

Федеральное государственное бюджетное учреждение науки  
ИНСТИТУТ ПРОБЛЕМ БЕЗОПАСНОГО РАЗВИТИЯ АТОМНОЙ  
ЭНЕРГЕТИКИ РОССИЙСКОЙ АКАДЕМИИ НАУК  
(ИБРАЭ РАН)

На правах рукописи



**ЗАДОРЖНЫЙ АНТОН ВАЛЕРЬЕВИЧ**

**МОДЕЛИРОВАНИЕ ПОВЕДЕНИЯ СМЕШАННОГО  
НИТРИДНОГО УРАН-ПЛУТОНИЕВОГО ТОПЛИВА ПОД  
ОБЛУЧЕНИЕМ**

Специальность 2.4.9 – «Ядерные энергетические установки,  
топливный цикл, радиационная безопасность»

**АВТОРЕФЕРАТ**  
диссертации на соискание учёной степени  
кандидата технических наук

**МОСКВА – 2025**

Работа выполнена в Федеральном государственном бюджетном учреждении науки Институте проблем безопасного развития атомной энергетики Российской академии наук (ИБРАЭ РАН)

- НАУЧНЫЙ  
РУКОВОДИТЕЛЬ: Озрин Владимир Драганович,  
кандидат физико-математических наук  
старший научный сотрудник ИБРАЭ РАН
- ОФИЦИАЛЬНЫЕ  
ОППОНЕНТЫ: Стегайлов Владимир Владимирович, доктор физико-  
математических наук, Объединенный институт  
высоких температур Российской академии наук  
(ОИВТ РАН), заведующий отделом;  
Тарасов Борис Александрович, кандидат технических  
наук, Акционерное общество  
«Высокотехнологический научно-исследовательский  
институт неорганических материалов имени  
академика А. А. Бочвара» (АО «ВНИИНМ»),  
руководитель проекта.
- ВЕДУЩАЯ  
ОРГАНИЗАЦИЯ: Акционерное общество «Научно-исследовательский  
институт научно-производственное объединение  
«ЛУЧ» (АО «НИИ НПО «ЛУЧ»).

Защита состоится 27 ноября 2025 года в 15:30 на заседании диссертационного совета 24.1.496.01 при Федеральном государственном бюджетном учреждении науки Институте проблем безопасного развития атомной энергетики Российской академии наук по адресу: 115191, г. Москва, ул. Б. Тульская, д. 52.

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке Федерального государственного бюджетного учреждения науки Института проблем безопасного развития атомной энергетики Российской академии наук и на сайте по ссылке <https://www.ibrae.ac.ru/contents/652/>

Автореферат разослан «\_\_» \_\_\_\_\_ 2025 г.

Ученый секретарь диссертационного совета  
24.1.496.01,  
д.т.н.



И.И. Линге

## ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

### Актуальность темы исследования

В соответствии с Энергетической стратегией России на период до 2035 г. в стране должны быть спроектированы и построены инновационные атомные электрические станции (АЭС) с реакторами на быстрых нейтронах с жидкометаллическими теплоносителями, например, такими как БРЕСТ-ОД-300 и БР-1200 (свинцовый теплоноситель), а также БН-1200М (натриевый теплоноситель). Госкорпорацией «Росатом» реализуется проектное направление «Прорыв», нацеленное на создание и промышленную реализацию замкнутого ядерного топливного цикла на базе быстрых реакторов с использованием тепловыделяющих элементов (ТВЭлов) со смешанным нитридным уран-плутониевым (СНУП) топливом. СНУП топливо рассматривается в качестве основного топливного материала для Опытно-демонстрационного энергокомплекса с быстрым реактором БРЕСТ-ОД-300, сооружаемым на базе Сибирского химического комбината в г. Северск. Установлено, что СНУП топливо будет предпочтительнее с точки зрения его:

- высокой плотности, теплопроводности и температуры плавления;
- совместимости с большинством материалов, включая сталь (материал оболочки ТВЭла) и жидкий свинец или натрий (теплоносители).

Следует отметить, что с советских времен и по настоящее время Россия удерживает первенство по разработке и эксплуатации реакторных установок (РУ) с экспериментальными и энергетическими реакторами на быстрых нейтронах с натриевым теплоносителем. Единственные действующие <sup>1</sup> (по данным на начало 2025 г.) в мире энергетические быстрые реакторы – БН-600 и БН-800, при этом основным топливом для них является урановое оксидное и смешанное оксидное уран-плутониевое (МОКС) топливо соответственно. За время их эксплуатации накоплено большое количество экспериментальных данных, предоставляющих базу для отработки теоретических подходов и валидации различных компьютерных расчетных кодов. В частности, наряду с исследовательским быстрым реактором БОР-60, в БН-600 также проводятся испытания экспериментальных ТВЭлов со СНУП топливом. Однако СНУП топливо недостаточно исследовано и испытано до высоких выгораний <sup>2</sup>, для этого потребуется еще не один год. В связи с этим, на данный момент до получения результатов экспериментальных исследований важно использовать, так называемые, ТВЭльные расчетные коды для моделирования поведения ТВЭлов под облучением, которые могут служить

---

<sup>1</sup> Новый китайский быстрый реактор CFR-600 находится в опытно-промышленной эксплуатации.

<sup>2</sup> По данным на начало 2025 г. СНУП топливо прошло испытание до максимального выгорания топлива около 9,9 % тяж. ат. (ТВЭл ОУ-10 в реакторе БОР-60).

ценным инструментом в предсказании поведения СНУП топлива при различных условиях эксплуатации реактора.

Обязательным требованием любой деятельности в области использования атомной энергии является обеспечение безопасности. Требования к обеспечению безопасности определяются федеральными нормами и правилами в области использования атомной энергии. В соответствии с ними безопасность эксплуатации АЭС должна быть обоснована путём проведения детерминистических и вероятностных анализов безопасности и сопровождаться оценками интервалов неопределенностей получаемых результатов. Поэтому, в частности, необходимо предварительное обоснование (прогнозирование) работоспособности твэлов со СНУП топливом при облучении в быстром реакторе, которое осуществляется посредством использования в том числе твэльных кодов.

Научно-техническая проблема, на решение которой направлена данная диссертационная работа, заключается в 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. В частности процессы, протекающие в СНУП топливе: наработка и выход продуктов деления (ПД) из топлива и его распухание.

Примером такого расчетного средства является код БЕРКУТ-У (Быстрый энЕргетический Реактор Код Улучшенный Топливный-Усовершенствованный). БЕРКУТ-У – твэльный код, разрабатываемый с 2012 г. в ИБРАЭ РАН для моделирования поведения оксидных или нитридных твэлов в быстрых реакторах с жидкометаллическим теплоносителем. Механистические модели описания поведения ядерного топлива кода БЕРКУТ-У основаны на современных представлениях о механизмах, управляющих основными физико-химическими процессами, протекающими в топливе при облучении, что существенно повышает предсказательную способность такого кода по сравнению с другими.

Настоящая диссертационная работа направлена на усовершенствование в твэльном коде БЕРКУТ-У математических моделей поведения СНУП топлива под облучением, валидацию кода на экспериментальных данных, а также на расчетное исследование и анализ результатов моделирования поведения топлива. Конечной стратегической целью является обеспечение специалистов атомной отрасли аттестованным расчетным инструментом, позволяющим описывать поведение нитридных

твэлов под облучением в быстрых реакторах, для восполнения пробелов из-за ограниченности экспериментальной базы или использования его в качестве твэльного модуля в интегральных расчетных кодах, предназначенных для анализа и обоснования безопасности АЭС.

### **Цель и задачи исследования**

Целью диссертационной работы – усовершенствование твэльного кода БЕРКУТ-У в части моделей поведения СНУП топлива под облучением в быстром реакторе и его валидация на данных послереакторных исследований (ПРИ) экспериментальных твэлов со СНУП топливом.

Для достижения поставленной цели сформулированы и решены следующие задачи:

- анализ и обобщение научных работ и результатов исследований других авторов по теме диссертационной работы, сбор экспериментальных данных и информации о проводимых расчетных исследованиях (моделировании) СНУП топлива;

- разработка и внедрение в твэльный код БЕРКУТ-У модели учета влияния твердых фазовых включений (преципитатов) на теплопроводность СНУП топлива в процессе его выгорания (расчёт эффективной теплопроводности топлива);

- разработка и внедрение в твэльный код БЕРКУТ-У моделей, учитывающих влияние открытой и закрытой пористости СНУП топлива на его распухание и выход газообразных продуктов деления (ГПД) и гелия;

- разработка расчетных моделей экспериментальных твэлов со СНУП топливом с газовым и жидкометаллическим подслоем;

- разработка матрицы валидации и проведение валидации твэльного кода БЕРКУТ-У на данных ПРИ экспериментальных твэлов со СНУП топливом, облученных в быстрых реакторах БОР-60 и БН-600;

- выполнение детерминистских и многовариантных расчётов по моделированию поведения нитридных твэлов под облучением в быстром реакторе с использованием разработанного твэльного кода БЕРКУТ-У и анализ полученных результатов;

- анализ влияния технологических параметров СНУП топлива, а также эксплуатационной температуры топлива на его поведение в процессе выгорания в условиях облучения в быстром реакторе.

### **Научная новизна работы**

Впервые в твэльный код БЕРКУТ-У внедрена модель учета влияния твердых фазовых включений (преципитатов) на теплопроводность СНУП топлива в процессе его выгорания.

Впервые на основе сравнительного анализа данных исследований экспериментальных твэлов со СНУП топливом и результатов расчетов кода БЕРКУТ-У получены эмпирические зависимости параметров моделей, учитывающие влияние открытой и закрытой пористости топлива на его

распухание, выход ГПД и гелия от исходных параметров топливных таблеток.

Впервые выполнена валидация твэльного кода БЕРКУТ-У на данных ПРИ твэлов и определены значения погрешностей расчёта распухания СНУП топлива и выхода газов из него.

Впервые с помощью твэльного кода БЕРКУТ-У проанализированы и определены параметры СНУП топлива, существенно влияющие на его поведение в процессе выгорания в условиях облучения в быстрых реакторах.

### **Практическая значимость работы**

Усовершенствованные модели поведения СНУП топлива были включены в твэльный код БЕРКУТ-У, который используется для обоснования возможности продления облучения экспериментальных твэлов со СНУП топливом в реакторе БН-600, что позволило получить результаты экспериментальных исследований СНУП топлива до 9 % тяж.ат.

На базе полученных автором работы данных твэльный код был аттестован в 2021 г. (аттестационный паспорт регистрационный №533 от 13.11.2021 г.) в том числе для моделирования твэлов со СНУП топливом до 12,1% выгорания тяж.ат., что позволило аттестовать интегральный код ЕВКЛИД/V2 с кодом БЕРКУТ-У в качестве твэльного модуля. Код ЕВКЛИД/V2 используется для обоснования безопасности АЭС с РУ БРЕСТ-ОД-300 и БН-1200М при тяжелых авариях.

Разработанные расчетные модели экспериментальных твэлов использованы для проведения валидации кода БЕРКУТ-У, а также применимы для расчетов кодом БЕРКУТ-У в качестве твэльного модуля в составе интегрального кода ЕВКЛИД/V2.

Результаты расчета кодом БЕРКУТ-У основных параметров СНУП топлива использовались для интерпретации результатов ПРИ и формирования предложений по оптимизации параметров СНУП топлива.

Результаты, полученные, в том числе, в ходе данного исследования, позволили обеспечить организации атомной отрасли современным аттестованным твэльным кодом БЕРКУТ-У, обеспечивающим расчётное обоснование работоспособности твэлов действующих и проектируемых РУ с быстрыми реакторами с натриевым или свинцовым теплоносителями.

### **Основные положения, выносимые на защиту**

Модель, учитывающая влияние твердых фазовых включений (преципитатов) на теплопроводность выгоревшего СНУП топлива.

Модели, учитывающие влияние открытой и закрытой пористости СНУП топлива на его распухание, выход ГПД и гелия.

Расчетные модели экспериментальных твэлов со СНУП топливом с газовым и жидкометаллическим подслоем, необходимые для расчетов с помощью кода БЕРКУТ-У.

Результаты валидации кода БЕРКУТ-У на данных ПРИ экспериментальных твэлов со СЛУП топливом, облученных в быстрых реакторах БОР-60 и БН-600.

Результаты моделирования и анализа влияния параметров СЛУП топлива (размер топливного зерна), а также эксплуатационной температуры на его поведение под облучением.

### **Достоверность и обоснованность результатов работы**

Достоверность и обоснованность результатов работы подтверждается:

– сравнением результатов расчетов с данными ПРИ экспериментальных твэлов со СЛУП топливом, облученных в быстрых реакторах;

– применением научно-обоснованных расчётных методик и физических моделей. Расчетные исследования проведены с помощью аттестованного в Ростехнадзоре твэльного кода БЕРКУТ-У;

– публикацией результатов в рецензируемых научных журналах и представлением на ведущих российских и международных конференциях и семинарах.

### **Личный вклад автора**

Постановка задач исследования, поиск в открытых публикациях, анализ и обобщение научных работ и результатов исследований других авторов по теме диссертационной работы.

Разработка эмпирических зависимостей параметров моделей набухания СЛУП топлива, выхода ГПД и гелия от исходных параметров топливных таблеток.

Подготовка расчетных моделей твэлов со СЛУП топливом с газовым и жидкометаллическим подслоем для расчетов с помощью твэльного кода БЕРКУТ-У.

Разработка и программная реализация в твэльном коде БЕРКУТ-У модели расчета эффективной теплопроводности выгоревшего СЛУП топлива.

Разработка матрицы валидации для твэльного кода БЕРКУТ-У и его валидация на данных ПРИ экспериментальных твэлов со СЛУП топливом, облученных в быстрых реакторах БОР-60 и БН-600.

Проведение с помощью твэльного кода БЕРКУТ-У детерминистских расчетов и анализ влияния основных параметров СЛУП топлива, а также эксплуатационной температуры на его поведение под облучением.

### **Апробация работы**

Результаты диссертации докладывались и обсуждались на следующих российских и международных конференциях и семинарах:

– XX, XXII научные школы молодых ученых ИБРАЭ РАН, г. Москва, Россия, 2019 г. и 2023 г.;

- Международная научная конференция студентов, аспирантов и молодых учёных «Ломоносов-2019», г. Москва, Россия, 2019 г.;
- 63-я Всероссийская научная конференция МФТИ, г. Москва, Россия, 2020 г.;
- Международная конференция молодых специалистов, ученых и аспирантов по физике ядерных реакторов «Волга-2020» (ICNPR-2020), г. Москва, Россия, 2020 г.;
- International Conference on Fast Reactors and Related Fuel Cycles: Sustainable Clean Energy for the Future (FR-22), Vienna, Austria, 2022;
- Молодежная научно-практическая конференция АО «ВНИИНМ» «Материалы и технологии в атомной энергетике», г. Москва, Россия, 2022 г.;
- XII Международная конференция по реакторному материаловедению, посвященная 60-летию материаловедческого комплекса АО «ГНЦ НИИАР», г. Казань, Россия, 2024 г.;
- Workshop on Fuel Performance Assessment and Behaviour for Liquid Metal Cooled Fast Reactors, Vienna, Austria, 2025.

### **Публикации**

По теме диссертации опубликовано 10 научных работ, из них 4 статьи в журналах из перечня, утвержденного ВАК Минобрнауки России, или входящих в международные реферативные базы данных и системы цитирования Scopus и Web of Science, 6 – в материалах российских и международных конференций и семинаров.

### **Структура и объем диссертации**

Диссертация состоит из введения, 5 глав, заключения и списка литературы из 113 библиографических ссылок. Общий объем работы составляет 120 страниц, включая 10 таблиц и 40 рисунков.

### **ОСНОВНОЕ СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ**

Во **введении** обоснована актуальность темы диссертационной работы, сформулированы цель и задачи исследования, представлены научная новизна и практическая значимость работы, достоверность результатов, личный вклад автора, информация об апробации работы, перечислены основные положения, выносимые на защиту.

В **первой главе** приведен обзор литературных данных, посвященных СНУП топливу: представлены общие сведения о нитридном топливе, о его промышленном производстве, приведена информация о моделировании поведения топлива под облучением в реакторе и о кодах-аналогах твэльного кода БЕРКУТ-У. Представлены результаты реакторных испытаний СНУП топлива в быстрых реакторах. Описана возможность использования жидкометаллического подслоя в твэлах со СНУП топливом.

В настоящее время основным методом промышленного получения смешанных монокридов урана и плутония является реакция

карботермического синтеза, что приводит к неизбежному наличию в нём примесей кислорода и углерода, обычно, на уровне  $\sim 0,1-0,2$  % по массе. Наличие примесей может влиять как на поведение самого топлива в процессе облучения, так и на ТВЭЛ в целом путем коррозионного воздействия (в частности, кислорода) на внутреннюю поверхность оболочки ТВЭЛА.

Наряду с экспериментальными исследованиями существует возможность компьютерного моделирования поведения топлива и ТВЭЛА в целом с помощью расчетных твэльных кодов. Основная цель твэльных кодов заключается в расчетном обосновании работоспособности твэлов. Это достигается путем моделирования поведения твэла с учетом внешних факторов и основных физических процессов, которые происходят в топливе и оболочке твэла под облучением в реакторе.

Анализ литературы показывает, что зарубежные страны ориентированы на использование МОКС топлива в быстрых реакторах. Поэтому существующие зарубежные твэльные расчетные коды ориентированы на моделирование поведения под облучением твэлов именно с таким топливом. Зарубежными аналогами кода БЕРКУТ-У, которые можно классифицировать как механистические и сопоставимые по возможностям моделирования, являются такие коды, как BISON (INL, США), GERMINAL (CEA/DEC, Франция) и TRANSURANUS (ITU, Германия). Отечественными кодами-аналогами по части моделирования твэлов быстрых реакторов являются расчетные коды ДРАКОН-М (АО «ГНЦ РФ – ФЭИ») и КОРАТ-Конструктор (АО «ВНИИНМ», НИЦ «Курчатовский институт»). Как и код БЕРКУТ-У, коды ДРАКОН-М и КОРАТ-Конструктор имеют возможность моделировать твэлы со СНУП топливом, при этом код БЕРКУТ-У отличается от аналогов наличием усовершенствованного топливного модуля MFPR/R, с помощью которого описываются наработка и радиоактивные взаимопревращения и миграция ПД в топливе, внутризёренный и межзёренный перенос радиоактивных ПД, термохимические превращения в топливе, включая распределение ПД по молекулярным и фазовым состояниям, формирование пористости, эволюцию микроструктуры топлива и его набухание, как газовое, так и твердотельное, выход радиоактивных ПД под оболочку твэла и их перераспределения в зазоре «таблетки–оболочка».

Для обеспечения достоверности получаемых расчетных результатов с помощью кода БЕРКУТ-У необходимо проведение его валидации на данных ПРИ экспериментальных твэлов, облучаемых в быстрых реакторах. Это позволяет подтвердить корректность и надежность математических моделей, используемых в коде. В течение 2016 – 2024 гг. в АО «ГНЦ НИИАР» были получены данные ПРИ экспериментальных нитридных твэлов сборок КЭТВС-1, 2, 3, 6, 7, ЭТВС-4, 5, 8, 9, 10, 11, 12, 13, 14, 16, 17 и

18, облученных в реакторе БН-600, а также твэлов ОУ-1, 2 и 4, облученных в реакторе БОР-60. В результате были получены данные по таким основным параметрам как геометрические размеры (аксиальные и радиальные) топливных таблеток и оболочек твэлов, количество ГПД и гелия, давление под оболочкой твэла, набухание и пористость топлива, радиальное распределение пористости и ПД по таблетке. Все эти данные использовались для валидации твэльного кода БЕРКУТ-У.

Возможность использования жидкометаллического подслоя (свинца) внутри твэла обеспечивает высокую теплопроводность зазора «топливо–оболочка» и, соответственно, более низкую температуру топлива в процессе его облучения в реакторе. Данный факт заставляет задуматься о дополнительных экспериментальных и расчетных исследованиях.

Во **второй главе** приведено описание твэльного кода БЕРКУТ-У: общая информация о коде, его архитектуре и взаимодействии модулей, объекте моделирования и его расчетной схеме.

Расчетный твэльный код БЕРКУТ-У предназначен для самосогласованного моделирования тепловых, механических, физико-химических процессов, протекающих в твэле с оксидным или нитридным топливом с газовым или жидкометаллическим подслоем в режимах нормальной эксплуатации и нарушений нормальной эксплуатации быстрого реактора.

Объектом моделирования кода БЕРКУТ-У является стержневой твэл с таблеточным оксидным (диоксид урана или МОКС) или нитридным топливом (нитридное урановое или СНУП) с газовым или жидкометаллическим подслоем. Исходная геометрия твэла, параметры топлива (плотность, изотопный состав, содержание примесей, размер топливного зерна), временные зависимости линейной мощности, скорости набора дозы в оболочке твэла и температуры теплоносителя используются при разработке расчетных моделей твэлов и задаются в качестве исходных данных во входном файле кода.

В результате обобщения, систематизации и анализа отобранных и признанных надёжными экспериментальных данных и опыта эксплуатации твэлов в России и за рубежом определен перечень процессов и явлений для твэлов быстрых реакторов с жидкометаллическим теплоносителем, которые должны моделироваться для корректного описания режимов нормальной эксплуатации реакторных установок. К общим определяющим процессам и явлениям при нормальной эксплуатации быстрых реакторов отнесены:

- зависимость свойств материалов твэла от температуры, выгорания и радиационной поврежденности;
- распределение температуры в твэле (в топливе, в материале наполнителя, оболочке);

- доспекание/распухание топливных таблеток, распухание оболочки твэла при облучении;
- образование, накопление и миграция ПД;
- изменение давления и состава газа под оболочкой твэла из-за выхода ГПД и гелия;
- эволюция напряженно-деформированного состояния (НДС) твэла;
- механическое взаимодействие топлива и оболочки (МВТО) при закрытии зазора.

Для обеспечения эффективной работы с твэльным кодом БЕРКУТ-У, упрощения его разработки и поддержки, была реализована его модульная архитектура (рисунок 1).



Рисунок 1 – Модульная архитектура кода БЕРКУТ-У

Код БЕРКУТ-У является мультимасштабным, в котором моделируемые процессы и явления характеризуются диапазоном их варьирования от 1 нм до 1 м.

Микромасштаб (масштаб топливного зерна):

- эволюция микроструктуры дефектов топлива;
- зарождение и рост газонаполненной пористости;
- генерация ПД, их радиоактивные превращения и внутризеренный транспорт;
- образование химических соединений и их распределение по конденсированным фазам.

Мезомасштаб (масштаб топливной таблетки):

- межзеренный транспорт и выход ПД из таблетки;
- эволюция исходной пористости и образование столбчатой структуры;
- образование отложений на поверхности топлива;
- деформация и растрескивание таблетки;

Макромасштаб (масштаб твэла):

- теплопередача и теплообмен с теплоносителем;

- изменение давления газа внутри твэла;
- изменение геометрии твэла, возникновение деформаций и напряжений;
- закрытие зазора, МВТО и возможное повреждение оболочки.

Согласно расчётной схеме (рисунок 2) в коде БЕРКУТ-У весь твэл в общем случае разбивается на пять отдельных зон: нижний и верхний компенсационные объемы, нижний и верхний торцевые экраны и активная часть твэла. Любая из зон, кроме активной части, могут отсутствовать. Каждая зона разбивается на некоторое количество осевых ячеек, которые в свою очередь разбиваются на цилиндрические слои для центрального отверстия в таблетки (при наличии), таблетки, зазора и оболочки твэла.

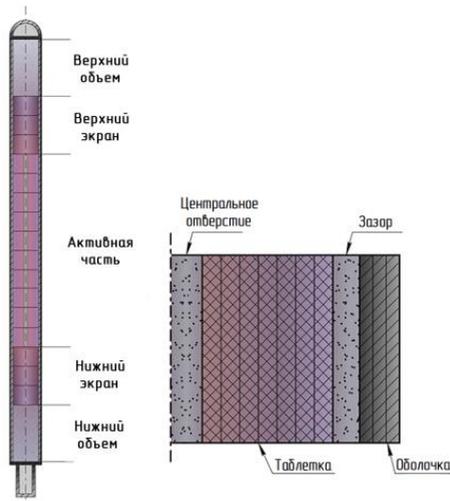


Рисунок 2 – Расчётная схема твэла для кода БЕРКУТ-У

В **третьей главе** приведено описание усовершенствований и доработок отдельных моделей поведения топлива кода БЕРКУТ-У.

Одними из топливных параметров, косвенно определяющих состояние и поведение твэла, являются распухание топлива, выход из него ГПД и гелия в свободный объем под оболочку твэла.

Анализ получаемых экспериментальных данных ПРИ твэлов со СНУП топливом показал, что в моделях кода БЕРКУТ-У поведения топлива при моделировании необходим учет его закрытой и открытой пористости. В связи с этим была выполнена работа по модификации моделей распухания топлива и выхода газов из него.

Изначально в модели выхода ГПД кода БЕРКУТ-У производился учет захвата ГПД (ксенона (Xe) и криптона (Kr)), выходящих из топлива, закрытой технологической пористостью. В модели предполагалось, что в начале облучения, когда еще не сформировалась межзеренная пористость,

весь газ захватывается (напрямую или в результате быстрой зернограничной диффузии газа) технологическими порами. Однако по мере роста выгорания и формирования открытой пористости доля ГПД, захватываемая порами, снижается.

В усовершенствованной модели теперь учитывается, что часть  $x_{OP}$  потока  $J_{gr}$  ГПД, выходящих из топливных зерен ( $J_{gr \rightarrow OP} = x_{OP} J_{gr}$ ), непосредственно попадает в свободный объем твэла в результате захвата открытой пористостью, а также в результате прямого (выбивание, отдача) и диффузионного выхода из приповерхностных областей таблетки. Эта часть потока ГПД из зерна определяется отношением полной площади поверхности таблетки к геометрической, а также долей открытой пористости топлива. Ввиду больших неопределенностей этих характеристик топлива, величина  $Xe_r$  рассматривается как эмпирический (феноменологический) параметр, который фиксируется по результатам предварительной валидации кода. Оставшаяся часть  $(1 - x_{OP}) J_{gr}$  потока ГПД частично  $x_{CP}$  захватывается закрытыми технологическими порами, а частично перераспределяется между радиационно-индуцированными пузырями на границе зерен. Поток  $J_{gr}$ , захватываемый закрытыми технологическими порами, представляется как:

$$J_{gr \rightarrow CP} = (1 - x_{OP}) x_{CP} J_{gr}, \quad (1)$$

$$x_{CP} = \frac{1}{1 + b / b_{\max}}. \quad (2)$$

где  $b$  – выгорание топлива,  $b_{\max}$  – эмпирический (феноменологический) параметр, определяемый по результатам предварительной валидации кода.

В модели кода распухание (изменение объема топливной таблетки  $\Delta V$ ), которое возникает в процессе облучения, представлено в виде суммы:

$$\Delta V = \Delta V_{gs} + \Delta V_{ss}, \quad (3)$$

где  $\Delta V_{gs}$  – газовое распухание, определяемое суммарным объемом внутри- и межзёренных газовых пузырей и пор,  $\Delta V_{ss}$  – твердотельное распухание, связанное с процессами распада актинидов и накоплением ПД в топливе в конденсированном виде. В отличие от потока в закрытые поры в виде атомов, поток в виде газовых пузырей приводит к распуханию закрытых пор в топливе, что учтено при усовершенствовании топливных моделей.

Еще одним усовершенствованием кода стало обновление модели теплопроводности СНУП топлива: в отличие от ранее использовавшейся корреляционной зависимости (ввиду отсутствия экспериментальных данных), новая модель учитывает влияние выгорания топлива, а именно –

влияние накопления ПД и образование вторичных конденсированных фаз в топливе на его теплопроводность. В рамках данной работы в коде реализован учет влияния выгорания топлива (расчет  $\lambda_{эфф}$  эффективной теплопроводности СНУП топлива) в рамках обобщенной теории теплопроводности гетерогенной системы с изолированными конденсированными фазами (в частности твердыми фазовыми включениями (преципитатами), моделируемыми кодом БЕРКУТ-У).

$$\lambda_{эфф} = \lambda_m \times \left\{ 1 - \sum_{k=1}^{N_{фаз}} V_k \left( \frac{1}{1 - \lambda_k / \lambda_m} - \frac{V_m}{3} \right)^{-1} \right\}; \sum_{k=1}^{N_{фаз}} V_k + V_m = 1, \quad (4)$$

где  $\lambda_m$ ,  $\lambda_k$  – коэффициенты теплопроводности однородной матрицы и преципитатов соответственно;  $V_m$ ,  $V_k$  – объемные доли матрицы и преципитатов соответственно.

Расчеты по коду БЕРКУТ-У с использованием доработанной модели теплопроводности показали, что с увеличением выгорания топлива при постоянной температуре его теплопроводность падает из-за образования вторичных фаз (рисунок 3).

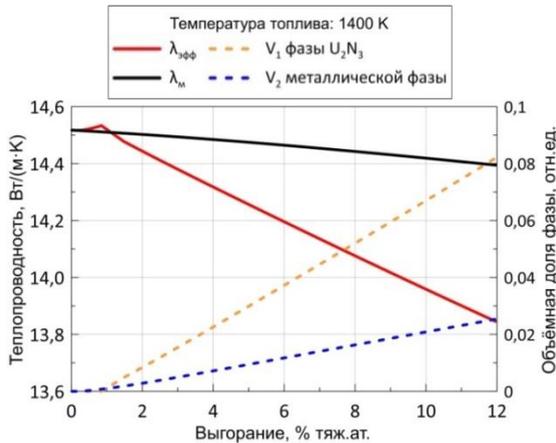


Рисунок 3 – Изменение теплопроводности СНУП топлива с его выгоранием

В четвертой главе приведены результаты моделирования поведения экспериментальных твэлов и валидации кода БЕРКУТ-У на данных ПРИ.

Валидация кода БЕРКУТ-У в рамках подготовки обосновывающих материалов для его аттестации была проведена на данных ПРИ экспериментальных нитридных твэлов сборок КЭТВС-1, 2, 3, 6, 7, ЭТВС-4, 5, 8, 9, 10, 11, 12, 13, 14, 16, 17 и 18, облученных в реакторе БН-600, а также ОУ-1, 2 и 4, облученных в реакторе БОР-60. Экспериментальные данные были получены в рамках Комплексной программы расчетно-

экспериментального обоснования плотного топлива для быстрых реакторов. При валидации кода анализировались такие параметры как геометрические размеры (аксиальные и радиальные) топливных таблеток и оболочки твэла, количество ГПД и гелия, давление под оболочкой твэла, распухание и пористость топлива, радиальное распределение пористости и содержания ПД по таблетке.

В диссертационной работе приведены результаты валидации для распухания и выхода газов с использованием данных двух типов экспериментальных ТВС (ЭТВС): комбинированная сборка № 1 и № 7 содержащие твэлы типаразмера реактора БН-600 и сборка № 5 – твэлы типаразмера реактора БРЕСТ-ОД-300. Отличительными особенностями твэлов представленных ЭТВС являются их геометрические параметры и соответствующие размеры топливных таблеток (таблица 1).

Таблица 1 – Параметры и условия облучения твэлов со СНУП топливом

Параметр	КЭТВС-1	КЭТВС-7	ЭТВС-5
Диаметр оболочки, мм	6,9 <sup>±0,03</sup> /	6,9 <sup>±0,03</sup> /	9,7 <sup>±0,03</sup> /
наружный/внутренний	6,1 <sup>±0,03</sup>	6,1 <sup>±0,03</sup>	8,7 <sup>±0,03</sup>
Диаметр таблетки, мм	5,8 <sup>-0,1</sup>	5,9 <sup>-0,1</sup>	8,5 <sup>-0,1</sup>
Материал оболочки	ЧС68-ИД х.д.	ЧС68-ИД х.д.	ЭП823-Ш
Число микрокапаний	3	2	4
Макс. линейная мощность, кВт/м	38,3	38,3	40,0
Макс. выгорание, % тяж. ат.	5,5	7,5	3,8
Максимальная доза, сна	55,0	34,0	48,0

В рамках подготовки обосновывающих материалов кода БЕРКУТ-У для сравнения с экспериментальными данными для каждого твэла были выполнены как детерминистские, так и статистические расчеты. В диссертационной работе приведены результаты статистических расчетов.

При моделировании поведения твэлов использовались параметры с базовыми значениями, приведёнными в таблице 1. Кроме того, предполагалось, что начальная плотность топлива составляет ~85 % от теоретического значения (пористость ~15 %), которое содержит 14 % плутония, ~0,1 % примесей углерода и ~0,1 % – кислорода, а размер топливного зерна – 10 мкм. Модельные условия облучения соответствовали данным из таблицы 1; максимальная температура оболочки твэла полагалась равной 638 °С.

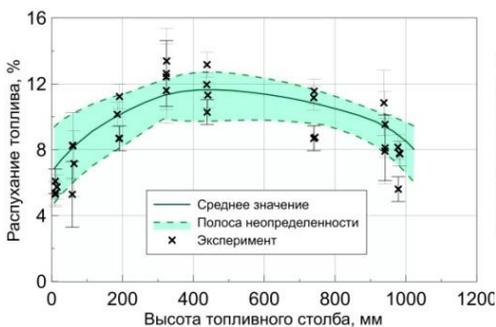
Поскольку неопределенности в данных об изготовлении твэлов и условиях облучения вносят погрешность в расчетные результаты, на моделируемые характеристики топлива и оболочки влияют условия облучения и геометрические параметры твэлов. Для экспериментов со СНУП топливом был составлен перечень варьируемых параметров и определены диапазоны их варьирования от базовых значений (таблица 2).

Таблица 2 – Варьируемые параметры для моделирования экспериментов со смешанным нитридным топливом

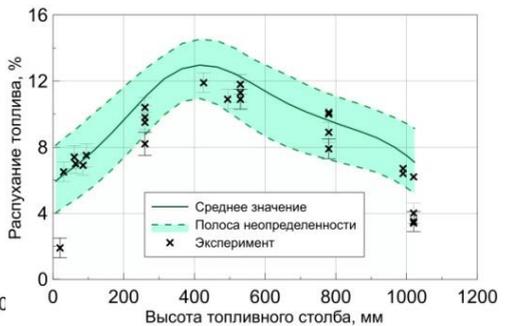
Параметр	Диапазон варьирования
Максимальная мощность тепловыделения	$\pm 10\%$
Максимальная температура оболочки	$\pm 50\text{ }^\circ\text{C}$
Внутренний диаметр оболочки	$\pm 0,03\text{ мм}$
Внешний диаметр оболочки	$\pm 0,03\text{ мм}$
Диаметр топливных таблеток	$\pm 0,05\text{ мм}$
Плотность топлива	$\pm 1,0\%$ теор.
Размер топливных зерен	$\pm 50\%$
Содержание плутония в топливе	$\pm 0,5\%$
Содержание кислорода в топливе	$\pm 60\%$
Содержание углерода в топливе	$\pm 30\%$

Входные параметры варьировались одновременно в соответствующих диапазонах и генерировались исходя из нормального распределения. В результате были получены расчетные интервалы (полосы) неопределенности распухания СНУП топлива и выхода ГПД (количества под оболочкой твэла). Поскольку твэлы КЭТВС-1, КЭТВС-7 и ЭТВС-5 в одной ТВС имели сходные технологические характеристики и условия облучения, то в этих экспериментах рассчитанные результаты усреднялись отдельно для каждой ЭТВС.

Сравнение расчетных данных по максимальному распуханию топлива (рисунок 4) и выходу ГПД (ксенон и криптон) из топлива (рисунок 5) с результатами ПРИ для четырех экспериментальных твэлов каждой сборки эксперимента показывает, что для всех случаев код удовлетворительно описывает данные процессы и воспроизводит поведение топлива. Следует отметить, что большинство результатов ПРИ лежит между максимальным и минимальным значениями, рассчитанными при анализе неопределенности.



а)



б)

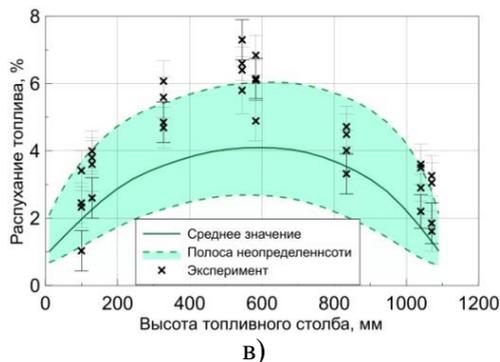


Рисунок 4 – Результаты анализа неопределенности распухания топлива в сравнении с экспериментом в твэлах КЭТВС-1 (а), КЭТВС-7 (б) и ЭТВС-5 (в)

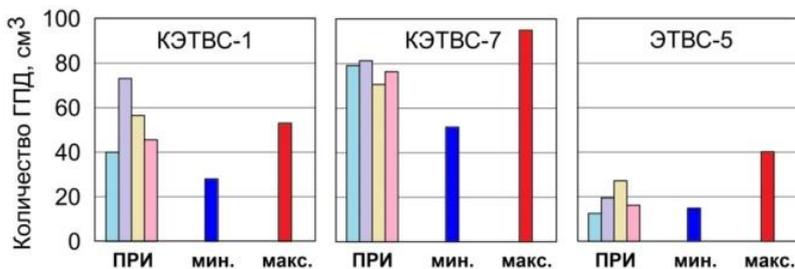


Рисунок 5 – Результаты анализа неопределенности количества ГПД в сравнении с экспериментом в твэлах КЭТВС-1, КЭТВС-7 и ЭТВС-5

Помимо сравнения данных по каждому экспериментальному твэлу отдельно, проведен совместный анализ всех данных по максимальному распуханию топлива, количеству ГПД и гелия в свободном объеме для всех экспериментальных твэлов, данные по которым использовались при валидации кода (рисунок 6). Анализ показал, что расчетные данные удовлетворительно согласуются с соответствующими экспериментальными значениями. Большая их часть лежит на диагонали, и почти все точки лежат в пределах коридора среднеквадратичного отклонения. Значительные отклонения, особенно в выходе ГПД, с большой вероятностью связаны с отсутствием в материалах ПРИ данных об исходном состоянии топлива, а именно о соотношении закрытой и открытой пористости. Параметр модели соотношения закрытой и открытой пористости был фиксирован и не варьировался в данных расчетах.

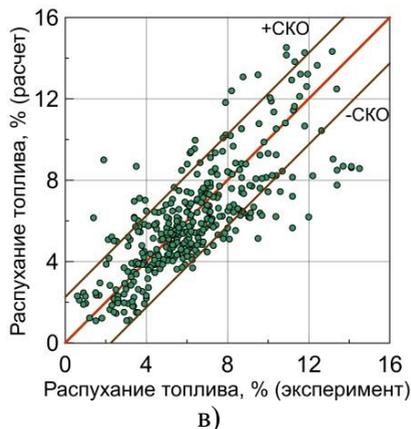
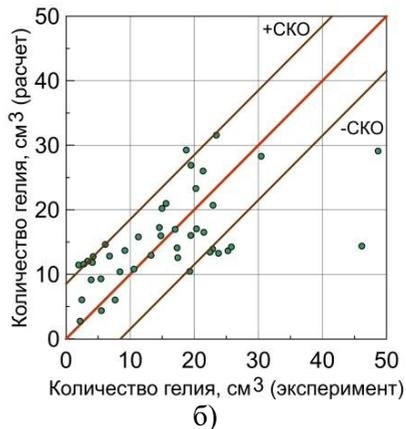
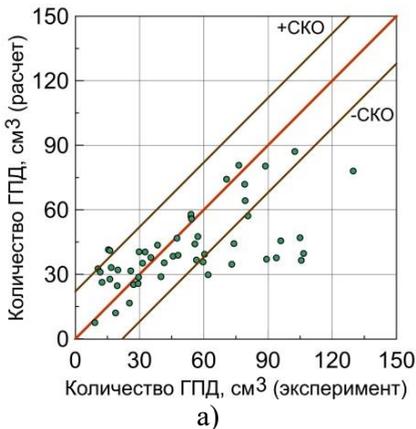


Рисунок 6 – Результаты расчетов и измерений выхода ГПД (а), гелия (б) из топлива и его распухания (в)

Интервалы значений погрешностей для выхода ГПД и гелия, распухания СНУП топливом, полученных в результате валидации кода с учетом неопределенностей измерений в эксперименте, равны  $[-26,4; +150,0]$ ,  $[-11,7; +21,3]$  и  $[-19,7; +48,3]$  % соответственно. Область определения кодом этих параметров по выгоранию топлива по итогам валидации принята до 12,1 % тяж.ат.

Сравнение расчетных результатов с данными ПРИ свидетельствует о том, что твэльный код БЕРКУТ-У позволяет удовлетворительно прогнозировать параметры твэлов со СНУП топливом при облучении в быстрых реакторах. По итогам экспертизы обосновывающих материалов код БЕРКУТ-У был аттестован в Ростехнадзоре и получен аттестационный паспорт регистрационный №533 от 13.11.2021.

В пятой главе исследуется влияние различных характеристик твэла на его поведение под облучением. В частности влияние размера топливного

зерна на твердотельное и газовое распухание топлива (рисунок 7) и выход газов из него (рисунок 8) при фиксированной температуре топлива. При выгораниях топлива выше 2 % тяж. ат. величина твердотельного распухания для разных размеров топливного зерна практически совпадают и определяется главным образом степенью выгорания. Размер топливного зерна существенно влияет на процесс твердотельного распухания на ранних стадиях выгорания ( $\ll 1\%$ ). Различия связаны с тем, что формирование твердотельных преципитатов начинается с момента времени диффузионного выхода ПД на границу зерна, которое растёт с ростом его радиуса. Также можно заметить, чем меньше размер зерна, тем больше газовое распухание и больше выход ГПД. Это связано с тем, что атомам газа необходимо некоторое время, чтобы продиффундировать до границы зерна, и, следовательно, чем меньше зерно, тем меньше время для выхода на границу зерна и наоборот.

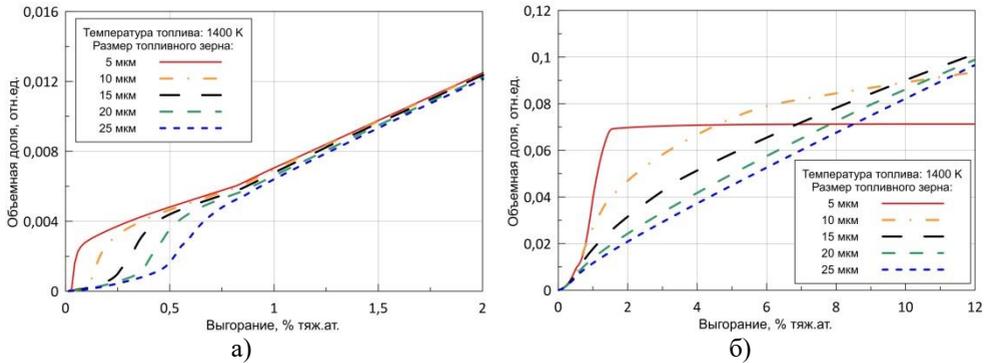


Рисунок 7 – Влияние размера зерна на долю твердотельного (а) и газового (б) распухания СНУП топлива от его выгорания при фиксированной температуре 1400 К

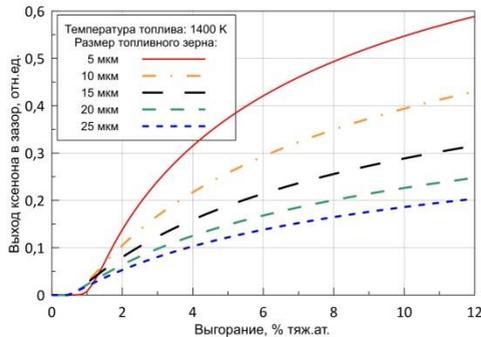


Рисунок 8 – Влияние размера зерна на выхода ксенона из топливной таблетки от выгорания топлива при фиксированной температуре 1400 К

Также существенное влияние оказывает температура эксплуатации топлива при облучении (рисунки 9 и 10). Температурная зависимость твердотельного распухания оказывается незначительной, что нельзя сказать про газовое распухание и, соответственно, выход ГПД из топлива, которые растут с ростом температуры. Поэтому при эксплуатации необходимо учитывать влияние температуры топлива на его поведение, например, одним из эффективных решений является использование жидкометаллического подслоя в качестве материала между топливом и оболочкой твэла. Жидкометаллический подслей позволяет снизить температуру топлива на 300–400 °С (рисунок 11) и тем самым замедлить выход ГПД и распухание топлива (рисунок 12). Вероятнее всего, это позволит увеличить максимальное выгорание топлива до более высоких значений, так как для данного варианта отсутствует МВТО на протяжении всего времени облучения твэла и достигаются значительно меньшие значения внутреннего давления в твэле.

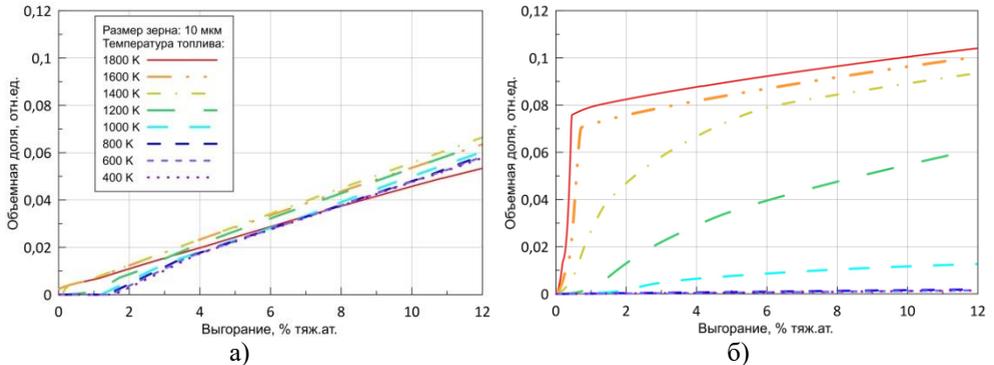


Рисунок 9 – Влияние температуры на долю твердотельного (а) и газового (б) распухания СНУП топлива от его выгорания при фиксированном размере топливного зерна 10 мкм

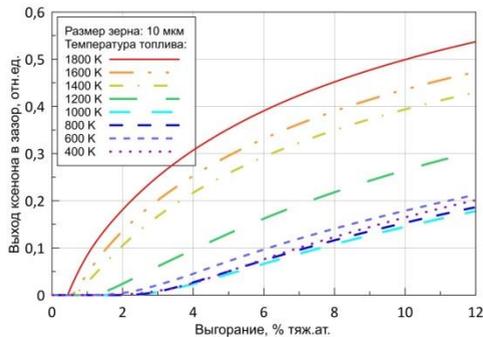


Рисунок 10 – Влияние температуры на выход ксенона из топлива при фиксированном размере топливного зерна 10 мкм

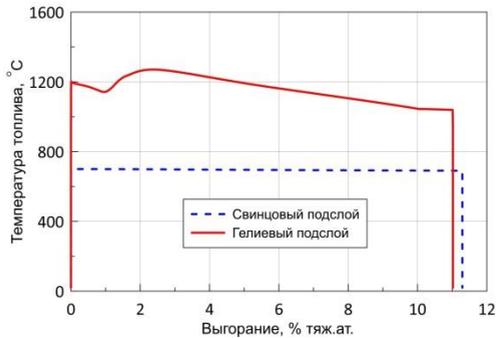


Рисунок 11 – Сравнение расчетной максимальной температуры топлива в твэлах с газовым и свинцовым подслоем

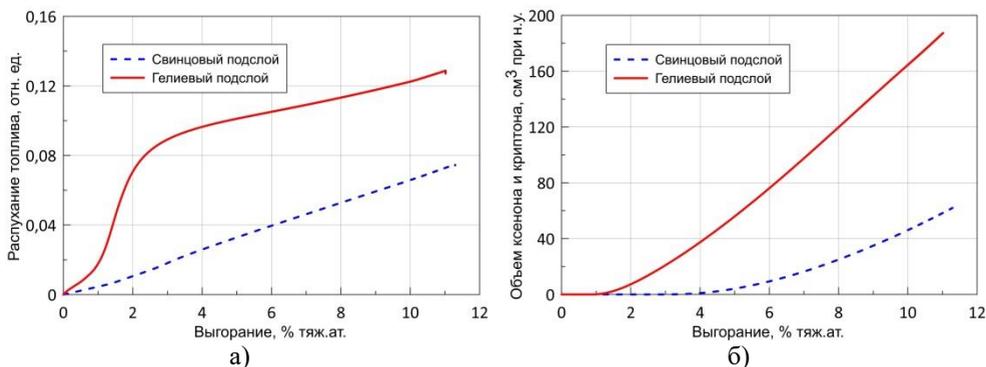


Рисунок 12 – Сравнение расчетного распухания топлива (а) и выхода ГПД (б) в твэлах с газовым и свинцовым подслоем

Подводя итог, для раскрытия полного потенциала СНУП топлива необходим поиск оптимального баланса его параметров с учетом особенностей технологии изготовления и их влияния на безопасность эксплуатации и экономические показатели.

## ОСНОВНЫЕ РЕЗУЛЬТАТЫ ДИССЕРТАЦИИ

В рамках диссертационного исследования проведено усовершенствование твэльного кода БЕРКУТ-У в части моделей поведения СНУП топлива под облучением в быстром реакторе и его валидация на данных послереакторных исследований экспериментальных нитридных твэлов.

В результате выполнения диссертационной работы были:

- выполнен анализ научной литературы и подготовлен обзор экспериментальных данных и информации о расчетных исследованиях СНУП топлива;
- внедрена в твэльный код БЕРКУТ-У модель расчета эффективной теплопроводности выгоревшего СНУП топлива; показано влияние образовавшихся в процессе облучения в СНУП топливе твердых фазовых включений (преципитатов) на его теплопроводность;
- разработаны и внедрены в твэльный код БЕРКУТ-У модели, учитывающие влияние открытой и закрытой пористости СНУП топлива на его распухание, выход ГПД и гелия;
- разработана матрица валидации кода БЕРКУТ-У, разработаны расчетные модели твэлов, проведена валидация твэльного кода БЕРКУТ-У на данных ПРИ экспериментальных твэлов со СНУП топливом, облученных в быстрых реакторах БОР-60 и БН-600; оценены погрешности расчёта твэльным кодом распухания СНУП топлива и выхода газов из него;
- выполнены моделирование и анализ влияния параметров СНУП топлива, а также эксплуатационной температуры на его поведение под облучением.

Исследования, результаты которых представлены в диссертации, являются частью работ, выполненных в рамках проекта «Коды нового поколения» проектного направления «Прорыв» и Государственного контракта на выполнение научно-исследовательских работ «Разработка интегрированных систем кодов нового поколения для разработки и обоснования безопасности ядерных реакторов, проектирования атомных электростанций, создания технологий и объектов ядерного топливного цикла (Государственные контракты № Н.4х.241.9Б.19.1017 от 21.12.2018 и № Н.4о.241.19.21.1068 от 14.04.2021).

### ОСНОВНЫЕ ПУБЛИКАЦИИ 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. A.V. Boldyrev, **A.V. Zadorozhnyi**, V.D. Ozrin, V.I. Tarasov, I.O. Dolinskii, S.Yu. Chernov. Berkut Code Validation on Post-Reactor Studies of Irradiated Bn-600 Fuel Rods with Mixed Uranium-Plutonium Nitride Fuel. *At Energy* 127, 356–361 (2020).
4. 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.

5. **Задорожный А.В.**, Озрин В.Д., Тарасов В.И., Болдырев А.В., Половников П.В., Долгодворов А.П., Долинский И.О., Шестак В.Е. Моделирование поведения смешанного нитридного топлива в быстрых реакторах твэльным кодом БЕРКУТ-У / Тезисы докладов XII Международной конференции по реакторному материаловедению, посвященной 60-летию материаловедческого комплекса АО «ГНЦ НИИАР», Димитровград, 2024. – С. 184–188.

6. **Задорожный А.В.**, Озрин В.Д. Основные результаты моделирования твэлов с нитридным уран-плутониевым топливом и жидкометаллическим подслоем в условиях эксплуатации реактора БОР-60 / Сб. тезисов докл. МНПК «Материалы и технологии в атомной энергетике», 22-23 июня 2022, Москва: АО «ВНИИНМ», 2022. – С. 8.

7. **Задорожный А.В.**, Озрин В.Д. Влияние преципитатов на теплопроводность нитридного топлива / Труды 63-й Всероссийской научной конференции МФТИ 23–29 ноября 2020 года. Фундаментальная и прикладная физика. Москва: МФТИ, 2020. – С. 163–164.

8. **Задорожный А.В.**, Озрин В.Д. Моделирование поведения примесей кислорода и углерода в ядерном нитридном топливе / Материалы Международного молодежного научного форума «ЛОМОНОСОВ-2019», 8-12 апреля 2019, Москва: МГУ имени М.В. Ломоносов, 2019. – С. 11.

9. **Задорожный А.В.**, Озрин В.Д. Моделирование распухания нитридного топлива с учетом поведения примесей кислорода и углерода / Сб. трудов XX научной школы молодых ученых ИБРАЭ РАН, 12-13 сентября 2019, Москва: ИБРАЭ РАН, 2019. – С. 75.

10. **Задорожный А.В.**, Озрин В.Д. Результаты моделирования твэльным кодом БЕРКУТ-У твэлов со смешанным нитридным топливом и жидкометаллическим подслоем в условиях эксплуатации быстрого реактора / Сб. тезисов XXII научной школы молодых ученых ИБРАЭ РАН, проходившей 23-24 мая 2023 г. Москва: ИБРАЭ РАН, 2023. – С. 23.

Задорожный Антон Валерьевич

Моделирование поведения смешанного нитридного уран-плутониевого топлива под облучением

Автореферат  
диссертации на соискание ученой степени  
кандидата технических наук

Подписано в печать \_\_.\_\_.\_\_\_\_  
Формат 60 × 84 1/16. Усл. печ. л. 1,25. Уч.-изд. л. 1,05.

Тираж 100 экз.  
Печать на аппарате Rex-Rotary.  
ИБРАЭ РАН. 115191, Москва, ул. Б. Тульская, 52  
Телефон: 8-495-955-22-66