

ОТЗЫВ

Официального оппонента Лиханского Владимира Валентиновича на диссертационную работу Половникова Павла Васильевича на тему: «Моделирование микроструктурных изменений в ядерном топливе при облучении», представленную на соискание ученой степени кандидата технических наук по специальности 2.4.9 — «Ядерные энергетические установки, топливный цикл, радиационная безопасность»

Актуальность работы. Диссертационное исследование Половникова П.В. посвящено развитию моделей, описывающих микроструктурные изменения в ядерном топливе, которые применяются в топливных и твэльных кодах. Актуальность работы обусловлена необходимостью развития таких кодов для повышения точности прогнозирования поведения топлива в реакторе. Современные твэльные коды опираются на механистические модели, которые описывают физические процессы в топливе на микроуровне. В этом контексте ключевой задачей является не только определение недостающих микроскопических параметров использующихся уравнений, что решается применением методов атомистического моделирования, но и разработка новых физических моделей, адекватно описывающих наблюдаемые в экспериментах явления. В конечном итоге развитие этих моделей на основе новых теоретических и экспериментальных знаний позволяет создавать более точные и надежные инструменты для прогнозирования поведения топлива при облучении, что критически важно для повышения безопасности и эффективности ядерных технологий.

Достоверность и обоснованность результатов работы подтверждается проведенной валидацией и верификацией. В части молекулярно-динамических расчетов полученные значения баллистического компонента аtermальной диффузии сравнивались с аналогичными представленными значениями в литературе. В части описания эволюции пористости в различных режимах новые модели и полученные с их помощью результаты хорошо согласуются с более упрощенными рассмотрениями, уточняя их. Все основные результаты были опубликованы в международных рецензируемых журналах.

Оценка содержания диссертации и ее завершенность. Проведенный анализ содержания диссертационной работы позволяет оценить ее как целостное и логически завершенное научное исследование. Структура работы выстроена последовательно: от общего анализа радиационных процессов в топливе и обзора существующих подходов к моделированию к решению конкретных задач, имеющих непосредственное прикладное значение для развития моделей топливных кодов.

Первая глава диссертации содержит обзор физических процессов, протекающих в ядерном топливе при облучении, а также современные методы их математического

моделирования в расчетных кодах. Следует отметить критический анализ ограничений существующих моделей, который подчеркивает актуальность выбранного направления исследований.

Вторая глава содержит результаты численного моделирования возникающих в топливе каскадов смещений от пролета осколков деления, дано описание характеристик таких каскадов. Совместное применение методов молекулярной динамики и Монте-Карло позволило получить параметры, которые используются в моделях топливного кода MFPR для моделирования атермальной самодиффузии и прямого выхода продуктов деления.

Третья глава представляет собой цикл исследований, в котором разработаны теоретические модели и подходы, описывающие изменение пористости в различных видах топлива и различных условиях облучения: коагуляция подвижных внутризеренных пузырей в рамках теории Ланжевена, эволюция неподвижных пор в рим-зоне облученного топлива, механизм «взрывного» распухания в интерметаллидах. Предложенные модели носят универсальный характер, что подтверждается их применением к различным типам топлива (UO_2 , интерметаллиды) и различным физическим условиям. Корректность разработанных моделей подтверждена анализом, включавшим сравнение с существующими упрощенными моделями и независимыми экспериментальными данными. Установлено хорошее соответствие расчетов результатам экспериментов, что свидетельствует о достоверности примененных методик и физической обоснованности предложенных подходов.

Таким образом, диссертация представляет собой законченную научную работу, в которой теоретические разработки напрямую направлены на решение актуальных проблем повышения точности и предсказательной способности современных твэльных кодов. Работа является завершенной и самодостаточной.

Научная новизна работы заключается в том, что впервые рассчитаны коэффициенты радиационно-стимулированной диффузии для нитридного топлива. Также новизна диссертации выражается в развитии новых физических моделей коагуляции различных пор и пузырей в ядерном топливе. Впервые разработана модель коагуляции внутризеренных пузырей на основе теории Ланжевена, что позволило получить более точные корреляционные выражения для ядра коагуляции в уравнении Смолуховского по сравнению с упрощенными подходами. Также впервые предложены механистические модели коагуляции неподвижных пор в периферийной области топливной таблетки и «взрывного» распухания интерметаллидных соединений, для которых разработана и верифицирована численная схема на основе метода Монте-Карло.

Теоретическая и практическая значимость результатов обусловлены непосредственным использованием полученных результатов в моделях существующих твэльных кодов. Коэффициенты аtermальной самодиффузии и параметры радиационного выбивания позволяют более точно описывать поведение точечных и объемных дефектов. Также теоретическую ценность имеют разработанные модели, описывающие поведение пористости как в «рим-зоне» относительно хорошо изученного оксидного топлива, так и в исследовательских видах топлива, где может наблюдаться «взрывное» распухание. Усовершенствованные модели напрямую повышают адекватность и предсказательную способность современных твэльных кодов. Полученные результаты позволяют более точно прогнозировать ресурс и поведение топлива, что является основой для его оптимизации и обоснования безопасной эксплуатации в реакторе.

Замечания и рекомендации по диссертации и автореферату

Несмотря на актуальность поставленных задач и научную новизну полученных результатов, при прочтении работы можно обратить внимание на некоторые вопросы, которые могут быть предметом для дальнейшего развития и уточнения представленных решений. Ниже излагаются замечания и рекомендации, учет которых позволит углубить анализ и повысить ценность работы.

1. При пролете осколков деления в веществе передача энергии происходит за счет их взаимодействия с электронной подсистемой среды, а также за счет прямых столкновений с атомами среды (баллистический механизм). В работе рассматривается только баллистический механизм, при этом нет оценок, как он соотносится с локальным перегревом (термическим пиком) и взаимодействием осколка с электронной подсистемой. Поэтому не совсем корректно говорить про аtermальную диффузию и массоперенос. Корректнее говорить про баллистический компонент аtermальной диффузии.

2. При моделировании пролета атомов выбивания высоких порядков были рассмотрены только относительно небольшие энергии этих атомов (до 4 кэВ), тогда как в реальности такие атомы могут иметь намного большую энергию.

3. При описании популяции пузырей в рамках теории Смолуховского учитывается процесс коалесценции пузырей, но не учитывается их нуклеация. Это относится к исследованиям поведения пористости как в зоне высокого выгорания ядерного топлива, так и при ее лавинообразном росте в интерметаллических соединениях.

4. Не приведены примеры использования разработанных моделей в составе топливного или твэльного кода, в которые включены представленные модели, и не проиллюстрировано, как изменились результаты расчетов по этим кодам в результате включения моделей.

5. К недостаткам работы можно отнести некоторую небрежность в оформлении математических выкладок. Так на странице 57 диссертации приводятся практически одинаковые математические выражения под двумя разными номерами, что свидетельствует о недостаточной аккуратности в работе с математическими формулами.

Заключение

Указанные замечания не затрагивают основную суть работы. Представленная диссертационная работа «Моделирование микроструктурных изменений в ядерном топливе при облучении» соответствует паспорту специальности 2.4.9 — «Ядерные энергетические установки, топливный цикл, радиационная безопасность». Исследование удовлетворяет всем установленным требованиям Положения о присуждении ученых степеней (постановление Правительства РФ № 842) к кандидатским диссертациям.

Несмотря на отдельные вопросы и замечания, диссертация представляет собой завершенное и профессиональное научно-квалификационное исследование. На основании изложенного считаю, что соискатель Павел Васильевич Половников заслуживает присуждения ученой степени кандидата технических наук.

Начальник отдела моделирования технологий
ядерного топлива
Федерального государственного бюджетного
учреждения «Национальный исследовательский
центр «Курчатовский институт»,
доктор физико-математических наук,
профессор

 В.В. Лиханский

Адрес: 123182, г. Москва, пл. Академика
Курчатова, д.1.
Телефон: + 7 (916) 537-76-93
Адрес электронной почты:
Likhanskiy_VV@nrcki.ru

дата 10.11.2025

Подпись Лиханского В.В. заверяю:

Заместитель директора, главный ученый
секретарь
НИЦ «Курчатовский институт»



 О.А. Алексеева

дата 10.11.2025