

ОТЗЫВ

официального оппонента Стегайлова Владимира Владимировича
на диссертационную работу **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»

Актуальность темы диссертационного исследования. Диссертационная работа А.В. Задорожного направлена на создание современного расчётного инструмента – твэльного кода БЕРКУТ-У – для моделирования поведения твэлов в быстрых реакторах с жидкометаллическим теплоносителем (натриевым или свинцовым). Разработанный инструмент даёт возможность всесторонне анализировать комплекс процессов – тепловых, механических и физико-химических, – протекающих в твэле в условиях эксплуатации быстрого реактора.

Поскольку экспериментальные данные по поведению смешанного нитридного уран-плутониевого (СНУП) топлива при высоких выгораниях пока ограничены, созданные математические модели и их валидация на результатах послереакторных исследований экспериментальных твэлов, облученных в реакторах БОР-60 и БН-600, позволяют заранее прогнозировать ключевые процессы – распухание топлива, выход газов из топлива, распределение температур в твэле. Аттестация кода в Ростехнадзоре и его использование в интегральном коде ЕВКЛИД/V2 дают возможность обосновывать безопасность перспективных реакторов (БРЕСТ-ОД-300, БР-1200 и БН-1200М) ещё до натурных испытаний. Таким образом, работа закрывает критический разрыв между текущими экспериментальными возможностями и требованиями проектной практики в рамках Энергетической стратегии РФ до 2035 г. и проектного направления «Прорыв».

Научная новизна диссертационной работы А.В. Задорожного подтверждается следующими полученными результатами:

- впервые в твэльный код БЕРКУТ-У интегрирована модель, учитывающая влияние твёрдых фазовых включений (преципитатов) на теплопроводность СНУП топлива в процессе его выгорания;
- на основе сравнительного анализа экспериментальных данных по твэлам со СНУП топливом и расчётных результатов кода БЕРКУТ-У получены новые эмпирические зависимости. Эти зависимости учитывают влияние открытой и закрытой пористости топлива на его распухание, а также на выход газообразных продуктов деления (ГПД) и

гелия с учётом исходных параметров топливных таблеток;

- осуществлена первая валидация кода БЕРКУТ-У на данных ПРИ нитридных твэлов. В ходе валидации определены количественные значения погрешностей расчёта распухания СНУП топлива и выхода из него газов;

- с использованием кода БЕРКУТ-У впервые проведён анализ и выявлены ключевые параметры СНУП топлива, оказывающие существенное влияние на его поведение в процессе выгорания в условиях облучения в быстрых реакторах.

Практическая значимость выполненной диссертационной работы проявляется в следующем:

- результаты, полученные автором, позволили аттестовать твэльный код БЕРКУТ-У и интегральный код ЕВКЛИД/V2», в том числе для расчётов твэлов со СНУП топливом;

- полученные расчётные инструменты применяются для обоснования безопасности перспективных реакторных установок (БРЕСТ-ОД-300, БН-1200М).

- твэльный код БЕРКУТ-У используется для обоснования работы твэлов в действующих реакторах (БН-600) и для интерпретации результатов экспериментов.

- результаты работы обеспечили атомную отрасль современным аттестованным кодом для расчётного обоснования твэлов реакторов на быстрых нейтронах.

Достоверность и обоснованность научных результатов, изложенных в диссертации, имеет комплексное подтверждение. Она обеспечена, во-первых, применением современных и научно апробированных методик расчёта, а также корректной постановкой исследовательских задач. Во-вторых, ключевым фактором является валидация полученных данных путём их сравнения с известными экспериментальными результатами, что демонстрирует адекватность и точность применяемых моделей. Наконец, выводы работы прошли независимую экспертизу широкого научного сообщества, что подтверждается публикацией основных положений в ведущих рецензируемых изданиях и их активным обсуждением на профильных международных и отечественных конференциях.

Общая характеристика содержания диссертации

Диссертационная работа состоит из введения, пяти глав и заключения. Общий объём работы составляет 120 страниц, включая 40 рисунков, 10 таблиц и 113 библиографических ссылок. Автореферат полностью отражает содержание диссертации.

основные положения, результаты и выводы работы.

Во **введении** диссертации последовательно и аргументированно обоснована актуальность исследуемой проблемы, чётко сформулированы цель и задачи исследования, раскрыты научная новизна, практическая значимость и достоверность полученных результатов, а также обозначен личный вклад автора; кроме того, приведены основные положения, выносимые на защиту, и перечень публикаций по теме работы, что в совокупности даёт целостное представление о содержании и научной ценности исследования.

В **первой** главе представлен развёрнутый обзор литературы по СНУП топливу, включающий общие сведения о нитридном топливе и его промышленном производстве, анализ методов компьютерного моделирования поведения топлива и ТВЭЛов с помощью расчётных кодов, а также результаты реакторных испытаний СНУП топлива в быстрых реакторах. Проведён сравнительный анализ отечественных (ДРАКОН-М, КОПАТ-Конструктор) и зарубежных (BISON, GERMINAL, TRANSURANUS) ТВЭЛных кодов-аналогов, продемонстрировавший конкурентные преимущества кода БЕРКУТ-У благодаря усовершенствованному топливному модулю MFPR/R, позволяющему моделировать широкий спектр физико-химических процессов в топливе. Кроме того, обоснована необходимость валидации кода БЕРКУТ-У на данных послереакторных исследований экспериментальных ТВЭЛов, облученных в реакторах БН-600 и БОР-60, приведены ключевые параметры, полученные в ходе ПРИ (геометрические размеры, газовыделение, распухание, пористость и др.), а также рассмотрена перспективность применения жидкометаллического (свинцового) подслоя для улучшения теплопередачи в ТВЭЛе, что определяет направления дальнейших экспериментальных и расчётных исследований.

Во **второй** главе представлено детальное описание ТВЭЛного кода БЕРКУТ-У, включая его общую характеристику, модульную архитектуру и схему взаимодействия компонентов. Описан объект моделирования – стержневой ТВЭЛ с оксидным или нитридным топливом (в том числе СНУП) с газовым или жидкометаллическим подслоем, а также расчётная схема разбиения ТВЭЛа на зоны (компенсационные объёмы, торцевые экраны, активная часть) и ячейки. Обозначены ключевые процессы и явления, моделируемые кодом при нормальной эксплуатации быстрых реакторов: температурное распределение, распухание топлива и оболочки, миграция и накопление продуктов деления (ПД), изменение газового состава под оболочкой, эволюция напряжённо-деформированного состояния и механическое взаимодействие топлива с

оболочкой.

В **третьей** главе детально описаны ключевые усовершенствования моделей кода БЕРКУТ-У, направленные на повышение точности расчётов поведения СНУП топлива при облучении. Прежде всего, модернизированы модели набухания топлива и выхода ГПД за счёт учёта открытой и закрытой пористости топлива: в новой версии явно учитывается, какая часть потока ГПД (ксенона и криптона) попадает в свободный объём твэла через открытую пористость либо прямым выходом из приповерхностных областей, а какая – захватывается закрытыми технологическими порами или перераспределяется между радиационно-индуцированными пузырями. Важным нововведением стала обновлённая модель теплопроводности СНУП топлива: вместо прежней корреляционной зависимости реализован расчёт эффективной теплопроводности с учётом влияния выгорания, накопления ПД и образования вторичных конденсированных фаз (преципитатов) на основе обобщённой теории теплопроводности гетерогенной системы. Расчёты по доработанному коду показали, что с ростом выгорания теплопроводность топлива снижается при постоянной температуре – что согласуется с формированием вторичных фаз. Таким образом, внесённые изменения существенно повышают физическую обоснованность и предсказательную способность кода БЕРКУТ-У при моделировании поведения СНУП топлива в условиях облучения.

В **четвёртой** главе представлены результаты моделирования поведения экспериментальных твэлов и проведена валидация кода БЕРКУТ-У на данных послереакторных исследований. Валидация выполнена на материалах облучения нитридных твэлов в реакторах БН-600 (сборы КЭТВС-1, 2, 3, 6, 7; ЭТВС-4, 5, 8–14, 16–18) и БОР-60 (ОУ-1, 2, 4), полученных в рамках Комплексной программы расчётного и экспериментального обоснования плотного топлива для быстрых реакторов. Анализировались ключевые параметры: геометрические размеры таблеток и оболочек, количество ГПД и гелия, давление под оболочкой, набухание и пористость топлива, радиальное распределение пористости и ПД. В рамках диссертационной работы для валидации использованы данные по двум типам экспериментальных твэлов, различающихся геометрией и размерами топливных таблеток. Выполнены как детерминистские, так и статистические расчёты с варьированием входных параметров (в том числе начальной плотности топлива ~85 % от теоретической, содержания плутония 14 %, примесей углерода и кислорода ~0,1 %, размера зерна 10 мкм) в заданных диапазонах на основе нормального распределения. В результате получены расчётные интервалы неопределённости для набухания СНУП топлива и выхода ГПД. Сравнение

расчётных данных с ПРИ показало удовлетворительное согласие: большинство экспериментальных точек лежит в пределах расчётных полос неопределённости, а при совместном анализе всех данных – в коридоре среднеквадратичного отклонения. Выявлены причины отдельных отклонений (прежде всего в выходе ГПД), связанные с отсутствием в ПРИ данных об исходном соотношении закрытой и открытой пористости. Определены интервалы погрешностей: для выхода ГПД — $[-26,4; +150,0]$ %, гелия — $[-11,7; +21,3]$ %, набухания — $[-19,7; +48,3]$ %. Область применимости кода по выгоранию подтверждена до 12,1 % тяж. ат. По итогам валидации и экспертизы обосновывающих материалов код БЕРКУТ-У аттестован в Ростехнадзоре (аттестационный паспорт № 533 от 13.11.2021), что подтверждает его пригодность для прогнозирования параметров твэлов со СНУП топливом при облучении в быстрых реакторах.

В **пятой** главе исследовано влияние ключевых характеристик твэла на его поведение под облучением: установлено, что размер топливного зерна заметно влияет на твёрдотельное набухание на ранних стадиях выгорания (< 1 % тяж. ат.) — поскольку формирование твёрдотельных преципитатов начинается после диффузионного выхода ПД на границу зерна, время которого растёт с увеличением радиуса зерна: при выгораниях свыше 2 % тяж. ат. твёрдотельное набухание для разных размеров зерна практически совпадает и определяется преимущественно степенью выгорания; при этом меньшее зерно приводит к большему газовому набуханию и более интенсивному выходу ГПД из-за сокращения времени диффузии атомов газа к границе зерна. Выявлено, что температура эксплуатации слабо влияет на твёрдотельное набухание, но существенно усиливает газовое набухание и выход ГПД; показано, что применение жидкометаллического подслоя между топливом и оболочкой позволяет снизить температуру топлива на 300–400 °С, замедлить выход ГПД и набухание, потенциально увеличить максимальное выгорание, исключить механическое взаимодействие топлива с оболочкой и снизить внутреннее давление в твэле. В заключение подчёркивается необходимость поиска оптимального баланса параметров СНУП топлива с учётом технологических особенностей, требований безопасности и экономических показателей для реализации его полного потенциала.

При анализе текста диссертации и автореферата выявлен ряд замечаний к диссертационной работе:

1. В диссертации было бы очень уместно представить обсуждение результатов многомасштабного и атомистического моделирования нитридных топлив, так как результаты подобного моделирования во многом определяют точность

топливных кодов (могу в этой связи обратить внимание на недавнюю работу [Rizk J. T. et al. Mechanistic nuclear fuel performance modeling of uranium nitride // Journal of Nuclear Materials. – 2025. – Т. 606. – С. 155604.]) и позволяют ее систематически повышать.

2. В разделе 1.3 приводится достаточно краткий обзор зарубежных кодов для моделирования топлив, которые, вообще говоря, могут рассматриваться как альтернативы коду, представленному в диссертации. К сожалению, детальное сравнение представленного в диссертации кода и аналогов, представленных в литературе в тексте диссертации не представлено. В обзоре не приводятся ссылки на обзор топливных кодов [Van Uffelen P. et al. A review of fuel performance modelling // Journal of Nuclear Materials. – 2019. – Т. 516. – С. 373-412], не упоминается код ENIGMA [Peakman A., Rossiter G. Incorporation of uranium nitride fuel capability into the ENIGMA fuel performance code: Model development and validation // Nuclear Engineering and Design. – 2024. – Т. 429. – С. 113604.].
3. На рисунке 4.3 приведены данные расчетов и измерений выхода ГПД, выхода гелия из топлива и набухания топлива. Корреляция расчета и эксперимента для случая выхода гелия и набухания имеет равномерный разброс. Однако выход ГПД явно занижается. В чем могут быть причины такого поведения результатов расчетов?

Сделанные замечания не ставят под сомнения основные результаты работы и не снижают её научной и практической значимости.

На основании вышеизложенного считаю, что диссертация выполненная автором на высоком научном уровне, представляет собой законченную научно-исследовательскую работу, в которой последовательно и чётко обоснована актуальность темы, поставлена цель и сформулированы задачи работы; детально изложены полученные результаты, отражена их достоверность, при этом наглядно продемонстрирована практическая значимость проведённого исследования и возможность применения его результатов в реальной практике.

Диссертационная работа А.В. Задорожного на тему «Моделирование поведения смешанного нитридного уран-плутониевого топлива под облучением» полностью соответствует требованиям Положения о присуждения ученых степеней, утвержденным Постановлением Правительства Российской Федерации от 24.09.2013 г. № 842 (с последующими изменениями), а её автор, Задорожный Антон Валерьевич, заслуживает

присуждения ему ученой степени кандидата технических наук по специальности 2.4.9 «Ядерные энергетические установки, топливный цикл, радиационная безопасность».

Заведующий отделом ОИВТ РАН
доктор физико-математических наук


дата, подпись

Стегайлов Владимир Владимирович

Наименование организации: Федеральное государственное бюджетное учреждение науки
Объединенный институт высоких температур Российской академии наук (ОИВТ РАН)

Почтовый адрес: 125412, г. Москва, ул. Ижорская, д.13, стр.2

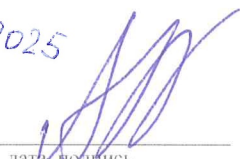
Телефон: 8 (495) 485-83-45

Электронная почта: office@ihed.ras.ru

Официальный сайт: <https://www.jiht.ru/>

Подпись В.В. Стегайлова заверяю:
Ученый секретарь ОИВТ РАН
доктор физико-математических наук

07.11.2025


дата, подпись

А.Д. Киверин

