

**АКЦИОНЕРНОЕ ОБЩЕСТВО «НАУЧНО-ИССЛЕДОВАТЕЛЬСКИЙ ИНСТИТУТ
НАУЧНО-ПРОИЗВОДСТВЕННОЕ ОБЪЕДИНЕНИЕ «ЛУЧ»
(АО «НИИ НПО «ЛУЧ»)**

УТВЕРЖДАЮ

Заместитель генерального директора
по науке АО «НИИ НПО «ЛУЧ»,

К.Т.Н.

А.А. Мокрушин

_____ 2025 г.



ОТЗЫВ ВЕДУЩЕЙ ОРГАНИЗАЦИИ

Акционерного общества «Научно-исследовательский институт Научно-производственное объединение «ЛУЧ» на диссертацию Задорожного Антона Валерьевича на тему «Моделирование поведения смешанного нитридного уран-плутониевого топлива под облучением», представленную на соискание ученой степени кандидата технических наук по специальности 2.4.9 «Ядерные энергетические установки, топливный цикл, радиационная безопасность»

Представленная диссертационная работа Задорожного Антона Валерьевича посвящена усовершенствованию современного расчётного инструмента (твэльного кода), предназначенного для моделирования поведения твэлов со СНУП топливом в условиях облучения в реакторах на быстрых нейтронах с жидкометаллическим теплоносителем, и его валидации на данных проведенных послереакторных исследований твэлов. Актуальность выбранной темы исследования обусловлена необходимостью создания надёжного расчётного инструмента, позволяющего прогнозировать поведение твэлов и ядерного топлива в условиях работы реактора на быстрых нейтронах для обоснования

работоспособности твэлов, безопасности эксплуатации действующих и проектируемых АЭС, оптимизации параметров ядерного топлива, а также для использования в интегральных расчётных кодах (например, ЕВКЛИД/V2), применяемых при анализе тяжёлых аварий.

Общая характеристика диссертационной работы

Диссертационная работа изложена грамотно, лаконично, в современном научном стиле. Работа состоит из пяти глав, введения и заключения. Общий объём работы составляет 120 страниц, включая 40 рисунков, 10 таблиц и 113 библиографических ссылок.

Во введении обоснована актуальность работы, поставлены цель и задачи диссертационного исследования, показана научная новизна результатов, их практическая значимость, сформулированы положения, выносимые на защиту.

В первой главе представлен аналитический обзор современного состояния исследований по СНУП топливу: рассмотрены его физико - химические свойства, особенности поведения в реакторах на быстрых нейтронах, существующие расчётные твэльные коды (BISON, GERMINAL, TRANSURANUS и др.). Проведён анализ экспериментальных данных по реакторным испытаниям твэлов, выявлены пробелы в моделировании процессов набухания, выхода продуктов деления и теплопроводности. Во второй главе изложена архитектура и принципы работы твэльного кода БЕРКУТ-У: объект моделирования, расчётная схема. Описаны базовые модели, реализуемые в коде, а также способы учёта ключевых физических процессов в твэле (в топливных таблетках, зазоре «таблетки - оболочка», оболочке твэла). В третьей главе представлены новые модели, разработанные и внедрённые в код: учёт влияния твёрдых фазовых включений (преципитатов) на эффективную теплопроводность выгоревшего СНУП топлива; модели влияния открытой и закрытой пористости на набухание топлива и выход газообразных продуктов деления и гелия; расчётные схемы для твэлов с газовым и жидкометаллическим подслоем. Приведены математические формулировки моделей и алгоритмы их реализации. В четвертой главе описан процесс валидации усовершенствованного кода на данных послереакторных исследований экспериментальных твэлов, облученных в реакторах БОР-60 и БН-600. В пятой главе исследовано влияние ключевых характеристик твэла на его поведение под облучением и показано, что параметры топлива и условия эксплуатации существенно определяют процессы набухания и газовыделения. Кроме того, подтверждена результативность ряда конструктивных решений — в том числе использования жидкометаллического подслоя. Такое техническое решение позволяет эффективнее регулировать температурный режим внутри твэла и в целом улучшать его

эксплуатационные показатели.

Автореферат полностью соответствует содержанию диссертации и отражает основные положения, результаты и выводы работы.

Основные научные результаты и новизна

Научная новизна диссертационной работы заключается в следующем:

- впервые в твэльный код БЕРКУТ-У внедрена модель, учитывающая влияние твёрдых фазовых включений (преципитатов) на теплопроводность выгоревшего СНУП топлива, что позволило существенно повысить точность расчётов при высоких выгораниях топлива;
- впервые разработаны и внедрены модели, описывающие влияние открытой и закрытой пористости СНУП топлива на ключевые процессы: набухание топлива, выход газообразных продуктов деления и гелия;
- впервые проведена комплексная валидация твэльного кода БЕРКУТ-У на данных послереакторных исследований экспериментальных твэлов со СНУП топливом, облученных в реакторах БОР-60 и БН-600, с определением интервалов погрешностей расчёта для ключевых параметров (набухание – $[-19,7; +48,3]$ %, выход газообразных продуктов деления – $[-26,4; +150,0]$ %, выход гелия – $[-11,7; +21,3]$ %);
- выявлены и количественно оценены закономерности влияния микроструктурных параметров топлива (размер зерна) и эксплуатационных условий (температура) на его поведение при облучении, что позволило сформулировать рекомендации по оптимизации характеристик СНУП топлива;
- в результате усовершенствований твэльный код БЕРКУТ-У аттестован в Ростехнадзоре (аттестационный паспорт № 533 от 13.11.2021) для моделирования твэлов со СНУП топливом до выгорания 12,1 % тяж. ат., что существенно расширяет его область применения по сравнению с предыдущими версиями.

Таким образом, диссертация содержит ряд существенных научных результатов, не имеющих прямых аналогов в отечественной и мировой практике моделирования поведения СНУП топлива в реакторах на быстрых нейтронах, что подтверждает её высокую научную новизну.

Практическая значимость полученных результатов

Практическая значимость полученных результатов заключается в том, что разработанные и внедрённые в твэльный код БЕРКУТ-У усовершенствованные модели поведения СНУП топлива позволили:

- обосновать возможность продления облучения экспериментальных твэлов со СНУП топливом в реакторе БН-600, благодаря чему удалось получить экспериментальные данные по поведению топлива до уровня выгорания 9 % тяж. ат.;
- аттестовать код БЕРКУТ-У в Ростехнадзоре (аттестационный паспорт № 533 от 13.11.2021) для моделирования твэлов со СНУП топливом до выгорания 12,1 % тяж. ат., что существенно расширило область его применения;
- обеспечить аттестацию интегрального кода ЕВКЛИД/V2 (с БЕРКУТ-У в качестве твэльного модуля), который используется для обоснования безопасности АЭС с реакторными установками БРЕСТ-ОД-300 и БН-1200М при тяжёлых авариях;
- применить разработанные расчётные модели твэлов для валидации кода БЕРКУТ-У, а также для расчётов в составе интегрального кода ЕВКЛИД/V2;
- использовать результаты расчётов по коду БЕРКУТ-У для интерпретации данных послереакторных исследований и формирования предложений по оптимизации параметров СНУП топлива (размер зерна, пористость, содержание примесей);
- предоставить организациям атомной отрасли аттестованный расчётный инструмент (твэльный код БЕРКУТ-У), позволяющий прогнозировать работоспособность твэлов как в действующих, так и в проектируемых реакторных установках с реакторами на быстрых нейтронах и жидкометаллическими теплоносителями (натриевыми или свинцовыми).

Таким образом, результаты исследования уже нашли прямое применение в ключевых проектах российской атомной энергетики (проектное направление «Прорыв»), способствуя повышению обоснованности и безопасности эксплуатации реакторов на быстрых нейтронах.

Обоснованность и достоверность результатов

Достоверность и обоснованность научных результатов, выводов и заключений диссертации подтверждается комплексом взаимосвязанных факторов: применением современных вычислительных методов и апробированных расчётных алгоритмов; корректной постановкой исследовательских задач с учётом специфики объекта исследования и отраслевых требований; использованием математических моделей, опирающихся на фундаментальные законы физики; систематическим сопоставлением расчётных данных с экспериментальными результатами послереакторных исследований для оценки точности моделей, а также практическим применением усовершенствованного расчётного кода БЕРКУТ-У для решения прикладных задач – обоснования работоспособности твэлов и безопасности реакторных установок, что в совокупности создаёт надёжную основу для признания достоверности полученных результатов.

Основные материалы диссертационного исследования прошли апробацию на профильных научных российских и зарубежных конференциях с обсуждением в научном сообществе и представлены в 10 печатных работах, в том числе, в 4 статьях, опубликованных в ведущих научных журналах, рекомендованных ВАК или входящих в международные реферативные базы данных и системы цитирования Scopus и Web of Science.

Личный вклад автора в получение результатов диссертации

Личный вклад автора заключается в комплексной разработке и внедрении усовершенствованных моделей поведения СНУП топлива в твэльный код БЕРКУТ-У: от постановки задач и анализа научной литературы до создания эмпирических зависимостей для описания распухания топлива, выхода газообразных продуктов деления и гелия, а также реализации модели расчёта эффективной теплопроводности выгоревшего топлива с учётом влияния твёрдых фазовых включений (преципитатов). Автор самостоятельно разработал расчётные модели твэлов с газовым и жидкометаллическим подслоем, сформировал матрицу валидации кода, провёл валидацию БЕРКУТ-У на данных послереакторных исследований экспериментальных твэлов, облученных в реакторах БОР-60 и БН-600, а также выполнил анализ влияния ключевых параметров топлива (размер зерна, температура) на его поведение при облучении, что обеспечило существенное повышение предсказательной способности расчётного инструмента.

Рекомендации по использованию результатов и выводов диссертационной работы

Результаты диссертационной работы рекомендуется использовать для кросс-верификации аналогичных твэльных кодов, а также в интегральных кодах, предназначенных для обоснования безопасности реакторных установок с реакторами на быстрых нейтронах. Усовершенствованный твэльный код БЕРКУТ-У рекомендуется для расчётного обоснования работоспособности твэлов проектируемых реакторов на быстрых нейтронах.

Замечания к диссертационной работе

Исходя из анализа содержания текста диссертации и автореферата, к диссертационной работе есть ряд замечаний:

1. При описании твэла со СНУП топливом уделяется недостаточное внимание материальному составу оболочки и структуре топлива, оказывающим огромное влияние на

работоспособность ТВЭЛ;

2. Отсутствует оценка вклада в изменение объема топливных таблеток радиационного доспекания;

3. В работе не рассмотрен процесс образования избыточного азота при выгорании СНУП топлива, приводящий к образованию высших нитридов и возможному азотированию оболочки ТВЭЛ;

4. Не проведена оценка влияния на работоспособность ТВЭЛ процессов массопереноса через металлический подслоя элементов оболочки на топливную таблетку и элементов топлива (включая примесные углерод и кислород) на оболочку;

5. При рассмотрении вопросов работоспособности ТВЭЛ со СНУП топливом отсутствует анализ совместимости жидкого свинца с топливом и оболочкой.

Указанные замечания не снижают научную ценность и практическую значимость результатов диссертационной работы.

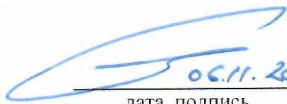
Заключение

Диссертационная работа Задорожного Антона Валерьевича на тему «Моделирование поведения смешанного нитридного уран-плутониевого топлива под облучением» является законченной научно-квалификационной работой, в которой содержится новое решение актуальной задачи о разработке соответствующего современным требованиям расчетного инструмента, предназначенного для моделирования поведения ТВЭЛ при облучении в быстрых реакторах с жидкометаллическим теплоносителем (натриевым или свинцовым) как в режимах нормальной эксплуатации, так и при нарушениях условий нормальной эксплуатации, и позволяющего исследовать тепловые, механические, физико-химические процессы в ТВЭЛ (в топливных таблетках, зазоре «таблетки–оболочка» и оболочке ТВЭЛ) под облучением, что имеет существенное значение для безопасности реакторных установок с реакторами на быстрых нейтронах. Работа соответствует требованиям установленным Положением о порядке присуждения ученых степеней, утвержденным Постановлением Правительства Российской Федерации № 842 от 24.09.2013 г. Автор диссертации, Задорожный Антон Валерьевич, заслуживает присуждения ему ученой степени кандидата технических наук по специальности 2.4.9 «Ядерные энергетические установки, топливный цикл, радиационная безопасность».

Отзыв подготовлен на основании заключения, сделанного в результате обсуждения диссертации на заседании лаборатории отделения ТКМ АО «НИИ НПО «ЛУЧ»,

протокол заседания № 148 от 28.10.2025.

Начальник лаборатории
АО «НИИ НПО «ЛУЧ»,
кандидат технических наук


08.11.2025
дата, подпись

А.Н. Бахин

Подпись А.Н. Бахина заверяю:
Заместитель генерального директора по науке,
ученый секретарь АО «НИИ НПО «ЛУЧ»
кандидат технических наук


11.2025
дата, подпись



А.А. Мокрушин

Наименование организации: Акционерное общество «Научно-исследовательский институт
Научно-производственное объединение «Луч» (АО «НИИ НПО «ЛУЧ»)
Почтовый адрес: 142103, г. Подольск, ул. Железнодорожная, 24
Телефон: 8 (4967) 58-79-91
Электронная почта: npo@sialuch.ru
Официальный сайт: <http://sialuch.com/>