

Судя по публикациям, из которых 4 вышло в международных индексированных журналах из перечня ВАК, а также апробировании результатов работы на многих отечественных и зарубежных конференциях, соискателем был проделан большой объем исследований, выполненных на высоком научном уровне.

6. Вопросы и замечания по диссертационной работе

По содержанию диссертации можно отметить следующие замечания:

1. В тексте встречаются фразеологически неточные формулировки и ссылки.

Например, на стр.6 приводится: «Данная задача может быть решена путем применения современных методов ..., которые помогают избежать проведения соответствующих дорогостоящих экспериментов.». Избежать экспериментов – значит не верифицировать модель. Лучше скорректировать формулировку «... оптимизировать проведение дорогостоящих экспериментов».

Стр. 7 «...код БЕРКУТ-У, аттестованный до 12% тяжелых атомов,...»
Пропущено наименование ключевого параметра «...код БЕРКУТ-У, аттестованный до выгорания 12% тяжелых атомов,...».

Стр. 6-7 и далее по содержанию - «Разработка модели коагуляции ...»:

Терминологическая неточность. Коагуляция (от лат. *coagulatio* – сгущение, свёртывание) – слипание частиц дисперсной фазы с образованием более крупных агрегатов. Слияние малоподвижных пор в одну общую пору называется коалесценцией. Определение из Химической энциклопедии: «КОАЛЕСЦЕНЦИЯ (от лат. *coalesco* – срастаюсь, соединяюсь). Слияние капель жидкости внутри другой жидкости (или газа) или пузырьков газа...».

На стр. 27 – ошибка знака степени размерности: $(2.3 \pm 1.0) \times 10^{-40} \text{ м}^{-5}$.

На стр. 32 и 76 – ссылки на несуществующие уравнения (2.3.2.3.1 и 2.3.2.3.2, 5.3.1.а3.3.1) либо оформленные не по ГОСТ.

На стр. 56 «...модели Мансура для двумерного случая межзеренных (?) в приближении...» - пропущено «пор».

На стр. 69 – смысловая неточность: «...в периферийной зоне...при высоких температурах выгорания формировалась структура с высокой степенью выгорания» (Вероятно, «при низких температурах», и без последующего «выгорания»).

На стр. 73 – «...сохранение общего общей поверхности пор...».

2. Неоднозначность используемых понятий.

Использование не имеющего в данной работе смысла термина «Имплементация» (стр.9). Согласно «Циклопедии» **Имплементация** — реализация приложения или выполнение плана, идеи, модели, дизайна, спецификации, стандарта, алгоритма или политики. В других источниках этот термин имеет политический смысл.

Неоднократно (на рисунках 3.3.2, 3.3.7, 3.3.10) пористость P отождествляется с фактическими приведенными значениями распухания S , что математически некорректно ($S = P / (1 - P)$).

3. Необоснованно широкий выбор для кода MFPR диапазона порогового значения (см. стр. 55) плотности дислокаций для начала реструктуризации $(6-8) \times 10^{14} \text{ м}^{-2}$, когда выше утверждается, что для нижнего значения формирование

микрозерна с большеугловыми границами внутри исходного зерна в области рим-зоны ещё не наблюдается.

4. При моделировании автор рассматривает только два крайних варианта слияния пор (с сохранением суммарного объема или суммарной площади новой поры), не учитывая и не комментируя вероятность промежуточных состояний.

Высказанные замечания не являются принципиальными, их можно отнести к техническим, и считать, что они имеют рекомендательный характер. В целом же диссертация написана четким и понятным языком, хорошо оформлена, что дополнительно создает положительное впечатление о выполненной работе.

7. Заключение о соответствии диссертации критериям, установленным Положением о присуждении ученых степеней

Диссертация Половникова Павла Васильевича «Моделирование микроструктурных изменений в ядерном топливе при облучении» является законченной научно-квалификационной работой, имеющей достаточно высокий научный уровень, в которой для выполнения поставленной цели решены актуальные научно-практические задачи, необходимые для уточнения расчетных обоснований безопасности реакторов на тепловых и быстрых нейтронах. Диссертационное исследование автора является самостоятельной работой, содержащей новые научные результаты, имеющие существенное практическое значение и использование (в части микропараметров твэльных кодов ИБРАЭ РАН). Предложенные автором диссертации решения достаточно аргументированы и обоснованы. Основные научные результаты диссертации опубликованы в четырех рецензируемых научных изданиях, доложены на российских и международных конференциях и семинарах. Краткие результаты диссертационной работы достаточно полно и корректно отражены в автореферате.

Сфера исследования диссертации соответствует пункту 1 паспорта научной специальности 2.4.9 – «Ядерные энергетические установки, топливный цикл, радиационная безопасность» и критериям «Положения о присуждении ученых степеней», введенного постановлением Правительства Российской Федерации от 24 сентября 2013 г. №842 «О порядке присуждения ученых степеней», которым

должны отвечать диссертации на соискание ученой степени кандидата наук. Соответственно, автор диссертации - Половников Павел Васильевич заслуживает присуждения ученой степени кандидата технических наук по специальности 2.4.9 - «Ядерные энергетические установки, топливный цикл, радиационная безопасность». Отзыв АО «ИРМ» на диссертацию рассмотрен на заседании лаборатории конструктивных материалов и нанотехнологий АО «ИРМ» и одобрен научно-техническим советом АО «ИРМ», протокол № 61-2-12-15/13-25 от 05 ноября 2025 г.

Отзыв подготовил:

Е.А. Кинёв, ведущий научный сотрудник лаборатории конструкционных материалов и нанотехнологий АО «ИРМ», канд. техн. наук по спец. 05.14.03 «Ядерные энергетические установки, включая проектирование, эксплуатацию и вывод из эксплуатации», телефон+7(34377) 3-51-18, адрес электронной почты: kinev_ea@irmatom.ru


Е.А. Кинёв

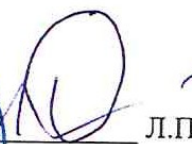
Собственную подпись

Е.А. Кинёва

удостоверяю

Ученый секретарь АО «ИРМ»




Л.П. Синельников

Акционерное общество «Институт реакторных материалов» (АО «ИРМ»).

Почтовый адрес: 624250, г. Заречный, Свердловская обл., а/я 29, телефон+7(34377) 3-50-01. Сайт: <http://irm-atom.ru>. Электронная почта: irm@irmatom.ru