

ЗАКЛЮЧЕНИЕ ДИССЕРТАЦИОННОГО СОВЕТА 24.1.496.01,
СОЗДАННОГО НА БАЗЕ ФЕДЕРАЛЬНОГО ГОСУДАРСТВЕННОГО
БЮДЖЕТНОГО УЧРЕЖДЕНИЯ НАУКИ «ИНСТИТУТА ПРОБЛЕМ
БЕЗОПАСНОГО РАЗВИТИЯ АТОМНОЙ ЭНЕРГЕТИКИ РОССИЙСКОЙ
АКАДЕМИИ НАУК», ПО ДИССЕРТАЦИИ НА СОИСКАНИЕ УЧЕНОЙ
СТЕПЕНИ КАНДИДАТА НАУК

аттестационное дело № _____
решение диссертационного совета от 27 ноября 2025 года № 10

О присуждении Задорожному Антону Валерьевичу, гражданство – Российская Федерация, ученой степени кандидата технических наук.

Диссертация «Моделирование поведения смешанного нитридного уран-плутониевого топлива под облучением» по специальности 2.4.9. – «Ядерные энергетические установки, топливный цикл, радиационная безопасность» принята к защите 17 сентября 2025 года (протокол заседания № 6) диссертационным советом 24.1.496.01, созданным на базе Федерального государственного бюджетного учреждения науки Института проблем безопасного развития атомной энергетики Российской академии наук (далее – ИБРАЭ РАН), расположенного по адресу: 115191, Москва, ул. Большая Тульская, д. 52, приказом Минобрнауки России от 22 июня 2023 г. № 1316/нк, деятельность которого была возобновлена приказом № 686/нк от 07 июля 2025 г.

Соискатель Задорожный Антон Валерьевич, 16.05.1993 года рождения, в 2017 году окончил Национальный исследовательский ядерный университет «МИФИ» (НИЯУ «МИФИ») по специальности «Ядерные реакторы и материалы». В 2021 году окончил аспирантуру ИБРАЭ РАН, успешно сдав кандидатские экзамены по специальности 05.13.18 «Математическое моделирование, численные методы и комплексы программ». В связи с изменением номенклатуры научных специальностей в 2024 году успешно пересдал экзамены кандидатского минимума по специальности 2.4.9. – «Ядерные энергетические установки, топливный цикл, радиационная безопасность».

В период подготовки диссертации соискатель Задорожный Антон Валерьевич работал в Отделении разработки программного обеспечения для анализа безопасности АЭС ИБРАЭ РАН. В настоящее время занимает должность младшего научного сотрудника ИБРАЭ РАН.

Диссертация выполнена в лаборатории моделирования поведения тепловыделяющих элементов Отделения разработки программного обеспечения для анализа безопасности АЭС ИБРАЭ РАН.

Научный руководитель: кандидат физико-математических наук Озрин Владимир Драганович, старший научный сотрудник лаборатории моделирования поведения тепловыделяющих элементов Отделения разработки программного обеспечения для анализа безопасности АЭС ИБРАЭ РАН.

Официальные оппоненты:

Стегайлов Владимир Владимирович, доктор физико-математических наук, главный научный сотрудник, заведующий отделом многомасштабного суперкомпьютерного моделирования Объединенного института высоких температур Российской академии наук (ОИВТ РАН);

Тарасов Борис Александрович, кандидат технических наук, руководитель проекта научно-исследовательского и конструкторско-технологического отделения разработки ТВЭЛов для быстрых и газовых реакторов Акционерного общества «Высокотехнологический научно-исследовательский институт неорганических материалов имени академика А. А. Бочвара» (АО «ВНИИНМ») дали положительные отзывы на диссертацию.

Ведущая организация: Акционерное общество «Научно-исследовательский институт научно-производственное объединение «ЛУЧ» (АО «НИИ НПО «ЛУЧ», Московская обл., г. Подольск) в своем положительном отзыве, подписанном начальником лаборатории 076 отделения ТКМ АО «НИИ НПО «ЛУЧ», кандидатом технических наук Бахиным А. Н. и заместителем генерального директора АО «НИИ НПО «ЛУЧ» по науке, кандидатом технических наук Мокрушиным А. А., указала, что диссертационная работа Задорожного А. В. является законченной научно-квалификационной работой, в

которой содержится новое решение актуальной задачи о разработке соответствующего современным требованиям расчетного инструмента, предназначенного для моделирования поведения ТВЭЛов 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 ТВЭле (в топливных таблетках, зазоре «таблетки–оболочка» и оболочке ТВЭЛа) 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. 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».

Соискатель имеет десять опубликованных работ по теме диссертации, из них три в рецензируемых научных изданиях из перечня, утвержденного ВАК Минобрнауки России, или входящих в международные реферативные базы данных и системы цитирования Scopus и Web of Science, а также шесть – в трудах и сборниках российских и международных научных конференций. Основные результаты работы докладывались автором и обсуждались на девяти российских и международных научных конференциях. В диссертации отсутствуют недостоверные сведения об опубликованных соискателем работах, вклад автора в публикации в разделах, касающихся полученных в диссертации результатов, определяется как решающий.

Основные работы по теме диссертации :

1. A. V. Boldyrev, A. P. Dolgodvorov, I. O. Dolinskiy, V. D. Ozrin, P. V. Polovnikov, V. E. Shestak, V. I. Tarasov, A. V. Zadorozhnyi. Fuel performance code BERKUT-U to simulate the in-pile behavior of a single oxide or nitride fuel rod for fast reactors // Journal of Nuclear Materials, 603 (2025).

2. A. V. Zadorozhnyi, V. D. Ozrin. The influence of precipitates upon the thermal conductivity of nitride fuel // J. Phys.: Conf. Ser. (2020) 1689 012001.

3. Болдырев А. В., Задорожный А. В., Озрин В. Д., Тарасов В. И., Долинский И. О., Чернов С. Ю. Валидация код БЕРКУТ на результатах послереакторных исследований твэлов со смешанным нитридным уран-плутониевым топливом, облученным в БН-600 // Атомная Энергия, 2019. Т. 127. Вып. 6. С. 322–327.

На диссертацию и автореферат поступили положительные отзывы специалистов из 9 организаций: АО «Государственный научный центр – Научно-исследовательский институт атомных реакторов» (АО «ГНЦ НИИАР»), АО «Высокотехнологический научно-исследовательский институт неорганических материалов имени академика А. А. Бочвара» (АО «ВНИИНМ»), АО «Ордена Ленина Научно-исследовательский и конструкторский институт энерготехники имени Н. А. Доллежала» (АО «НИКИЭТ»), АО «Государственный научный центр Российской Федерации – Физико-энергетический институт имени А. И. Лейпунского» (АО «ГНЦ РФ – ФЭИ»), АО «Институт реакторных материалов» (АО «ИРМ»), АО «Сибирский химический комбинат» (АО «СХК»), АО «Ангарский электролизный химический комбинат» (АО «АЭХК») (без замечаний), «Национальный исследовательский ядерный университет «МИФИ» (НИЯУ МИФИ), ФГУП «Научно-исследовательский технологический институт имени А.П. Александрова» (ФГУП «НИТИ им. А.П. Александрова»).

В отзывах отражены актуальность, научная новизна, практическая значимость, достоверность и апробация полученных автором результатов. В отзывах на автореферат содержатся замечания редакционного, рекомендательного и критического характера. Среди критических замечаний следующие:

1. Беляева Анна Викторовна, старший научный сотрудник АО «ГНЦ НИИАР», кандидат технических наук: не указаны причины некоторого

расхождения экспериментальных и расчетных данные для КЭТВС-1 (рисунок 1).

2. Киреев Геннадий Александрович, ведущий научный сотрудник АО «ВНИИНМ», кандидат технических наук: отсутствует информация о пределах применимости моделей поведения топлива по выгоранию и температуре.

3. Александров Сергей Игоревич, заместитель генерального директора по НИОКР АО «НИКИЭТ», кандидат технических наук и Пулинец Андрей Александрович, главный конструктор активных зон – директор отделения АО «НИКИЭТ», кандидат технических наук: при описании влияния температуры на распухание топлива не рассмотрены экстремальные режимы (например, переходные процессы при авариях); продемонстрированы преимущества свинцового подслоя, но не отражены проблемы и риски, связанные с этой технологией (коррозия, химическое взаимодействие), требующие дополнительного исследования.

4. Фоломеев Владимир Иванович, ведущий научный сотрудник АО «ГНЦ РФ – ФЭИ» и Мариненко Евгений Егорович, старший научный сотрудник АО «ГНЦ РФ – ФЭИ»: не приводятся результаты исследования чувствительности выходных параметров кода к неопределенности задания открытой пористости СНУП топлива, возможно, поэтому не все результаты ПРИ лежат между максимальными и минимальными значениями, рассчитанными при анализе неопределенности.

5. Кинёв Евгений Александрович, ведущий научный сотрудник АО «ИРМ», кандидат технических наук: стр. 14: рекомендуется проверить оценку вклада в теплопроводность топлива фазы U_2N_3 , поскольку при 1400 °C эта фаза начинает диссоциировать, кроме того, с ростом выгорания количество Pu в СНУП-топливе падает и может косвенно повышать теплопроводность матрицы; ошибка значения дозы КЭТВС-7 (правильно – 73,6 сна); стр. 21: на рис. 11 обнуление графических зависимостей для выгорания 11 % т.а. вводит в заблуждение.

6. Луцик Игорь Олегович, главный специалист (по техническому развитию) ОИТПЭ энергоблока «БРЕСТ ОД 300» ОДЭК АО «СХК»: учитывая то, что к эксплуатационным пределам и пределам безопасной эксплуатации, как правило, относится такой параметр, как максимальная температура топлива, а не теплопроводность, в 4 и 5 главе рекомендуется привести сравнение кривых зависимостей максимальной температуры топлива, рассчитанной с использованием новых внедренных моделей в твэльный код БЕРКУТ-У и без их учета, что позволило бы оценить эффект от их внедрения на верхнеуровневый параметр безопасности. В представленной на рассмотрение редакции автореферата сравнение расчетной максимальной температуры топлива представлено лишь для твэла с газовым и свинцовым подслоем, без демонстрации эффекта от внедрения новых математических моделей.

7. Савандер Владимир Игоревич, доцент кафедры теоретической и экспериментальной физики ядерных реакторов (№ 5) Института ядерной физики и технологий НИЯУ МИФИ, кандидат физико-математических наук: интервал погрешностей для выхода газообразных продуктов деления ($[-26,4; +150 \text{ \%}]$) выглядит слишком широким, при этом отсутствуют пояснения, какие факторы вносят наибольший вклад в неопределенность и как их можно уменьшить.

8. Альмяшев Вячеслав Исаакович, начальник отдела исследований тяжелых аварий ФГУП «НИТИ им. А. П. Александрова», кандидат химических наук: в автореферате не приведена информация о химических формах, размере и положении в структуре топлива преципитатов, поэтому из текста автореферата не очень понятно, каким образом их влияние учтено при реализации модели.

По всем замечаниям соискателем были даны исчерпывающие ответы и детальные разъяснения.

Выбор официальных оппонентов и ведущей организации обосновывается тем, что Стегайлов Владимир Владимирович и Тарасов Борис Александрович являются известными учеными и признанными специалистами в области

исследования поведения ядерного топлива под облучением. АО «НИИ НПО «ЛУЧ» является одной из ведущих организаций по разработке и обеспечению атомной промышленности тепловыделяющими элементами и сборками для ядерных энергодвигательных установок, широким кругом прикладных и фундаментальных исследований. Кроме этого, выбор официальных оппонентов и ведущей организации обосновывается списком публикаций оппонентов и сотрудников АО «НИИ НПО «ЛУЧ» в ведущих научных рецензируемых изданиях.

Диссертационный совет отмечает, что на основании выполненных соискателем исследований:

- разработаны и внедрены в твэльный код БЕРКУТ-У модели учета влияния твердых фазовых включений (преципитатов) на теплопроводность СНУП топлива в процессе его выгорания и влияния открытой и закрытой пористости СНУП топлива на его распухание и выход газообразных продуктов деления и гелия;
- разработаны расчетные модели экспериментальных твэлов со СНУП топливом с газовым и жидкометаллическим подслоем для моделирования как с помощью твэльного кода БЕРКУТ-У, так и при расчётах в составе интегрального кода ЕВКЛИД/V2;
- разработана матрица валидации и проведена валидация твэльного кода БЕРКУТ-У на данных послереакторных исследований экспериментальных твэлов со СНУП топливом, облученных в быстрых реакторах БОР-60 и БН-600;
- выполнены расчёты по моделированию поведения нитридных твэлов под облучением в быстром реакторе с использованием разработанного и аттестованного твэльного кода БЕРКУТ-У и проведен анализ влияния технологических параметров СНУП топлива, а также эксплуатационной температуры топлива на его поведение в процессе выгорания в условиях облучения в быстром реакторе.

Теоретическая значимость исследования обоснована тем, что разработкой моделей и проведением расчетов расширены представления о поведении СНУП топлива при облучении в реакторах на быстрых нейтронах.

Значение полученных соискателем результатов исследования для практики подтверждается тем, что:

- усовершенствованные модели поведения СНУП топлива интегрированы в твэльный код БЕРКУТ-У, благодаря чему стало возможным обосновать продление облучения экспериментальных твэлов со СНУП топливом в реакторе БН-600 и получить экспериментальные данные вплоть до уровня выгорания 9 % тяж. ат.;

- валидация и аттестация кода БЕРКУТ-У позволила включить его в интегральный код ЕВКЛИД/V2 и использовать для обоснования безопасности АЭС с реакторными установками БРЕСТ-ОД-300 и БН-1200М;

- полученные новые результаты дают основу для оптимизации характеристик СНУП топлива и условий облучения.

Оценка достоверности результатов исследования выявила, что:

- применены научно обоснованные расчётные методики и физические модели поведения ядерного топлива;

- использованы современные экспериментальные данные по состоянию твэлов со СНУП топливом, облученных в реакторах на быстрых нейтронах БОР-60 и БН-600;

- установлено удовлетворительное согласие авторских результатов расчетов с результатами послереакторных исследований экспериментальных твэлов;

- расчетные исследования проведены с помощью аттестованного, то есть прошедшего процедуры верификации, валидации и определения разрешенной области применения, в Ростехнадзоре твэльного кода БЕРКУТ-У.

Личный вклад соискателя состоит в непосредственном участии во всех этапах работы, в том числе в анализе актуальности проблемы, постановке задач, личном участии в аналитических и расчетных исследованиях,

интерпретации полученных данных, подготовке основных публикаций по выполненной работе. Соискателем лично выполнено усовершенствование топливных моделей твэльного кода БЕРКУТ-У: разработаны эмпирические зависимости для расчёта параметров распухания СНУП топлива, выхода газообразных продуктов деления и гелия в зависимости от исходных характеристик топливных таблеток, а также реализована модель расчёта эффективной теплопроводности выгоревшего СНУП топлива; подготовлены расчетные модели твэлов со СНУП топливом с газовым и жидкометаллическим подслоем для моделирования с помощью кода БЕРКУТ-У; выполнена валидация кода БЕРКУТ-У на данных послереакторных исследований экспериментальных твэлов со СНУП топливом, облученных в быстрых реакторах БОР-60 и БН-600; проведен анализ влияния основных параметров СНУП топлива, а также эксплуатационной температуры на его поведение под облучением; сформулированы основные выводы и рекомендации по результатам работы.

В ходе защиты диссертации основной интерес членов диссертационного совета вызвали вопросы, касающиеся проведения анализа неопределенности и чувствительности результатов расчетов и выбора интервалов варьирования входных данных, а также модели расчета эффективной теплопроводности выгоревшего СНУП топлива и принятые в ней допущения.

Соискатель Задорожный Антон Валерьевич аргументированно ответил на все задаваемые ему в ходе заседания вопросы.

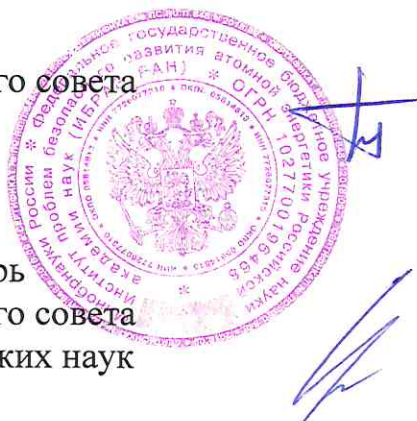
Диссертационный совет пришёл к выводу, что диссертация Задорожного Антона Валерьевича «Моделирование поведения смешанного нитридного уран-плутониевого топлива под облучением», представленная на соискание учёной степени кандидата технических наук по специальности «Ядерные энергетические установки, топливный цикл, радиационная безопасность» (2.4.9.), представляет собой законченную научно-квалификационную работу, которая соответствует критериям, установленным Положением о присуждении

учёных степеней, утвержденным Постановлением Правительства Российской Федерации от 24.09.2013 № 842 (в действующей редакции).

На заседании 27 ноября 2025 года диссертационный совет принял решение за решение на современном уровне знаний научной задачи по прогнозированию поведения СНУП топлива под облучением в реакторах на быстрых нейтронах и усовершенствование твэльного кода БЕРКУТ-У, имеющих важное значение для развития атомной энергетики с реакторами на быстрых нейтронах и, таким образом, существенное значение для развития страны, присудить Задорожному Антону Валерьевичу ученую степень кандидата технических наук по специальности «Ядерные энергетические установки, топливный цикл, радиационная безопасность» (2.4.9.).

При проведении тайного электронного голосования диссертационный совет в количестве 15 человек, из них 15 докторов наук по специальности 2.4.9. – «Ядерные энергетические установки, топливный цикл, радиационная безопасность», участвовавших в заседании, из 16 человек, входящих в состав совета, проголосовали: за – 15, против – 0, недействительных бюллетеней – 0.

Председатель
диссертационного совета
академик РАН



Большов Леонид Александрович

Ученый секретарь
диссертационного совета
доктор технических наук

Линге Игорь Иннокентьевич

27 ноября 2025 года